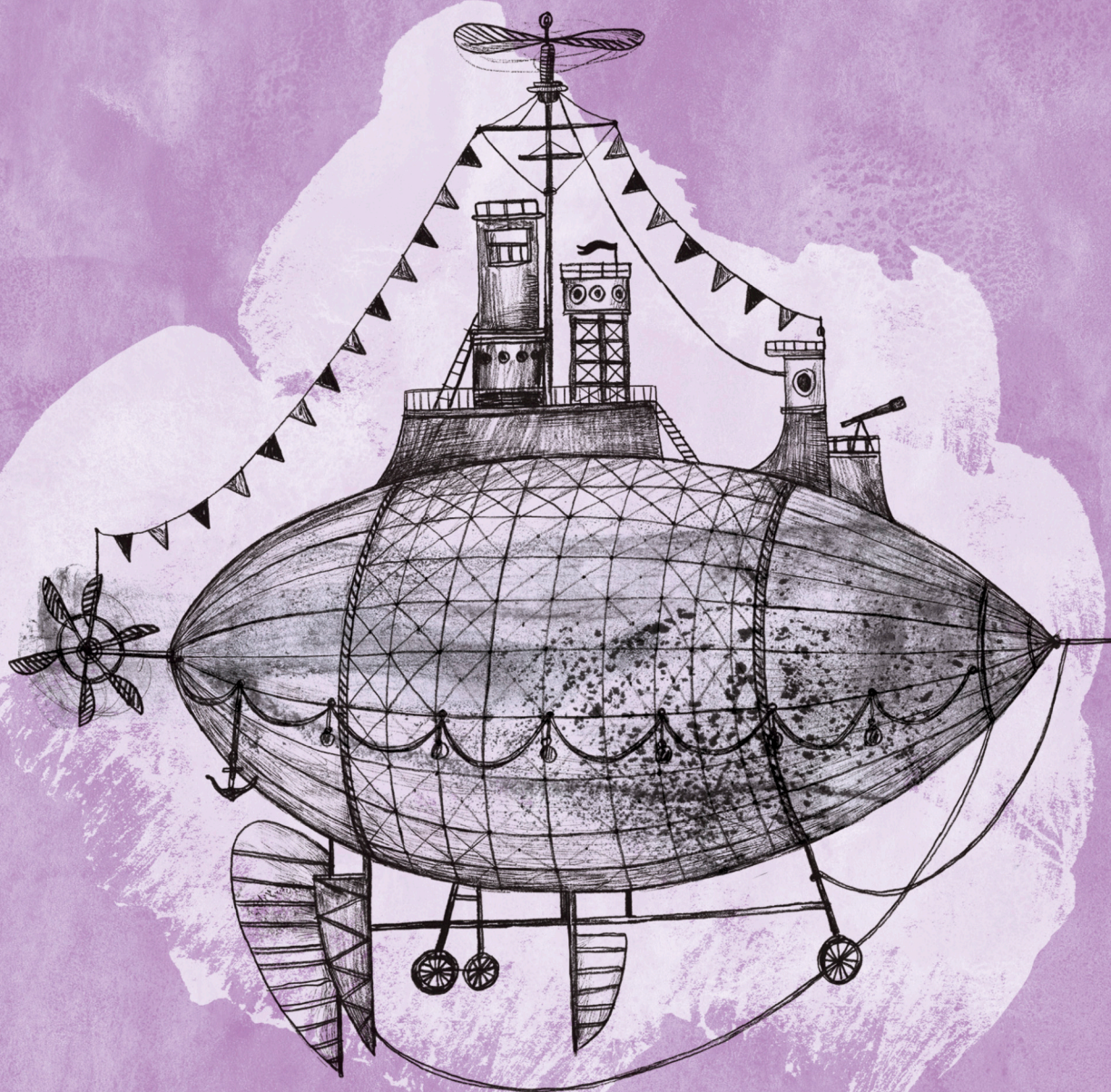


Джирл Уокер



# Новый физический ФЕЙЕРВЕРК

Сборник качественных задач по физике

2-е издание, с новыми заданиями  
и подробными ответами



УДК 53.02  
ББК 22.3  
У62

*Оригинальное название The Flying Circus of Physics, 2<sup>nd</sup> edition*  
*Издано с разрешения John Wiley & Sons International Rights, Inc.*

*На русском языке публикуется впервые*

Перевод с английского Инны Кагановой, Татьяны Лисовской

Научные редакторы Леонид Ашкинази, Анна Васильева

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 12+

### **Уокер, Джирл**

У62 Новый физический фейерверк. Сборник качественных задач по физике / Джирл Уокер ; пер. с англ. канд. физ.-мат. наук И. Кагановой, канд. физ.-мат. наук Т. Лисовской ; [научн. ред. канд. физ.-мат. наук Л. Ашкинази, канд. биол. наук А. Васильева]. — М. : Манн, Иванов и Фербер, 2019. — 456 с., ил.

ISBN 978-5-00146-185-2

Второе издание легендарного сборника задач по физике. Эта книга поможет вам понять, как устроен окружающий мир и чем занимается физика как наука. Легким и неформальным языком она расскажет о физических законах и явлениях, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни. Хорошо подойдет для учеников старшей школы, особенно тех, кто углубленно изучает физику.

УДК 53.02  
ББК 22.3

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-00146-185-2



Copyright © 2007 John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license with the original publisher John Wiley & Sons, Inc.

© Перевод на русский язык, издание на русском языке  
ООО «Манн, Иванов и Фербер», 2019

# Оглавление

От автора	10				
Предисловие	12				
<b>Глава 1</b>					
Механика твердых тел					
Между каплями дождя	13				
1.1 Бежать или идти под дождем?	13	1.31 Осадные орудия	32	1.65 Игрушка-пружинка слинки	54
1.2 Колонны автомобилей и транспортный коллапс	13	1.32 Люди — пушечные ядра	32	1.66 Наклонная башня	54
1.3 «Волны трафика» на автостраде	14	1.33 Броски мяча в баскетбольную корзину	33	1.67 Падающая пизанская башня	56
1.4 Минимальная дистанция между машинами при буксировке	15	1.34 Короткая история. Рекордные штрафные броски	34	1.68 Эффект домино	56
1.5 Проезд на желтый свет	15	1.35 Зависание в баскетболе и балете	34	1.69 Падающие трубы, карандаши и деревья	57
1.6 Закручивание автомобиля при экстренном торможении	15	1.36 Секреты игры в гольф	35	1.70 Почему ломаются заточенные карандашные грифели	58
1.7 Скользить или не скользить	16	1.37 Короткая история. «Занавес смерти» при падении метеорита	35	1.71 Обрушение моста	59
1.8 Торможение юзом	17	1.38 Прыжки в длину и высоту	36	1.72 Крушение поезда	60
1.9 Короткая история. Рекордные тормозные пути	18	1.39 Мексиканские прыгающие бобы	38	1.73 Удары в боулинге	60
1.10 Почему дятлам и толсторогим баранам не грозит сотрясение мозга	19	1.40 Кувьрки жуков-щелкунов и атаки раков-богомолов	38	1.74 Удары в американском и других бильярдах	61
1.11 Короткая история. Рекордные ускорения	19	1.41 Короткая история. Рекордный вес взят	39	1.75 Мини-гольф	62
1.12 Лобовые столкновения автомобилей	20	1.42 Соударения в цепочке шаров и игрушка «мятник Ньютона»	39	1.76 Фокусы с мячиком-попрыгунчиком	63
1.13 Короткая история. Представление с участием локомотивов	20	1.43 Падение нескольких мячей	41	1.77 Короткая история. Спорный мяч	64
1.14 Удар сзади и травма шейных позвонков	20	1.44 Короткая история. Разорительный фокус	42	1.78 Теннис	64
1.15 Повороты на гоночном автомобиле	21	1.45 Карате	42	1.79 Велосипеды и мотоциклы	65
1.16 Дорожки для спринта	21	1.46 Бокс	43	1.80 Длинные прыжки на мотоцикле	66
1.17 Иллюзия задирания носа самолета при взлете	21	1.47 Падение галерей	44	1.81 Скейтборды	66
1.18 Короткая история. Рейс 143 «Эйр Канада»	22	1.48 Обрушение башен-близнецов	44	1.82 Метание подков	67
1.19 Страх и ужас в парке аттракционов	23	1.49 Падения с высоты со счастливым концом	45	1.83 Кручение хула-хупа и лассо	68
1.20 Короткая история. Цирковые трюки «чертова петля»	24	1.50 Спасительный прыжок с парашютом	45	1.84 Игрушка йо-йо	68
1.21 Как поймать высокий мяч в бейсболе?	25	1.51 Падение кошек с высоты	46	1.85 Раскручивание йо-йо	69
1.22 Короткая история. Мячи, сброшенные с высоты	26	1.52 Прыжки с тарзанкой и «банджи-джампинг»	46	1.86 На автомобиле со сверхзвуковой скоростью	70
1.23 Удары в бейсболе	27	1.53 Постараться выжить в падающем лифте	47	1.87 Короткая история. Взрыв на центрифуге	71
1.24 Разрешенные передачи в регби	28	1.54 Короткая история. Как бомбардировщик протаранил Эмпайр-стейт-билдинг	47	1.88 Как выбраться из перевернутого каяка	71
1.25 Жонглирование	29	1.55 Падения в борьбе, приземление при парашютировании	48	1.89 Кёрлинг	71
1.26 Прыжки с шестом	29	1.56 Ложе факира	48	1.90 Канатоходцы	72
1.27 Атлатль и жабий язык	29	1.57 Висящие ложки	49	1.91 Как удержаться на спине быка	72
1.28 Праща	30	1.58 Следы от камней	49	1.92 Проблемы с туалетной бумагой	73
1.29 Томагавки	31	1.59 Узлы	49	1.93 Скачущие камни и бомбы	73
1.30 Болас	31	1.60 Лазанье по скалам	50	1.94 Вращение на льду	74
		1.61 Как бегают по скалам снежные бараны	52	1.95 Вращение книги	75
		1.62 Перемещение истуканов по острову Пасхи	52	1.96 Падающая кошка, кувьрки космонавтов и акробатические прыжки в воду с вышки	75
		1.63 Древние сооружения Стоунхенджа	52	1.97 Четверное сальто	77
		1.64 Как поднимали каменные блоки при строительстве египетских пирамид	53	1.98 Падающий бутерброд	77
				1.99 Балет	78
				1.100 Повороты на лыжах	78
				1.101 Как проползти по скользкому льду	80
				1.102 Короткая история. Последовательность вращений имеет значение	80
				1.103 Волчки тоже бывают разные	80
				1.104 Короткая история. Непослушный чемодан	82
				1.105 Китайский волчок	82

1.106	Вращение яйца	82
1.107	Диаболо	82
1.108	Кельтские камни, или «кельты»	83
1.109	Крутящиеся монетки и бутылки	84
1.110	Дзюдо, айкюдо и олимпийская борьба	84
1.111	Вращение пули и длинные пасы в американском футболе	85
1.112	Раскачивание детских качелей	86
1.113	Гигантское кадило	86
1.114	Маятник в колодце	87
1.115	Перевернутый маятник и одноколесный велосипед	87
1.116	Ношение тяжестей на голове	88
1.117	Ношение тяжестей на гибких шестах	88
1.118	Связанные маятники	89
1.119	Пружинный маятник	90
1.120	Молчаливый колокол	91
1.121	Эффект спагетти	91
1.122	Паук и муха	92
1.123	Колебания пешеходного моста и пола танцзала	93
1.124	Балансирующие конструкции и камни	93
1.125	Как затонула ядерная подводная лодка «Курск»	94
1.126	Как песчаный скорпион обнаруживает жертву	95
1.127	Снежные волны	96
1.128	Волна на футбольном стадионе	96
1.129	Бронежилет	96
1.130	Парадокс лучника	97
1.131	Колеблющиеся растения	97
1.132	Колебания высоких зданий	97
1.133	Прыжки в воду с пружинящего трамплина	98
1.134	Метание блесны	98
1.135	Битва за Фолклендские острова и Большая Берта	99
1.136	Джек и бобовый стебель, дотянувшийся до космоса	100
1.137	Весенняя лихорадка и яйца, стоящие вертикально	100
1.138	Лунное безумие	101
1.139	Притягивающий холм	101
1.140	Падение через центр Земли	102
1.141	Растяжение пластиковых пакетов	103
1.142	Мостовая гигантов и колонны из крахмала	103
1.143	Ломающиеся ногти	104
1.144	Смятая в шарик бумага	104
1.145	Примеры расширения при взрыве	104
1.146	Почему висящая на стене картина перекашивается?	105
1.147	Фокус с двумя пружинами	105
1.148	Устойчивость банки с лимонадом	105
1.149	Маятник Уилберфорса	106
1.150	Подготовка к гонкам драг-рейсинг	106
1.151	Повернуть или остановиться	106
1.152	Проскочить мимо автобуса	107
1.153	Давление в липкой ленте	107
1.154	Бобслейная трасса с поворотами	108
1.155	Кольцо на колеблющемся стержне	108
1.156	Дом Маленького принца	108
1.157	На парашюте с тыквой	109
1.158	Как вытащить быющуюся рыбу	109
1.159	Вращающееся кольцо	109
1.160	Пропеллер на палочке с вырезами	110
1.161	Толкание ядра и бросание молота	110
1.162	Прыжки при спуске с горы на лыжах	111
1.163	Как вытащить скатерть из-под тарелок	111
1.164	<b>Короткая история.</b> Перетаскивание вагонов зубами	111
1.165	Подпрыгивающий стул	111
1.166	Как поднять человека при помощи пальцев	111
1.167	Ракеты и санки	112
1.168	<b>Короткая история.</b> С Земли на Венеру	113
1.169	Выбор молотка	113
1.170	Клапан скороварки	113
1.171	Скольжение линейки по пальцам	113
1.172	<b>Короткая история.</b> Неудавшийся рекорд по перетягиванию каната	114
1.173	Стрельба вдоль склона	114
1.174	Как трогаться с места на скользкой дороге	114
1.175	Балансировка колес	114
1.176	Игра «Попади в бутылочку»	115
1.177	Разобьется или не разобьется бокал?	115
1.178	Почему сломается сверло?	116
1.179	Качающиеся часы	116
1.180	<b>Короткая история.</b> Мост «Золотые Ворота»: испытание на прочность	116
1.181	Рыскание железнодорожных вагонов	116
1.182	Колебания антенны автомобиля	117
1.183	Корабли и успокоительные цистерны	117
1.184	Неровности на дорогах	118
1.185	Почему нам видна только одна сторона Луны?	118
1.186	Искусственные спутники	118
1.187	Как сопротивление воздуха ускоряет спутник	118
1.188	Полет к Луне «по восьмерке»	119
1.189	Кто сильнее притягивает Луну — Земля или Солнце?	119
1.190	Гравитационная праща	119
1.191	Составление топографической карты Индии	119
1.192	Бритье двойным лезвием	119
1.193	Размыв берегов рек	120

## Глава 2

Механика жидкостей и газов

*Гонки по потолку, плавание в сиропе* 121

2.1	Гоночный автомобиль на потолке	121
2.2	Сила тяги	122
2.3	Аэродинамика несущихся мимо поездов	122
2.4	Обрушение старого моста через Такома-Нэрроуз	123
2.5	Аэродинамика строений	123
2.6	Воздушные змеи	124
2.7	Прыжки на лыжах с трамплина	125
2.8	Скорость горнолыжника	125
2.9	Бумеранги	126
2.10	Бросаем карты	126
2.11	Вращающиеся семена	127
2.12	Летающие змеи	127
2.13	Аэродинамическое сопротивление при полете теннисных мячей	128
2.14	Футбольный мяч, огибающий стенку	128
2.15	Аэродинамика мячика для игры в гольф	129
2.16	Аэродинамика бейсбола	130
2.17	Аэродинамика крикета	130
2.18	Стая птиц, летящая клином	131
2.19	С какой скоростью можно плавать в сиропе?	131
2.20	Конденсационные следы	132
2.21	Почему втягивается занавес душевой кабинки	132
2.22	Луговые собачки и гигантские муравейники	133
2.23	Вихри в ванной	133
2.24	Вихри в чашечке кофе	134
2.25	Скопление чаинок в чае, кружение оливки в мартини	135
2.26	Извилистые (меандрические) реки	135
2.27	Птица, вертящаяся в воде	136
2.28	Вода, поднимающаяся по вращающемуся яйцу	136
2.29	Вода, образующая круг в раковине	136
2.30	Уровень воды в канале	137
2.31	Солитоны	137
2.32	Приливные волны	138
2.33	Приливы и отливы	138
2.34	Приливы в заливе Фанди	139
2.35	Мертвая вода	139



2.36	Торнадо	140	2.73	Масло и волны	161	2.113	Снегозащитные сооружения и золотые отложения	189
2.37	Короткая история. Как выглядит торнадо изнутри	141	2.74	Парящие капли	161	2.114	Снежные лавины	189
2.38	Водяные смерчи и облачные рукава	141	2.75	Разбрызгивающиеся капли	162	2.115	Оползни длинного выхода	190
2.39	Пыльные вихри, вихри в тумане, туманные вихри	141	2.76	Пузырьки в газированной воде, пиве и шампанском	164	2.116	Камнепады	190
2.40	Круговые вихри	142	2.77	Мыльные пузыри и пивная пена	165	2.117	Развеваяющиеся флаги и ленты	191
2.41	Сифоны и туалеты	143	2.78	Лопающиеся пузырьки	167	2.118	Развеваяющиеся фонтаны и грохочущие водопады	191
2.42	Бегающие по воде шлемоносные василиски	144	2.79	Киты и сети из пузырей	167	2.119	Пульсирующие фонтаны	192
2.43	Свинцовый брусок, плавающий в лодке	144	2.80	Водомерки	167	2.120	Разливаем жидкости: перевернутый стакан и ярд для эля	192
2.44	Плавающие бруски и открытые контейнеры	145	2.81	Бусинки на прутике и на нити из слюны	168	2.121	Капля за каплей	193
2.45	Дыра в дамбе и корабль в сухом плавуем доке	145	2.82	Сбор дождевой воды ящерицами в пустыне	169	2.122	Шоу мыльных пузырей	194
2.46	Обмороки летчиков при перегрузках	146	2.83	Как кормятся кулики	169	2.123	Траектории пузырей	194
2.47	Кровообращение змей, жирафов и высоких динозавров	146	2.84	Капли и жидкие пленки на твердой поверхности	170	2.124	Антипузырьки	195
2.48	Плавали ли зауроподы?	147	2.85	Притягивающиеся кукурузные хлопья	171	2.125	Рис на палочке	195
2.49	Гастролиты у динозавров и крокодилов	147	2.86	Замки из песка	171	2.126	Метание диска	196
2.50	Эффект Коанда	147	2.87	Внешний вид плохого кофе	172	2.127	Метание копья	196
2.51	Эффект чайника	148	2.88	«Слезы» вина и другие игры жидких поверхностей	172	2.128	Две сближающиеся лодки	197
2.52	Всплытие после глубоководного погружения	149	2.89	Узор на ликере «Тиа Мария»	173	2.129	Аэродинамика кабелей и проводов	197
2.53	Как люди и слоны плавают под водой	149	2.90	Узоры на кофе и других жидкостях	173	2.130	Скимборд — доска для катания на мелкой воде	197
2.54	Глубоководное погружение и как спастись из подводной лодки	150	2.91	Узоры на пятнах от кофе и кофейной гуще	175	2.131	Подъемная сила при повороте за угол	198
2.55	Трагедия на озере Ниос	151	2.92	Фигуры дыхания	175	2.132	Отражение волн песчаными отмелями	198
2.56	Короткая история. Прыжок через дом и планирование в шезлонге	151	2.93	Эффект лотоса	176	2.133	Дождь и волны	199
2.57	Течение стекла в окне средневекового собора	152	2.94	Тля и жидкий мрамор	177	2.134	Соляной маятник	199
2.58	Странные вязкие жидкости	153	2.95	Кисти, мокрые волосы и печенье к чаю	177	2.135	Солевые пальцы и солевой фонтан	200
2.59	Суп, вращающийся в обратную сторону	154	2.96	Картошка фри	177	2.136	Как жидкость поднимается по стволам деревьев	201
2.60	Скачущая струйка жидкости	154	2.97	Как утки выходят из воды сухими или почему «как с гуся вода»	178	2.137	Ветровые полосы на воде	201
2.61	Жидкость, собирающаяся по стержню	154	2.98	Половинка картофелины, птичий помет и автомобиль	178	2.138	Улицы облаков и полосы лесных пожаров	201
2.62	Бухта жидкого каната	155	2.99	Катапульта для грибных спор	179	2.139	Упаковка M&M's	202
2.63	Волны на воде	155	2.100	Волны на льющейся струйке воды	179	2.140	Груда яблок	202
2.64	Гигантские одиночные волны и волны-убийцы	155	2.101	Водяные колокола, пленки и цепочки	180	2.141	Узоры из порошка	202
2.65	Волны, разворачивающиеся к берегу	156	2.102	По мокрому пляжу и зыбучему песку	180	2.142	Гидравлический осциллятор	203
2.66	Волны, прошедшие через сужение	156	2.103	Разрушение зданий и шоссе	181	2.143	Масляные капли,двигающиеся в глицерине	203
2.67	Сейши и разлитая вода	157	2.104	Короткая история. Зыбучее зерно	182	2.144	Шар в струе воздуха	204
2.68	Кильватерный след от уток и авианосцев	158	2.105	Людской поток, и как избежать паники	182	2.145	Корабль Флеттнера	204
2.69	Серфинг	159	2.106	Кучка песка и самоорганизующийся поток	183	2.146	Гибралтарский пролив, Мессинский пролив и Сицилийский пролив	204
2.70	Движение морских свинок и дельфинов	159	2.107	Течение в песочных часах и элеваторах	184	2.147	Разбрызгивание гранул	205
2.71	Краевые волны	160	2.108	Эффект бразильского ореха и колебания порошка	185	2.148	Небольшая морщинка на текущей воде	205
2.72	Пляжевые фестоны	161	2.109	Лавинный шар	186	2.149	Извивающиеся тонкие струйки	205
			2.110	Песчаная рябь и движение	186	2.150	Сбритые волосы и лодка на камфаре	206
			2.111	Песчаные дюны	187	2.151	Масляные пятна на дорогах	207
			2.112	Ярданги и выветривание песка	188	2.152	Капли воды и узоры на глицерине	207
						2.153	Лучики оливкового масла на покрытой тальком воде	207
						2.154	Осциллятор из куриного жира	208

### Глава 3

#### Акустика

#### *Шорохи и звуки в ночной тишине* 209

- 3.1 Завывание ветра 209
- 3.2 Гудение телефонных проводов и шелест сосновых иголок 209
- 3.3 Свист и свистки 210
- 3.4 Речь и пение 211
- 3.5 Как гелий меняет голос 212
- 3.6 Горловое пение 212
- 3.7 Храп 213
- 3.8 Мурлыканье и рычание 213
- 3.9 **Короткая история.** Рев динозавра-паразавролофа 214
- 3.10 Рычащий тигр, трубящий слон 214
- 3.11 Кваканье лягушки-быка 214
- 3.12 Сверчки и лангусты 215
- 3.13 Как лягушка исполняет мелодию на дереве, а сверчок — в норке 215
- 3.14 Атаки австралийских цикад 215
- 3.15 Голоса пингвинов 216
- 3.16 Щелчки китов 216
- 3.17 Отраженный тон 216
- 3.18 Звуки, распространяющиеся на большие расстояния 217
- 3.19 Акустическая тень 218
- 3.20 Прослушивание советских подлодок 219
- 3.21 Мегафон и сирена 219
- 3.22 Где можно услышать шепот 220
- 3.23 Эффект Доплера 220
- 3.24 Как насекомоядные летучие мыши находят насекомых 221
- 3.25 Как растительноядные летучие мыши находят цветок 222
- 3.26 Распространение звука под водой 223
- 3.27 Эффект дружеской вечеринки 223
- 3.28 Звук из ушей 224
- 3.29 Почему мы слышим музыку, которой нет 224
- 3.30 Как не оглохнуть, слушая громкую музыку 225
- 3.31 Усиление звука с помощью шума 226
- 3.32 Стетоскопы и звуки дыхания 226
- 3.33 Натяжение гитарных струн и растяжение резиновой ленты 226
- 3.34 Игра на скрипке 227
- 3.35 Мерцающее звучание скрипки 228
- 3.36 Морские раковины 228
- 3.37 Диджериду 229
- 3.38 Тряска и гудение силосной башни 229
- 3.39 Поющие гофрированные трубки 230
- 3.40 Музыкальная чашка 230
- 3.41 Резонанс в бутылке 231

- 3.42 Скрип и визг 232
- 3.43 Поющие винные бокалы 232
- 3.44 Можно ли голосом разбить винный бокал 233
- 3.45 Журчание ручейков и шелест дождя 233
- 3.46 Резонанс в вертикальном сосуде 233
- 3.47 Урчание водопроводных труб 234
- 3.48 Хруст в суставах 234
- 3.49 Тоны Короткова 234
- 3.50 Атака раков-убийц 235
- 3.51 Шум закипающей воды 235
- 3.52 Звуки при пережевывании пищи 236
- 3.53 Снэп, Крэкл и Поп 236
- 3.54 Грохот, издаваемый самолетами и пулями 237
- 3.55 Громкие хлопки в железнодорожных тоннелях 238
- 3.56 Гром 238
- 3.57 Бронтиды — таинственные громоподобные звуки 239
- 3.58 Камнепад и лесоповал 240
- 3.59 Щелканье кнута и удар мокрым полотенцем 240
- 3.60 Кашель и чихание 241
- 3.61 Акустика комнат и концертных залов 241
- 3.62 Галереи шепотов в различных сооружениях 242
- 3.63 Галерея шепотов в соборе Святого Павла 242
- 3.64 Эхо от стен, углов и лесов 243
- 3.65 «Музыкальное» эхо при отражении от заборов и лестниц 244
- 3.66 **Короткая история.** Звуковые эффекты в древних сооружениях 244
- 3.67 Пение в душе 245
- 3.68 Шумный сосед 245
- 3.69 Поющие и скрипящие пески 245
- 3.70 Потрескивающий лед и шипящие айсберги 246
- 3.71 Прохождение звука через снег 246
- 3.72 Звук шагов по снегу 246
- 3.73 «Можно ли услышать форму барабана?» 247
- 3.74 Инфразвук 247
- 3.75 Шелест на пшеничных полях 248
- 3.76 Щелчки натягиваемой ткани 248
- 3.77 Пение водоотводных труб 248
- 3.78 Свисты игрушки-пружинки-слинки 249
- 3.79 Ружейные выстрелы в районах вечной мерзлоты 249
- 3.80 Шум полярного сияния и сгорающих метеоритов 250
- 3.81 Австралийская гуделка 250

### Глава 4

#### Термодинамика

#### *Ночью охота идет за теплым* 251

- 4.1 Мертвые гремучие змеи 251
- 4.2 Жуки, сигнализирующие о пожаре 251
- 4.3 Пчелы, убивающие шершней 251
- 4.4 Скучивание животных 252
- 4.5 Выход в космос без скафандра 252
- 4.6 Капли на горячей сковородке, пальцы в расплавленном свинце 252
- 4.7 **Короткая история.** Ужасный глоток 254
- 4.8 Хождение по раскаленным углям 254
- 4.9 **Короткая история.** Рассказы об огнехождении 255
- 4.10 Замерзшая и переохлажденная вода 256
- 4.11 Как правильно есть морской лед 256
- 4.12 Скорость остывания горячей и теплой воды 257
- 4.13 Небо, замораживающее воду 258
- 4.14 Как спасти заготовленные на зиму овощи с помощью бочки с водой 258
- 4.15 Чтобы фруктовый сад не вымерз, его нужно полить 258
- 4.16 Что будет, если в сильный мороз плеснуть вверх горячей водой? 259
- 4.17 Сосульки 259
- 4.18 Ледяной затор на крыше 260
- 4.19 Иней и наледь на проводах 260
- 4.20 Ледяные шипы и другие образования из льда 261
- 4.21 Мутные кубики льда 262
- 4.22 Фигуры внутри тающего льда 262
- 4.23 Замерзание прудов и озер 263
- 4.24 Как замерзают газированные напитки 263
- 4.25 Лопачущиеся трубы 264
- 4.26 Что будет, если дотронуться или лизнуть холодную трубу? 265
- 4.27 Ухабы зимой и пинго в зонах вечной мерзлоты 265
- 4.28 Мерзлотные полигоны в Арктике 266
- 4.29 Камни, растущие в саду, и узоры на земле 266
- 4.30 Борозды от валунов 267
- 4.31 **Короткая история.** Бомба из дохлой кошки и исчезновение путем замораживания 267
- 4.32 Форма снежинок 268
- 4.33 Катание на лыжах 268
- 4.34 Катание на коньках и игра в снежки 269





- 6.8 Закаты и вулканы 342
- 6.9 Кольцо Бишопы 343
- 6.10 Контрастная облачная дуга 343
- 6.11 Цвет неба во время солнечного затмения 343
- 6.12 Небо позеленело — прячась в погреб 344
- 6.13 Почему на закате небо над головой синеет 344
- 6.14 Темное пятно в розовом обрамлении, возникающее на закате 345
- 6.15 Яркие и темные лучи на небе 345
- 6.16 Голубая дымка, красная дымка, коричневый туман 346
- 6.17 Огни далекого города 346
- 6.18 Как далеко линия горизонта 346
- 6.19 Цвет неба при сплошной облачности 347
- 6.20 Карты в небе 347
- 6.21 Пошел снег — и посветлело 347
- 6.22 Где кончается луч прожектора 347
- 6.23 **Короткая история.** Ньюгрейндж: луч света в день зимнего солнцестояния 348
- 6.24 Зеленое свечение 348
- 6.25 Изменение формы солнца на закате 349
- 6.26 Красная луна при лунном затмении 349
- 6.27 Коронная вспышка 350
- 6.28 Оазисный мираж 350
- 6.29 Мираж в стене 351
- 6.30 Живущие в воде чудовища, водяные и громадные миражи 351
- 6.31 Призрак в цветах 353
- 6.32 Дрожание и мерцание звезд 353
- 6.33 Теневые полосы 354
- 6.34 22-градусное гало и солнечные собаки 355
- 6.35 Множество гало, дуг и пятен на небе 355
- 6.36 Тень горы 356
- 6.37 Исчезающие тени облаков 357
- 6.38 Цвет океана 357
- 6.39 Блестящие отражения солнца и луны 358
- 6.40 Кольца света 358
- 6.41 Тени и цвета на воде 358
- 6.42 Цвет тени 359
- 6.43 Почему мы видим темную часть Луны 360
- 6.44 Венец и оппозиционный эффект 360
- 6.45 Колосющаяся нива 362
- 6.46 Глория 362
- 6.47 Корона 363
- 6.48 Корона на замерзшем стекле 363
- 6.49 Радужные облака 363
- 6.50 Синяя луна 363
- 6.51 Желтые противотуманные фары 364
- 6.52 Почему мокрое темнее сухого 364
- 6.53 Цвет снега и льда 364
- 6.54 Фирновое зеркало и искрящийся снег 365
- 6.55 Белая мгла и снежная слепота 365
- 6.56 Желтые лыжные очки 366
- 6.57 Когда лед становится темным 366
- 6.58 Яркие облака и темные тучи 366
- 6.59 Серебряные облака 367
- 6.60 Отражение в зеркале 367
- 6.61 Отражение в воде и зеркало на сцене 368
- 6.62 Призрак Пеппера и голова без тела 368
- 6.63 Наклонные окна в пунктах управления полетом 369
- 6.64 Отражения в двух и трех зеркалах 369
- 6.65 Калейдоскопы 370
- 6.66 Зеркальные лабиринты 371
- 6.67 Сайд-шоу «Стрельба по мишени из лазера» 372
- 6.68 Темные треугольники между елочными шарами 373
- 6.69 Как блестящее становится черным, а белое — чернее черного 374
- 6.70 Светоотражатели 374
- 6.71 **Короткая история.** Как в темноте приземлиться в тылу врага 375
- 6.72 Одностороннее зеркало 375
- 6.73 Зеркало заднего вида 375
- 6.74 Зеркало бокового обзора 376
- 6.75 Бар в «Фоли-Бержер» 376
- 6.76 Картины эпохи Возрождения и оптические проекторы 377
- 6.77 Анаморфоз в искусстве 377
- 6.78 Где под уличными фонарями светлее 377
- 6.79 Многократные отражения от окон с двойными стеклами 378
- 6.80 Самый мощный прожектор в мире 378
- 6.81 Луч смерти Архимеда 379
- 6.82 **Короткая история.** Испепеляющие страсти 379
- 6.83 Призрачные огни на кладбище 380
- 6.84 Какой видит рыбу рыбак 380
- 6.85 Каким видит рыба рыбака 380
- 6.86 Как прочесть письмо в запечатанном конверте 381
- 6.87 **Короткая история.** Глотание шпаги и эзофагоскопия 382
- 6.88 Оптика дверцы душевой кабинки 383
- 6.89 Магия преломления 383
- 6.90 Человек-невидимка и прозрачные животные 384
- 6.91 Рефракция, изгибающая дорогу 385
- 6.92 Надо ли поливать растения на жарком солнце? 386
- 6.93 Можно ли зажечь костер с помощью льда? 386
- 6.94 Бриллианты 386
- 6.95 Опалы 387
- 6.96 Александритовый эффект 387
- 6.97 Звездчатый сапфир 387
- 6.98 Свет, прошедший через бокал с вином, окно и каплю воды 388
- 6.99 Тени с яркими границами и полосами 389
- 6.100 Яркие и темные полосы на крыле 390
- 6.101 **Короткая история.** Ударные волны от автомобиля Thrust SSC 391
- 6.102 Камеры пинхол и пинспек 391
- 6.103 Изображения солнца под деревом 392
- 6.104 Свет, падающий через оконную сетку; линии между пальцами 392
- 6.105 Яркие царапины и разноцветная паутина 393
- 6.106 Яркие полосы на ветровом стекле 394
- 6.107 Отражения от грампластинок 395
- 6.108 Разные цвета на предметах с мелким рельефом 396
- 6.109 Против подделок: оптико-переменные элементы 396
- 6.110 Цветные кольца на запотевшем или пыльном зеркале 397
- 6.111 Цвет молока в воде 398
- 6.112 Цвет дыма от костра 398
- 6.113 Эффект анисового ликера 398
- 6.114 Цвет масляных пятен, мыльной пленки и металлической кастрюли 399
- 6.115 Структурная окраска насекомых, рыб, птиц и обезьян 400
- 6.116 Жемчуг 402
- 6.117 Бугорки на глазах насекомых и самолеты-невидимки 402
- 6.118 Переливчатые растения 403
- 6.119 Против фальшивомонетчиков — цветопеременная краска 403
- 6.120 Насыщенный цвет лепестков 404
- 6.121 Сияние желтых листьев осины 404
- 6.122 Цвет глаз 405
- 6.123 Посинеть от холода 405
- 6.124 Узоры из пятнышек 405
- 6.125 Цвета при свете люминесцентной лампы 406
- 6.126 Поляризационные солнцезащитные очки 407
- 6.127 Поляризация света неба 408
- 6.128 Как муравей находит дорогу домой 409



6.129 Цветные пятна и поляризация 410  
 6.130 Бесцветные пена и мелкий порошок 411  
 6.131 Блестящий черный бархат, блестящие покрытия 411  
 6.132 Цвет зеленого стекла и зеленый бархат 412  
 6.133 Прекрасная персиковая кожа и кажущаяся мягкость 412  
 6.134 Вечеринки с «Твинки» и вазелином 413  
 6.135 Цвет мяса 413  
 6.136 Недолитое пиво 414  
 6.137 «Белее белого» 414  
 6.138 Исчезающая монета 414  
 6.139 Солнцезащитные очки и смог 415  
 6.140 Яркость океана 415  
 6.141 Синяя лента на морском горизонте 415  
 6.142 Ночная тьма опускается стремительно 416  
 6.143 Цветной конденсационный след самолета 416  
 6.144 Перламутровые облака 416  
 6.145 Сумеречный фиолетовый свет 416  
 6.146 Рябь на небе 417  
 6.147 Линия на фоне дождя вдалеке 417  
 6.148 Ясная ночь 417  
 6.149 Зодиакальный свет, противостояние и другие ночные огни 418  
 6.150 Отражения на линии морского горизонта 418  
 6.151 Как использовать сплошной металлический шар для фокусировки света 418  
 6.152 Крутой поворот в кривом зеркале 419  
 6.153 Цвет дыма сигареты 419  
 6.154 Что бы мы увидели в ультрафиолетовом свете 420  
 6.155 Дифракция на буквах 420  
 6.156 Игра с отражением 420

## Глава 7

Физика зрения  
*Танец броненосцев на фоне распухшей Луны* 421  
 7.1 Лунная иллюзия 421  
 7.2 Форма неба 421  
 7.3 Как «обезглавить» человека с помощью слепого пятна 422  
 7.4 Серая сетка по утрам, летающие точки днем 422  
 7.5 Мушки и другие пятна в глазу 423  
 7.6 Ореолы вокруг уличных фонарей, горящих свечей и звезд 424  
 7.7 Фосфены — психоделические картинки 424  
 7.8 Жужжание и стробоскопический эффект 425  
 7.9 Как уследить за летящим бейсбольным мячом 426  
 7.10 Импрессионизм 427  
 7.11 Пуантилистический стиль в живописи 427  
 7.12 Муаровые узоры 428  
 7.13 Оп-арт 428  
 7.14 Эффект глубины на картинах, написанных маслом 429  
 7.15 Чтение в темноте 430  
 7.16 Цветной призрак светящейся точки 430  
 7.17 Отражающие глаза 431  
 7.18 Как видят под водой люди, пингвины и крокодилы 431  
 7.19 Подводное зрение «четыреглазых» рыб 432  
 7.20 Улыбка Чеширского кота 432  
 7.21 Рино-оптический эффект 433  
 7.22 Бегущие облака и синие вреднючки 433  
 7.23 Эффект Палфрича 434  
 7.24 Последовательное зажигание уличных фонарей 435  
 7.25 Полосы Маха 435

7.26 Перевернутый мир 436  
 7.27 Перевернутые тени и бугор на ровном месте 436  
 7.28 Странное отражение в елочном шарике 437  
 7.29 Вращение узоров из случайно нанесенных точек 437  
 7.30 Снежные узоры на телевизионном экране 438  
 7.31 Улыбка Моны Лизы 438  
 7.32 Призраки телевизионного экрана, плавающие в воздухе 439  
 7.33 Чтение через маленькие отверстия (пинхолы) 439  
 7.34 Цветной ореол вокруг пальца 440  
 7.35 Наблюдение звезд днем через трубу 440  
 7.36 Как звездочеты смотрят на звезды 440  
 7.37 Земные объекты, различимые с орбиты 441  
 7.38 Медоносные пчелы, пустынные муравьи и поляризованный свет 441  
 7.39 Щетка Гайдингера 442  
 7.40 Цвета теней 443  
 7.41 Безопасность солнцезащитных очков 443  
 7.42 Хрусталики рыб 443  
 7.43 Ощущение объема на красно-синих плакатах 444  
 7.44 Синие дуги Пуркинье 445  
 7.45 Пятно Максвелла 446  
 7.46 Визуальные ощущения от излучения 446  
 7.47 Красный свет на панелях управления 447  
 7.48 Рентгеновское зрение Супермена 447  
 7.49 Иллюзия фейерверков 447  
 7.50 Взгляд на потолок 447

Алфавитный указатель 449

# От автора

*Эта книга посвящается моей жене **Мэри Голрик**, которая была рядом все 13 лет, что я готовил колонку «Ученый-любитель» для журнала *Scientific American*, все 16 лет, когда я писал «Фундаментальные основы физики», и все 200 лет (по моим ощущениям), которые я потратил на это издание «Нового физического фейерверка». Без ее поддержки, любви и терпения я бы просто сидел и смотрел в стену.*

История «Физического фейерверка» началась одним мрачным вечером в 1968 году, когда я был помощником преподавателя в Мэрилендском университете. В тот день я поспорил со своей студенткой — Шэрон. Она провалила тест и возмутилась: «Какое отношение это все имеет к моей жизни?!»

Я тут же ответил: «Шэрон, это физика! Она имеет прямое отношение к жизни!»

Она внимательно посмотрела на меня и сказала: «Приведите пример».

Я думал и думал, но в голову так ничего и не пришло. Я шесть лет посвятил физике, но не смог придумать один-единственный пример.

Вечером я понял, что проблема во мне: когда мы говорили про физику, мы имели в виду то, что люди делали в здании физического факультета, а не нашу обычную жизнь. Поэтому я решил собрать несколько примеров из реального мира и назвал эту коллекцию «Физическим фейерверком». Понемногу к ней добавлялись новые задачи.

Вскоре «Физическим фейерверком» заинтересовались другие люди: сначала студенты, потом и преподаватели. Эта коллекция попала в одну из научных публикаций Мэрилендского университета, а затем издательство John Wiley & Sons предложило мне контракт на книгу.

Книга была напечатана в 1975 году, когда я уже был профессором физики в Государственном университете Кливленда. С тех пор ее перевели на 11 языков. Перед вами второе издание книги, полностью переработанное.

Когда я начинал собирать материал для «Физического фейерверка», я просматривал пару десятков научных журналов, страница за страницей, в поисках

интересных статей. Мне казалось, что я старатель в бесплодных горах: крупинцы золота встречались редко, извлечь их было сложно.

Теперь мир поменялся. Каждый год публикуют сотни научных работ подходящей тематики. Можно сказать, что я нашел свою золотую жилу. Я сам просматриваю около 400 журналов и проверяю с помощью поисковика еще несколько сотен. Мои пальцы летают над клавиатурой. Мне бы хотелось, чтобы Шэрон увидела те любопытные вещи, которые я отыскал. Эта книга позволит вам заглянуть мне через плечо и убедиться: физика имеет «прямое отношение к нашей жизни».

## САЙТ «НОВОГО ФИЗИЧЕСКОГО ФЕЙЕРВЕРКА»

У этой книги есть свой сайт, на котором вы найдете:

- библиографическую справку — цитаты из 10 000 научных работ по инженерному делу, математике, медицине и юриспруденции;
- дополнительные задачи;
- исправления, уточнения и комментарии к книге;
- расширенный алфавитный указатель.

[www.flyingcircusofphysics.com](http://www.flyingcircusofphysics.com)

## БЛАГОДАРНОСТИ

Мне надо поблагодарить очень многих людей, которые поддерживали меня, когда я думал, что все пропало. Или которые терпели меня, когда я работал как одержимый.

Спасибо Джирлу и Марте Уокер (мои родители, которые в моей юности провели немало бессонных ночей, беспокоясь, что меня ждет — оглушительный



успех или тюремная камера), Бобу Филипсу (учитель математики и физики в старшей школе, который открыл для меня новый мир), Филу ДиЛавору (благодаря ему я начал преподавать), Джо Рэддишу (он настоял, чтобы Мэрилендский университет опубликовал мои записки), Филу Моррисону (он убедил меня взяться за книгу и написал на нее отличную рецензию в журнал *Scientific American* — так началось мое 13-летнее сотрудничество с ними), Дэннису Флэнагану (редактор журнала *Scientific American*, который стал моим наставником на эти 13 лет), Дональду Дэнеку (сотрудник издательства John Wiley & Sons, предложивший мне контракт на «Физический фейерверк»), Карлу Касперу и Бернарду Хэммермешу (они были хорошего мнения о книге и предложили мне должность ассистента профессора в Государственном университете Кливленда), Дэвиду Хэллидею и Роберту Реснику (они уступили мне «Фундаментальные основы физики» в 1990 году), Эду Миллмену (он объяснил мне, как писать учебники), Мэри Джейн Сондерс (она вычитала много страниц рукописи и помогла появиться новому

изданию «Физического фейерверка»), Стюарту Джонсону (физическому редактору издательства John Wiley & Sons, который помог мне с этой книгой и с «Фундаментальными основами физики»), Кэрол Сэйтцер (она прочла рукопись этой книги и внесла много серьезных правок), Мэделин Лейже (дизайнер этой книги), Элизабет Суэйн (она отвечала за издание этой книги в John Wiley & Sons), Крису, Кэрол и Клэр Уокерам (мои взрослые дети, которым всю жизнь приходилось терпеть мою любовь к преподаванию и книгам), Патрику Уокеру (мой подрастающий сын — он не только терпел мою работу, но и научил меня подниматься на стены с отрицательным уклоном на скалодроме) и — больше всех — моей жене Мэри Голрик, которая подкинула мне много идей и подбадривала меня, когда я говорил «Все пропало».

*Джирл Уокер,  
департамент физики,  
Государственный университет Кливленда*

# Предисловие

Обычно задача предисловия — помочь читателю решить, «покупать или не покупать», и подтолкнуть его к правильному (сами понимаете какому) выбору. В данном случае сложностей никаких: что такое задачник по физике, все и так знают, а открыв этот, вы сразу увидите, в чем его особенность, — достаточно прочесть первые две задачи. Только не дочитывайте до десятой — она к вам не имеет отношения!

Эта книга не похожа на обычные школьные задачки и пособия для подготовки к ЕГЭ — в ней описаны реальные природные или экспериментальные ситуации. Рассматривая задачу, надо сначала понять, какие физические законы проявляются в данном случае и как именно они работают, то есть построить модель явления. Именно такими вопросами занимается физика как наука, и именно с попытки понять, что важно и что не важно для конкретной ситуации, начинается поиск ответа. Поэтому сейчас у вас в руках не очередной задачник, который сулит вам «сто баллов». **У вас в руках способ понять, что такое физика, чем и как она занимается. Интересно ли, нужно ли это вам как ученику (или как родителю ученика).**

Правда, в «серьезной» физике мало поднять глаза к потолку и изречь, что дело в том-то и том-то, — надо построить связную и полную модель, дать расчет, результат которого умеренно близок к наблюдению или эксперименту. Но не всё сразу. Кошка тоже сначала боялась пылесоса — а потом втянулась. Потому что физика как профессия — это жизнь, со своими проблемами и решениями, огорчениями и радостями, с острым кайфом в момент, когда вы понимаете, что решили проблему и теперь в мире существует что-то, что знаете только вы, — и вам есть кому это рассказать. Уж можете мне верить...

Книга принесет много пользы старшеклассникам и учителям: предложенные в ней задачи подойдут для занятий физического кружка или первого частично самостоятельного исследования. Многие задачи будут интересны студентам и преподавателям вузов: одни

из них могут стать темой самостоятельной научной работы, первой публикации в научном журнале, другими можно воспользоваться на лекции как красивой иллюстрацией действия того или иного закона. Книга доставит удовольствие тем инженерам и физикам, кто еще не совсем забыл свое детство и способен думать не только о проблемах Вселенной, но и о более земных вещах — дожде, трафике на дорогах, дятлах, долбящих дерево, и так далее. Кроме того, в задачнике есть повествовательные вставки, рассказывающие о реальных историях, которые имеют отношение к разбираемым задачам. Так что и развлечение вам обеспечено.

Сегодня на всех прилавках можно увидеть популярные книги о Вселенной и элементарных частицах, способные создать ощущение причастности к чему-то большому... Красивые слова действуют как гипноз. Однако для понимания того, как работает физика, этот задачник полезнее таких книг. Потому что передний край науки далек от нас, а ситуации, которые разбирает Уокер, — они вот тут, рядом и вокруг. **Вскоре вы начнете замечать физические задачи вокруг себя. И это не лечится.**

Сложны ли эти задачи? Да как сказать... Чтобы разобраться в их первом слое, школьного курса достаточно. Правда, надо его применить, а этому школа учит нечасто. Заодно и потренируетесь... Даже физик-профессионал не сможет щелкать эти задачи как орешки — вот и вы будете возвращаться к книге много-много раз. А то школьник — я вижу это ежегодно и в массовом масштабе — в теории знает, что такое котлета, но перед реальной тарелкой с реальной котлетой замирает в недоумении. Пахнет приятно... Но что с ней делать?

Да как что?! Котлету — есть! Книгу — читать, а задачи — пробовать на зуб.

*С уважением,  
Леонид Ашкинази,  
в некоторой мере научный редактор*



## Глава 1

# Механика твердых тел

## Между каплями дождя

### 1.1 • БЕЖАТЬ ИЛИ ИДТИ ПОД ДОЖДЕМ?

Что лучше — перебежать улицу или спокойно перейти ее шагом, когда на улице дождь, а у вас с собой нет зонтика? Если вы побежите, то, конечно, проведете меньше времени под дождем, но зато на вас упадет больше капель. Изменится ли ответ, если ветер дует в лицо и струи дождя льют прямо на вас? А если дождь хлещет в спину?

Если вы ведете автомобиль под дождем, какую скорость вам выбрать, чтобы на лобовое стекло попадало наименьшее количество воды и сквозь него хоть что-то было видно?

**ОТВЕТ •** Если дождь падает вертикально или хлещет из-за встречного ветра в лицо, нужно бежать как можно быстрее. Хотя вы и набегаете на капли дождя, но чем меньше времени проведете под дождем, тем меньше намокнете. Чтобы уменьшить количество падающих на вас капель, следует уменьшить площадь своего сечения в перпендикулярной струям плоскости, то есть наклониться вперед. Как заметил кто-то из моих студентов, если под дождем нужно бежать, да еще и наклоняться при этом, проще уж воспользоваться скейтбордом. Но тогда вы привлечете к себе повышенное внимание, а кроме того, таскать с собой скейтборд еще неудобнее, чем зонтик.

Если же ветер дует вам в спину, лучше всего бежать со скоростью, равной горизонтальной составляющей

скорости падающих капель. В этом случае намокнут голова и плечи, но ни на переднюю, ни на заднюю часть тела капли попадать не будут. Однако эта стратегия не сработает, если под дождем перемещается объект с гораздо большей, чем у вас, площадью горизонтального поперечного сечения. Такой объект соберет заметное количество воды на своей верхней поверхности, даже если его скорость совпадет с горизонтальной скоростью капель дождя. Чтобы меньше промокнуть, этот объект должен перемещаться как можно быстрее.

Если вы в дождь ведете машину, вы не рискуете промокнуть, но вам важна хорошая видимость. Если капли падают вертикально вниз или если их сдувает в лобовое стекло, нужно ехать медленно. Если же каплет сдувает ветром в направлении вашего движения, то в идеале вам нужно ехать со скоростью, равной горизонтальной скорости капель, но тогда, возможно, уж лучше вообще не трогаться в путь.

### 1.2 • КОЛОННЫ АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАНСПОРТНЫЙ КОЛЛАПС

Как согласовать последовательность переключений светофоров на перекрестках улиц, чтобы плотный поток транспорта ехал по улице равномерно и без остановок? Нужно ли менять график переключений в часы пик? Почему иногда, например во время снежной бури, эти схемы переключений перестают работать, собираются пробки и поток машин фактически останавливается?

**ОТВЕТ •** Автомобили движутся группами, или, иначе, колоннами. Допустим, на перекрестке 1 колонна останавливается на красный свет светофора. Когда светофор переключается на зеленый, передние машины в колонне первыми ускоряются и начинают двигаться с некоторой обычной для этой магистрали скоростью потока. До того как они подъедут к перекрестку 2, сигнал светофора на этом перекрестке должен

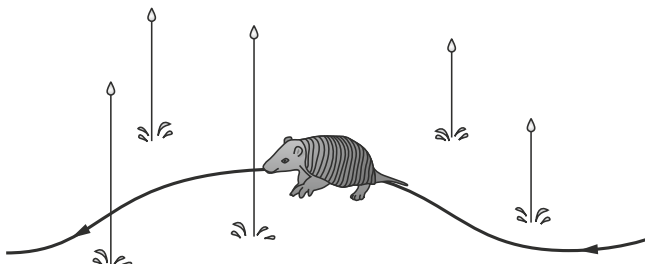


Рис. 1.1 / Задача 1.1

переключиться на зеленый, чтобы водители не испугались и не начали тормозить. Если знать расстояние между перекрестками, типичное ускорение машин-лидеров и время, которое им понадобится, чтобы доехать до перекрестка на данной скорости, можно рассчитать момент, в который сигнал светофора 2 должен переключиться на зеленый.

Движение задних автомобилей в колонне начинается не в момент переключения сигнала светофора на зеленый, а с задержкой, то есть тогда, когда «волна стартов» дойдет до них (водители начинают движение не одновременно). Возможно, на это понадобится несколько десятков секунд. Если хвост колонны начнет движение слишком поздно, он будет остановлен следующим красным сигналом светофора на перекрестке 2. Предположим, колонна, движущаяся по той же улице следом за первой, такой же длины или даже длиннее предыдущей. Тогда количество машин, остановленных следующим красным сигналом светофора на перекрестке 2, увеличится.

Положение ухудшится, если и следующие за ними колонны тоже длинные. Колонна машин, остановленных на перекрестке 2, может увеличиться и растянуться до перекрестка 1. Тогда задние машины переключат поперечное движение на этом перекрестке. Так начинается транспортный коллапс. Чтобы разрядить ситуацию, последовательность переключения сигналов светофоров на перекрестках 1 и 2 нужно поменять. Зеленый сигнал на светофоре 2 должен теперь загораться раньше зеленого на светофоре 1, тогда машины, остановленные на светофоре 2, смогут уехать до того, как прибьет следующая колонна. Смену режимов переключения сигналов светофоров можно производить вручную или с помощью компьютера, отслеживающего количество машин, стоящих на перекрестке 2.

Движение колоннами можно наблюдать и в тоннелях (особенно там, где перестроение между полосами запрещено), и на двухполосных загородных шоссе. В каждом случае колонны машин образуются тогда, когда более быстрый автомобиль упирается в более медленный, например в фуру. На сельских дорогах колонна рассасывается, если водителям удастся обогнать автомобиль-тихоход.

### 1.3 • «ВОЛНЫ ТРАФИКА» НА АВТОСТРАДЕ

Почему, когда поток машин, движущихся по шоссе или автострате, уплотняется, «волны трафика», образуемые ускоряющимися и замедляющимися автомобилями, перемещаются по потоку? Эти волны иногда

возникают, когда случается ДТП или когда заглохшая машина блокирует полосу, а иногда поток замедляется из-за разных несущественных причин вроде перестраивания какой-то машины с полосы на полосу. В каком направлении движутся эти «волны» — по ходу потока или в противоположном направлении? Почему «волны» долго не исчезают после того, как попавшие в ДТП или заглохшие машины были эвакуированы?

**ОТВЕТ** • Когда машин мало, действия отдельного водителя не оказывают большого влияния на других водителей, особенно если есть возможность обгона. Когда плотность потока несколько увеличивается, водители начинают влиять друг на друга — в том смысле, что они начинают медленнее двигаться (частично из соображений безопасности, а частично — из-за того, что уменьшается возможность обгона). Предположим, вы ведете машину в таком потоке. Если водитель перед вами замедляется или ускоряется, через секунду вы среагируете и сделаете то же самое. Водитель, едущий позади вас, еще через секунду последует вашему примеру. И так волна изменений скорости распространится по цепочке автомобилей назад. Вероятно, эта волна со стороны малозаметна, поскольку обычно скорости не меняются резко.

Теперь предположим, что передний водитель резко ударил по тормозам. И вы, и водитель за вами тоже резко затормозите, но каждому из вас потребуется примерно секунда на то, чтобы среагировать. Резкое торможение распространится в виде волны назад по цепочке машин, и такая волна уже будет заметна для наблюдателя, находящегося на обочине дороги. Эта волна — «волна трафика», или «стоп-волна». В зависимости от концентрации машин она может распространяться как в направлении движения машин (по ходу движения), так и в противоположном направлении (против хода движения), иногда она даже может стать стоячей.

Предположим, волна возникла, когда одна из машин заглохла в достаточно плотном потоке, и водителю потребуется 15 минут, чтобы убрать машину с дороги. Поскольку после этого автомобили начинают разгоняться до нормальной своей скорости, через длинную цепочку скопившихся машин пройдет «волна разрежения». Может пройти много времени, прежде чем «волна разрежения» догонит «стоп-волну», или, иначе, «волну трафика», все еще распространяющуюся по цепочке машин назад. И только тогда движение автомобилей вернется в нормальное русло.

#### 1.4 • МИНИМАЛЬНАЯ ДИСТАНЦИЯ МЕЖДУ МАШИНАМИ ПРИ БУКСИРОВКЕ

Каким должно быть минимальное расстояние между буксирующим и буксируемым автомобилями, при котором буксируемый автомобиль успеет остановиться, прежде чем столкнется с буксировщиком, если тому придется резко затормозить? Общие рекомендации состоят в том, что расстояние между двумя этими автомобилями должно зависеть от скорости и при возрастании скорости на каждые 16 км/ч увеличиваться минимум на одну длину машины. Обоснованы ли эти рекомендации?

**ОТВЕТ** • Рекомендации необоснованны, поскольку держатся на двух сомнительных предположениях. Одно из них состоит в том, что у обоих водителей одинаковая скорость реакции в чрезвычайной ситуации. Если водитель буксируемого автомобиля реагирует медленнее, чем водитель буксировщика, потребуются большая дистанция. Другое, менее явное, предположение состоит в том, что обе машины замедляются одинаково. Это предположение вообще нереально, если только автомобили не тормозят юзом, хотя и в этом случае нет гарантии. Конечно, опасная ситуация возникает, когда именно буксирующая машина тормозит быстрее, чем буксируемая.

Предположим, разница в скорости торможения у машин мала. Есть ли простое правило для расчета минимальной дистанции, позволяющей избежать столкновения при экстренном торможении? Как ни странно, нет, поскольку она зависит от квадрата скорости, так что ее нелегко вычислить в уме применительно к данной ситуации. Поэтому, если вы быстро едете за другой машиной, лучше держаться на гораздо большем расстоянии, чем того требует инструкция.

#### 1.5 • ПРОЕЗД НА ЖЕЛТЫЙ СВЕТ

Допустим, вы подъезжаете к перекрестку и тут светофор переключается на желтый. Что нужно сделать: жать на тормоза и останавливаться, продолжать движение на прежней скорости или ускориться? Вы можете принять решение, основываясь на собственном опыте, оценив свою скорость, расстояние до перекрестка, ширину поперечной улицы и попытавшись угадать, как долго будет гореть желтый сигнал светофора. Есть ли вероятность, что вы нарушите правила дорожного движения при любых действиях, даже если не превысите разрешенную скорость?

**ОТВЕТ** • Ответ зависит от местного законодательства. В одних местах считается, что вы нарушаете закон, если в тот момент, когда загорелся красный свет, находитесь на перекрестке, в других вы имеете право находиться на перекрестке, если въехали на него до того, как светофор переключился на красный. В первом случае вы вполне можете оказаться в патовой ситуации, когда не имеете возможности ни вовремя остановиться, ни достаточно ускориться (не превысив при этом допустимой скорости), чтобы проскочить перекресток. В таком случае есть диапазон расстояний до перекрестка, в котором любые ваши действия приводят к нарушению закона. Ситуация еще более усугубится, если окажется, что желтый сигнал горит недолго, а разрешенная скорость мала. Возможность возникновения такой ситуации зависит от расстояния до перекрестка, времени горения желтого сигнала, вашего тормозного пути при данной скорости, возможности увеличения скорости и ее разрешенного предельного значения. Опасность столкновений меньше, если зеленый сигнал для потока, движущегося по перпендикулярной улице, загорается с задержкой в одну-две секунды после включения красного сигнала для потока в вашем направлении.

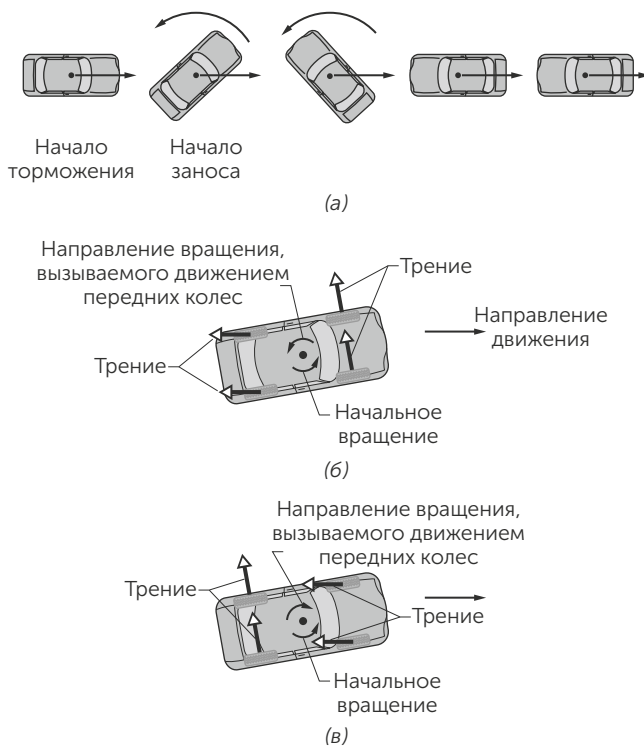
#### 1.6 • ЗАКРУЧИВАНИЕ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ЭКСТРЕННОМ ТОРМОЖЕНИИ

Когда машины, в которых нет системы АБС (антиблокировочной системы), экстренно тормозят, они начинают вращаться, а иногда даже ехать задом наперед (рис. 1.2а). Что заставляет их вращаться и почему не все типы автомобилей закручиваются при резком торможении? Какой стратегии лучше придерживаться, чтобы восстановить управляемость, если автомобиль уже начал вращаться? Куда нужно поворачивать колеса — в сторону заноса или в сторону предполагаемого движения?

**ОТВЕТ** • Разворачивает обычно автомобили, у которых двигатель крепится спереди, поскольку больший вес у них приходится на передние колеса и меньший — на задние. Это означает, что, скорее всего, сначала заблокируются задние колеса и они начнут скользить первыми, а уже потом — передние. И тогда любой случайный поворот, вызванный, например, неровностью дороги, быстро приведет к развороту.

Для того чтобы объяснить, отчего возникает разворот, рассмотрим трение между покрытием дороги и шиной, когда машина, у которой двигатель спереди, начинает поворачивать налево по отношению





**Рис. 1.2 / Задача 1.6.** а) Разворот автомобиля при резком торможении. Показаны силы трения, действующие на шины при размещении двигателя под передним капотом (б) и задним капотом (в).

к первоначальному направлению движения (рис. 1.2б). Силы трения, приложенные к проскальзывающим задним шинам, направлены назад. Силы трения, приложенные ко все еще вращающимся передним шинам, параллельны передней оси и направлены налево и частично назад. Все эти силы создают крутящий момент, стремящийся развернуть машину в горизонтальной плоскости вокруг ее центра масс. Момент сил, приложенных к передним колесам, больше, и он пытается развернуть машину в том же направлении, в котором машина уже начала вращаться. Таким образом, угол поворота все растет, и машина разворачивается.

Если же двигатель расположен у машины сзади, роли сил трения, действующих на передние и задние колеса, меняются и крутящие моменты, приложенные к задним колесам, преобладают — они стремятся уменьшить начальный поворот (рис. 1.2в).

Согласно стандартным рекомендациям, если вашу машину начинает закручивать, вы должны выворачивать передние колеса в сторону первоначального движения. При этом вы создадите крутящий момент, приложенный к передним колесам, который будет

препятствовать закручиванию. Но если вы не самый опытный водитель, то можете перестараться — и машину закрутит в противоположном направлении.

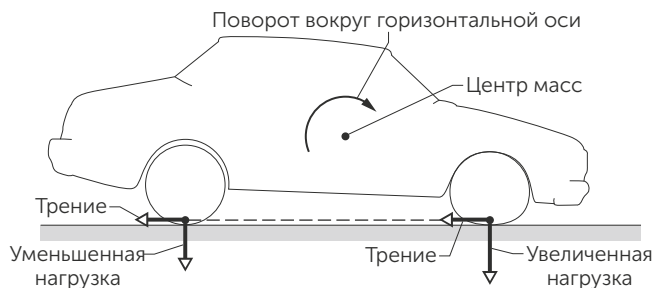
## 1.7 • СКОЛЬЗИТЬ ИЛИ НЕ СКОЛЬЗИТЬ

Предположим, что вы едете по шоссе и тут на дороге выскакивает огромный лось. Предположим также, что в машине нет АБС (антиблокировочной системы). Должны ли вы тормозить юзом, для чего надо как можно сильнее нажать на тормоз и тем самым заблокировать колеса, или же следует нажимать на тормоз лишь до тех пор, пока не почувствуете, что скольжение вот-вот начнется, то есть колеса не блокировать? Если автомобиль входит в режим полного скольжения (режим юза), почему скольжение так резко заканчивается в конце тормозного пути?

**ОТВЕТ •** В учебниках обычно рекомендуют второй вариант, правильно отмечая, что машина останавливается именно из-за трения между дорогой и шинами. Если колеса крутятся, трение можно увеличивать до определенного уровня, выжав педаль тормоза до некоторой величины. Если вы нажмете на тормоз сильнее, колеса заблокируются, шины начнут проскальзывать, трение уменьшится и тормозной путь увеличится.

Наилучший способ, как пишут в учебниках, — сильно тормозить, но только до тех пор, пока не начнется проскальзывание, и тогда тормозной путь будет минимальным. На самом деле это не совсем верно, поскольку в таком случае тормозной путь может быть на 25% длиннее, чем если бы вы заблокировали колеса и тормозили юзом.

Совет из учебника в экстренной ситуации может оказаться неправильным по двум причинам. Во-первых, у вас вряд ли будет время для экспериментов с тормозами. Вторая причина связана с крутящими моментами, создаваемыми силами трения между колесами и дорогой. Эти моменты стремятся наклонить машину, повернув вокруг горизонтальной оси, проведенной через центр масс (рис. 1.3), что уменьшает нагрузку на задние колеса и увеличивает на передние. Предположим, вы нажали на тормоз с таким усилием, что колеса еще крутятся, но еще чуть-чуть — и заскользят. Поскольку колеса все еще вращаются, а нагрузка на задние колеса уменьшилась, именно они (а не передние, испытывающие большую нагрузку) уже находятся на грани проскальзывания, и сила трения, приложенная к задним колесам, мала. Следовательно, общее



**Рис. 1.3 / Задача 1.7.** Машина наклоняется вперед при торможении.

трение у всей машины будет меньше, а тормозной путь — больше.

Теперь предположим, что вы нажали на тормоз с такой силой, что заблокировали все колеса, то есть машина пошла юзом. При полном скольжении трение между колесами и покрытием дороги зависит от нагрузки на них. Поскольку нагрузка на передние колеса увеличена, сила трения между ними и дорогой велика. Но даже притом, что нагрузка на задние колеса мала, увеличенное трение между передними колесами и покрытием означает, что общее трение больше, чем в предыдущем случае, а следовательно, тормозной путь машины короче. И все же блокировать колеса без крайней необходимости не стоит, так как при скольжении теряется контроль над машиной, и она вполне может развернуться (см. задачу 1.6) и даже столкнуться с движущимися в том же или в противоположном направлении машинами.

Резкая остановка в режиме полного скольжения объясняется тем, что внезапно возрастает трение между шинами и асфальтом. При скольжении в области их соприкосновения в начале торможения образуется смазка из расплавившегося гудрона и резины (см. задачу 1.8). Но при замедлении автомобиля количество расплавленного вещества — смазки — уменьшается, и трение внезапно возрастает.

### 1.8 • ТОРМОЖЕНИЕ ЮЗОМ

При экстренном торможении, если колеса блокируются, шины начинают скользить по асфальту и на нем остаются следы. Предположим, машина начинает скользить на определенной скорости и останавливается. Влияет ли на длину тормозного следа вес машины? А рисунок протектора и ширина шин? Что, если «резина лысая»?

Почему остановить машину труднее, когда дорога лишь слегка мокрая, чем когда по ней ручьями течет вода?

**ОТВЕТ •** При экстренном торможении трение между шинами и дорогой сначала увеличивается до максимальной величины, а затем падает, когда колеса блокируются и начинают проскальзывать. При скольжении от шин отрываются кусочки, а дорога и сами шины нагреваются. Шина может расплавиться, а если дорога покрыта составом, содержащим битум, может расплавиться и он. В таком случае образуется жидкая смазка, и трение еще уменьшается.

Расплавленное вещество быстро вернется в твердое состояние, но след от проскальзывавших колес останется надолго, возможно, на несколько месяцев. Часто по всей длине следа тянутся бороздки, возникшие либо из-за рельефа покрышек, либо из-за того, что в основании дороги лежит рыхлый гравий.

На бетонированных покрытиях следы скольжения остаются редко, а если и остаются, то они почти невидимы и образованы в основном оторванными или расплавленными фрагментами шин.

Если машина весь путь до остановки проходит юзом и ни с чем не сталкивается, длина тормозного следа позволяет установить ее скорость в момент, когда скольжение началось. Правда, это значение скорости можно определить только ориентировочно, поскольку в этих расчетах используется слишком много параметров. Один из них — масса (или вес) автомобиля. Для тяжелого автомобиля тормозной путь до остановки немного длиннее, чем для более легкого, в первую очередь из-за того, что при большем весе образуется больше смазки. (В судах при разборе ДТП и в книгах по физике этим фактором пренебрегают.)

А еще длина тормозного следа зависит от состояния дороги: он короче, если асфальт содержит вкрапления камня, и длиннее, если он отполирован шинами большого количества машин. Длина тормозного пути не зависит от ширины шин, так как, в принципе, силы трения между шинами и дорогой зависят только от веса, который давит на шины, от рисунка протектора (а следовательно, от сцепления шин с поверхностью дороги), но не от их ширины.

Если дорога сухая, бороздки на шинах не сильно влияют на длину тормозного пути, если же дорога влажная, их влияние может оказаться существенным. Когда воды много, как, например, во время ливня,

шины начинают скользить на тонком слое воды (аквапланирование). При этом движении трение почти нулевое, шины не соприкасаются с дорогой: поскольку вода не может найти выхода и вытечь из-под шин, они как бы парят над асфальтом. Чтобы уменьшить аквапланирование, на шинах делаются бороздки, которые направляют и выводят воду с нижней части шин наружу. Аквапланирование влияет еще сильнее, если до дождя дорога была грязной, потому что смешанная с водой грязь образует очень вязкую смазку — что-то вроде жидкой глины, и тогда трение между шиной и дорогой снижается еще сильнее. При экстренной остановке это может заставить водителей врасплах — ведь они считали, что раз дождь только начался, то дорога еще не настолько намочена, чтобы началось аквапланирование. Зато после того, как дождь смывает грязь, а дорога высохнет, трение между шиной и дорогой станет больше, чем до дождя, поскольку грязи на ней не останется.

Но даже если воды недостаточно, чтобы началось аквапланирование, она все же может значительно уменьшить трение между шиной и дорогой. За сухую дорогу шина зацепляется, потому что нижняя часть шины прогибается под весом и все время плотно прижимается к поверхности дороги. Из-за этого она может подстраиваться под неровности дороги, заполняя

собой небольшие выбоины и вбирая в себя легкие выступы. Такое плотное прилегание шины к неровностям дороги и обуславливает большое трение, требующееся при аварийной остановке. Когда же дорога мокрая, выемки заполнены водой, а когда шина «запечатывает» собой кусок дороги, вода из этих ямок не может никуда уйти, и дорога оказывается как бы выровненной, без бугров. Таким образом, шина уже не может зацепиться за эти неровности.

Если машину начинает вращать во время аварийной остановки, следы на дороге будут искривленными. Это вращение может начаться как из-за того, что задние колеса заблокируются раньше передних, так и из-за уклона дороги (часто средняя часть дороги делается выше, чем ее края, чтобы дождевая вода с нее стекала).

Если колесо все еще крутится во время заноса, оно боком трется о дорогу и *оставляет следы*, на которых не видны типичные для следов, оставляемых при скольжении, бороздки. Если дорога настолько неровная, что машина на ней будет подпрыгивать, или если торможение неоднородно, любые следы могут быть прерывистыми. Короткие разрывы в следах обычно говорят о том, что автомобиль подпрыгивал, а длинные могут означать, что водитель пытался остановиться, нажимая и отпуская тормоз.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 1.9 • РЕКОРДНЫЕ ТОРМОЗНЫЕ ПУТИ

Рекорд длины тормозного пути на общественных дорогах был установлен в 1960 году на шоссе М1 в Англии водителем «ягуара». Длина следа составляла 290 м. В суде утверждалось, что скорость автомобиля в момент, когда колеса только-только заблокировались, составляла примерно 160 км/ч. Но если принять коэффициент трения шин о покрытие дороги равным 0,7, можно подсчитать, что скорость машины составляла 225 км/ч.

Длина тормозного пути «ягуара», конечно, впечатляет, но она бледнеет при сравнении с рекордом, установленным Крейгом Бридлавом в октябре 1964 года на соляном озере Бонневиль-Солт-Флэтс. Пытаясь побить рекорд скорости для наземного автомобиля — 805 км/ч, Бридлав проехал на своем автомобиле «Спирит оф Америка» («Дух Америки») с установленным на нем ракетным двигателем мерную милю сначала в одном направлении, а потом в обратном, чтобы можно было учесть влияние ветра. Когда он мчался по мерной миле второй раз, его скорость составила 869 км/ч.

Для торможения он использовал парашют, но его стропы оторвались из-за недостаточной прочности, второй парашют тоже не сработал. Тогда он выжал педаль тормоза «в пол», но влияние тормозов сказалось в основном на появлении гигантского тормозного следа длиной почти 10 км, после чего они сгорели. После этого автомобиль продолжал мчаться со скоростью около 800 км/ч, проскочил две линии телефонных столбов, чудом не столкнувшись с ними. В конце концов он остановился, но как! Въехал на набережную, перескочил парапет и на скорости все еще больше 250 км/ч рухнул в соляное озеро глубиной 5 м. Бридлав был крепко пристегнут ремнями к сиденью и едва не утонул в салоне затопленного автомобиля. Но мерную милю Бридлав проехал и установил новый рекорд скорости, превывсив предыдущий почти на 40 км/ч. Его средняя скорость составляла 841 км/ч.



### 1.10 • ПОЧЕМУ ДЯТЛАМ И ТОЛСТОРОГИМ БАРАНАМ НЕ ГРОЗИТ СОТРЯСЕНИЕ МОЗГА

Дятел долбит клювом древесину, добывая пищу (насекомых, живущих под корой), строя дупла для выведения птенцов, а также выбивая громкую дробь для привлечения самки. При этих ударах голова дятла тормозит с отрицательным ускорением примерно в 1000 g (то есть в тысячу раз больше ускорения свободного падения). Для человека такая перегрузка смертельна или в лучшем случае может обернуться для него серьезной травмой мозга — сотрясением. Почему же дятел не падает с дерева замертво каждый раз, когда вонзает свой клюв в дерево?

Сражаясь за самку в брачный сезон, самцы толсторогого барана с разбегу врезаются друг в друга и со страшной силой сталкиваются рогами и головами. И при этом они не падают на землю без сознания. Некоторые виды рогатых динозавров (например, *трицератопсы*) тоже наносили друг другу сокрушительные удары рогами. Почему же после таких столкновений соперники остаются целы и невредимы?

**ОТВЕТ •** До сих пор не вполне понятно, почему мозг дятла способен выдерживать огромные перегрузки, когда птица долбит дерево, но есть два основных предположения. Во-первых, клюв дятла движется строго по прямой. Некоторые исследователи считают, что сотрясение мозга у людей и животных происходит при боковых смещениях головы относительно шеи (в которой находится ствол головного мозга), а при движении головы вперед-назад вероятность сотрясения меньше. Во-вторых, мозг дятла плотно прилегает к черепу: он отделен от черепной коробки лишь тонким слоем вязкой жидкости, поэтому остаточные смещения или колебания ткани мозга сразу после удара не настолько сильные, чтобы вызвать повреждения.

Сшибающихся головами баранов обычно спасают три обстоятельства. 1. Их рога слегка деформируются во время удара, увеличивая время соударения и тем самым уменьшая силу удара. 2. Чтобы смягчить удар в голову, кости черепа также могут слегка сдвигаться или поворачиваться в соответствующих соединениях (швах черепа) наподобие пружин или шарниров. 3. Большая часть энергии удара гасится сильными шейными мышцами животных. И хотя соударения со стороны выглядят совершенно устрашающе, крепкие мышцы животных надежно защищают мозг от сотрясений, а прочные рога не ломаются при ударе. *Трицератопсов*, возможно, спасала еще и развитая система пазух, окружавших черепную коробку и служивших амортизаторами ударов.

### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

#### 1.11 • РЕКОРДНЫЕ УСКОРЕНИЯ

В июле 1977 года на пересохшем озере Эль-Мираж в штате Калифорния Китти О'Нейл установила два рекорда на гоночном автомобиле типа «драгстер» на дистанции 402,3 м. Стартуя с места, она развила самую высокую зарегистрированную *финишную скорость* (скорость в конце дистанции) и поставила рекорд, преодолев дистанцию за самое короткое в истории время — 3,72 с. Развитая ею скорость была поразительной — 632,1 км/ч. Среднее ускорение на дистанции составило 47,1 м/с<sup>2</sup>. Это почти в 5 раз больше ускорения свободного падения. На других соревнованиях на дистанции 1600 м она показывала среднюю скорость 843 км/ч, но при этом ускорения были меньше.

В декабре 1954 года на базе Холломан ВВС США в Нью-Мексико полковник ВВС доктор Джон Стапп пристегнулся к сиденью на ракетных санях\*, оснащенных девятью ракетными двигателями. После запуска двигателей сани за 5 с разогнались до скорости 1018 км/ч. На стадии включения двигателей ускорение саней составило 56,4 м/с<sup>2</sup>, или 5,76 g. Цифра говорит сама за себя, однако настоящим испытанием для полковника стала остановка с помощью гидротормоза: сани замедлялись с ускорением 20,6 g, сбросив скорость до нуля всего за 1,4 с.

В мае 1958 года на той же базе Холломан Эли Бидинг-младший развил скорость 117 км/ч на похожих санях. В самой скорости нет ничего примечательного, она обычна для автобанов. Впечатляет время разгона — 0,04 с. За это время человек не успевает буквально и глазом моргнуть. Ускорение Бидинга составило 82,6 g, этот рекорд не побит до сих пор (речь идет о контролируемых ситуациях).

В июле 1977 года в Нортгемптоншире (Англия) гоночный автомобиль Дэвида Пэрли был смят при наезде на препятствие — его скорость со 174 км/ч снизилась до нуля всего за 66 см пути. Ускорение, которое он испытал, было почти смертельно — 179,8 g, но Пэрли выжил, хотя получил 29 переломов и 3 вывиха, а его сердце останавливалось 6 раз.

\* Платформа, которая движется по рельсам испытательного трека с помощью ракетных двигателей. *Прим. ред.*

### 1.12 • ЛОБОВЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

Вы ведете автомобиль в тоннеле с односторонним движением и вдруг видите, что какой-то автомобиль едет вам навстречу. Что вы должны сделать, чтобы облегчить последствия надвигающейся аварии? Должны ли вы ускориться, замедлиться, остановиться или поехать назад?

Лобовые столкновения — самые страшные из всех автомобильных аварий. Удивительный факт: собранная статистика, касающаяся лобовых столкновений, говорит о том, что риск (вероятность) летального исхода для водителя меньше, если в машине кроме водителя находится и пассажир. Но почему?

**ОТВЕТ** • Лучший выход — остановиться и, если возможно, поехать назад. Полная кинетическая энергия или импульсы машин перед столкновением определяют тяжесть соударения. Если вы не погасите свою скорость, приближаясь ко второй машине, обе величины будут большими, и удар будет жестким.

В американском футболе, в котором игроки выступают в серьезной защитной амуниции, все не так. Там игрок одной команды может специально ускориться, когда бежит навстречу игроку другой команды. Но вся разница с автомобилями в том, что футболист как раз хочет, чтобы удар был сильнее, а правильно развернув корпус, он к тому же может направить его на уязвимые места соперника или сделать так, чтобы тот потерял равновесие и упал.

Вероятность фатального исхода зависит от изменения скорости в процессе соударения: большое изменение скорости означает, что на вас во время удара действовала большая сила, вызвавшая огромное ускорение. Например, если ваша машина имеет маленькую массу, а другая машина — большую, скорость вашей машины может измениться настолько, что она в результате будет отброшена назад. Дополнительная масса в вашей машине, будь то пассажир или даже мешок с песком в багажнике, может снизить изменение скорости, а следовательно, и риск фатального исхода. Вот численный пример: предположим, массы вашей и встречной машины одинаковы. И ваши с водителем встречной машины массы тоже равны. В этом случае риск фатального исхода для вас уменьшится на 9%, если рядом с вами будет сидеть пассажир весом 80 кг.

### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

#### 1.13 • ПРЕДСТАВЛЕНИЕ С УЧАСТИЕМ ЛОКОМОТИВОВ

Это произошло 15 сентября 1896 года в американском городе Уэйко. Уильям Краш — сотрудник компании «Миссури — Канзас — Техас Рэйлродс» — придумал беспроектную идею для шоу. На противоположных концах участка железнодорожных путей длиной 6,4 км он разместил два старых локомотива. Один был покрашен в красный цвет, другой — в зеленый. Идея состояла в том, чтобы столкнуть локомотивы друг с другом на полной скорости.

Известно, что публика любит смотреть на катастрофы, и 50 000 зрителей заплатили за право насладиться зрелищем крушения. После того как топки были заправлены топливом, а дроссельные заслонки открыты и зафиксированы, локомотивы двинулись навстречу друг другу. В момент встречи их относительная скорость составляла 145 км/ч.

Оказаться рядом со столкнувшимися локомотивами, чья кинетическая энергия трансформировалась в кинетическую энергию разлетевшихся обломков, — все равно что побывать на месте взрыва средней мощности. В результате несколько зрителей было убито разлетевшимися обломками, сотни ранены. Но остальные зевачи, вероятно, посчитали, что не зря потратили деньги.

#### 1.14 • УДАР СЗАДИ И ТРАВМА ШЕЙНЫХ ПОЗВОНКОВ

Когда в задний бампер машины въезжает едущая следом машина, сидящий в передней машине нередко получает травму шеи. Инженеры и медики-исследователи долго пытались объяснить этот феномен. В 1970-е годы они наконец пришли к заключению, что травма возникает из-за того, что голова сидящего в передней машине, находящаяся над спинкой кресла, держится назад при рывке машины вперед. Это получило название хлыстовой травмы. Шея сильно растягивается при резком разгибании, а затем сильно сжимается при последующем резком сгибании головы. В результате этих исследований у автомобильных кресел появились подголовники, но водители продолжали получать травмы шеи при ударах сзади. Из-за чего все-таки происходят эти травмы?

**ОТВЕТ** • Причиной хлыстовой травмы является то, что голова пассажира и его тело резко перемещаются относительно друг друга. Такое воздействие на шейный отдел позвоночника повреждает его, причем опасно перемещение в любую сторону.

### 1.15 • ПОВОРОТЫ НА ГОНОЧНОМ АВТОМОБИЛЕ

Скоростные гонки часто выигрываются благодаря правильным действиям пилота на поворотах, когда скорость уменьшается. Рассмотрим поворот на 90° на плоском треке «Формулы-1». Очевидно, что оптимальный способ прохождения поворота зависит от характеристик систем управления автомобилем, опыта и мастерства гонщика и качества трассы. Но стоит ли гонщику в принципе совершать поворот по круговой траектории? Такой выбор обычно предполагает, что время, затраченное на поворот, будет минимальным, но почему иногда этот выбор не является оптимальным? Почему пилоты, привыкшие к плоским трекам «Формулы-1», испытывают трудности в гонке «Индианаполис-500», где трасса на виражах наклонена? В частности, почему болид там заносит, когда он входит в поворот?

**ОТВЕТ** • Пилот-новичок совершает поворот по круговой траектории. Опытный гонщик вначале слегка поворачивает руль и при этом тормозит, затем поворачивает более резко, а потом едет по траектории с меньшей кривизной и при этом ускоряется. Поворот тогда занимает больше времени, но позволяет выйти на прямолинейный участок трассы на большей скорости, чем у пилота-новичка. Большая скорость на прямолинейном участке с лихвой компенсирует потерю времени на повороте.

Такая тактика имеет еще одно преимущество. Если поворот проходится слишком быстро, сила, приложенная к шинам, превысит предельную силу трения между шинами и покрытием, колеса начнут проскальзывать и машина потеряет управление. Чтобы не терялось сцепление с поверхностью трека, опытный гонщик сначала тормозит, а потом резко поворачивает. А так как остальная часть поворота — плавная, водитель может ускориться и при этом не потерять сцепление с дорогой.

Чутье опытного пилота «Формулы-1» подсказывает ему, как действовать на плоских поворотах. Но ощущения на наклонных виражах совсем иные, и гонщики «Формулы-1», вероятно, слишком поздно входят в поворот.

### 1.16 • ДОРОЖКИ ДЛЯ СПРИНТА

Почему обычно одну и ту же дистанцию на прямолинейных дорожках бегуны преодолевают быстрее, чем на искривленных? Если треки плоские и овальные, почему бегун на внешней дорожке имеет преимущество перед бегуном на внутренней дорожке, даже если дистанции на обеих дорожках одинаковы? Почему скорость на таких дорожках зависит от формы овала?

**ОТВЕТ** • Входя в поворот, бегун замедляется, выходя из него — опять разгоняется до своей скорости на прямолинейном участке. Для того чтобы поворот стал возможен, должна возникнуть центростремительная сила, направленная к центру поворота. В данном случае центростремительная сила возникает за счет сил трения между подошвами обуви бегуна и дорожкой. В результате действия этой направленной к центру поворота силы, приложенной к подошвам обуви, тело бегуна стремится отклониться наружу, его как бы откидывает по направлению от центра поворота. И для восстановления равновесия бегун замедляется, чтобы уменьшить действующие силы, и наклоняется внутрь поворота, чтобы противодействовать силам, стремящимся отклонить его наружу. Чем круче поворот, тем больше бегун должен замедлиться и наклониться внутрь. Поэтому тот, кто бежит по внешней дорожке (дорожке с меньшей кривизной), вообще говоря, имеет преимущество перед тем, кто бежит по внутренней дорожке (которая имеет большую кривизну).

Когда трек плоский и овальный, время пробега по всей дорожке во многом определяется временем прохождения поворотов. В принципе, на овальных треках большого радиуса развиваются большие скорости, чем на овальных треках малого радиуса, поскольку кривизна изогнутых участков на треках большого радиуса меньше, чем на треках малого радиуса. Лучший вариант (если это, конечно, не прямолинейный трек) — окружность. У нее кривизна наименьшая.

### 1.17 • ИЛЛЮЗИЯ ЗАДИРАНИЯ НОСА САМОЛЕТА ПРИ ВЗЛЕТЕ

Реактивный самолет, взлетая с палубы авианосца, приводится в движение мощными двигателями, при этом он выталкивается вперед с помощью катапульты, установленной на палубе. Результирующее огромное ускорение позволяет самолету достичь скорости отрыва на коротком расстоянии, равном длине палубы. Однако это же высокое ускорение вызывает у пилота



желание резко опустить нос самолета вниз, когда самолет отрывается от палубы. Пилоты натренировались не обращать внимания на это желание, но иногда самолет после взлета врежется прямо в океан. В чем причина этого эффекта?

**ОТВЕТ** • Ощущение вертикальности у человека зависит от визуальных ориентиров и вестибулярного аппарата, расположенного во внутреннем ухе. Рецепторами этого аппарата являются волосковые клетки с выступающими ресничками, которые погружены в студенистую жидкость. Когда вы держите голову прямо, жидкость находится в покое и волоски клеток располагаются вертикально вдоль направления действующей на вас силы тяжести; система посылает в мозг сигнал о том, что вы держите голову вертикально. Когда вы откидываете голову назад, жидкость смещается, изгибая волоски, и рецепторы посылают в мозг сигнал о том, что голова

отклонилась от вертикали. Аналогично, при горизонтальном ускорении положение волосков в жидкости изменяется, и рецепторы сообщают, что вы движетесь вперед. В этом случае сигналы, поступающие в мозг от рецепторов, оказываются теми же, что и при отклонении головы назад, что не соответствует действительности. Однако ошибочные сигналы игнорируются мозгом, если визуальные подсказки говорят, что никакого наклона нет. То же самое происходит, например, когда вы разгоняетесь в автомобиле. У пилота, резко разгоняющего самолет ночью на палубе авианосца, почти нет визуальных ориентиров. Поэтому у него возникает очень убедительная иллюзия, что наклон реален. В результате пилоту кажется, что самолет отрывается от палубы с высоко задранным носом. Без специальной тренировки он будет стараться выровнять самолет, опуская его нос резко вниз, и направит самолет в океан.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 1.18 • РЕЙС 143 «ЭЙР КАНАДА»

Двадцать третьего июля 1983 года рейс 143 компании «Эйр Канада» готовили к длительному перелету из Монреаля в Эдмонтон, и экипаж запросил у наземных служб информацию о том, сколько топлива заправлено в баки. Пилотам было известно, что для полета на борту должно быть 22 300 кг топлива. Они знали эту цифру в килограммах, поскольку Канада недавно перешла на метрическую систему мер (до этого вес топлива измерялся в фунтах). Но на земле могли измерять количество топлива только в литрах. Техники сообщили: заправлено 7682 л. Чтобы понять, сколько топлива на борту и сколько еще не хватает, пилоты попросили назвать коэффициент, позволяющий пересчитать литры топлива в килограммы. Им было сказано, что этот коэффициент равен 1,77. Его-то они и использовали, посчитав, что 1 л топлива весит 1,77 кг. Получилось, что заправлено 13 597 кг топлива и для дозаправки необходимо еще 4917 л.

К сожалению, заправщики ошиблись: по старой привычке, возникшей еще до перехода на метрическую систему, они сообщили коэффициент, переводящий литры горючего в фунты, а не в килограммы (1 литр весит 1,77 фунта). Фактически на борту топлива было всего 6172 кг, и требовалось добавить еще 20 075 л. Следовательно, когда рейс 143 вылетел из Монреаля, на его борту было всего 45% топлива, необходимого для перелета.

По пути в Эдмонтон на высоте 7,9 км топливо кончилось, и самолет начал падать. Хотя тяги вообще не было, пилоты ухитрились перевести самолет в режим планирования и начать спуск. Ближайший действующий аэропорт был слишком далеко, и добраться до него планируя было невозможно, поэтому они направили самолет на старый заброшенный военный аэродром.

К несчастью, взлетная полоса этого аэродрома была переделана в трассу для автогонок и поперек трассы был установлен стальной разделительный барьер. К счастью, когда самолет ударился о взлетную полосу, переднее шасси отлетело, а нос самолета свалился на взлетную полосу. Маневр, называемый «скольжение на крыло», затормозил самолет, так что он остановился совсем близко от стального барьера, из-за которого за ним наблюдали ошеломленные гонщики и болельщики. Все находившиеся на борту благополучно покинули самолет. Вывод: если не указаны единицы измерения, любые цифры остаются просто цифрами, которые ничего не значат.

### 1.19 • СТРАХ И УЖАС В ПАРКЕ АТТРАКЦИОНОВ

Почему, катаясь на американских горках, мы испытываем страх? Конечно, это связано с высотой аттракциона, скоростью и иллюзией падения, но ведь те же ощущения можно испытать и в скоростном наружном лифте со стеклянными стенками. Однако никто не выстраивается в очередь и не платит за возможность прокатиться на таком лифте.

А что сказать об аттракционах, при катании на которых вас швыряет из стороны в сторону? Почему на таких аттракционах хочется во что-нибудь вцепиться, а порой даже закричать?

Американские горки строят для того, чтобы создавать у нас иллюзию опасности (это-то и привлекает к ним публику), но инженеры сделали все возможное, чтобы они были абсолютно безопасны. Несмотря на это, каждый год среди миллионов посетителей находится несколько бедолаг, для которых подобное развлечение заканчивается визитом к врачу. Это недомогание так и называют — *мигрень американских горок*. Его симптомы — головокружение и головная боль — могут проявиться не сразу, а через несколько дней. Они настолько сильны, что требуется медицинская помощь. В чем же причина появления мигрени американских горок?

**ОТВЕТ •** Одни аттракционы щекочут нервы благодаря высоте, скорости или большому ускорению (на американских горках оно иногда достигает 4 g), а другие — благодаря быстрому вращению, при котором возникает центробежная (направленная вовне) сила. Но обычно самые пугающие аттракционы — это те, где вы вдруг попадаете под действие быстро и неожиданно меняющихся сил. Если на вас действуют постоянная сила и постоянное ускорение, вам кажется, что все под контролем. Подсознательное ощущение опасности возникает, когда неожиданно меняется величина или направление силы. Элемент неожиданности провоцирует на подсознательном уровне экзистенциальное ощущение игры со смертью.

**Обычные американские горки.** Дух захватывает и от высоты, и от больших скоростей, когда с грохотом мчишься по старым, ходящим ходуном деревянным американским горкам. Когда быстро проскакиваешь нижнюю изогнутую секцию, кажется, что центробежная сила инерции вдавликает тебя в сиденье; когда попадаешь на верхний сильно изогнутый участок, кажется, что тебя с силой от сиденья отрывает. Когда пролетаешь через вершину первой и самой высокой горки,

кажется, что падаешь. Если к тому же сидеть в первом вагончике и почти не видеть перед собой рельсов, возникает полная иллюзия падения. Однако, по-моему, еще страшнее сидеть в самом конце поезда. Когда приближаешься к вершине холма, а большинство вагончиков уже начали спуск вниз, в спину тебя толкает сила, нарастающая сначала медленно, а затем все быстрее (она увеличивается по экспоненте), но как только ты достигаешь вершины холма, сила мгновенно исчезает. Кажется, что чья-то злая воля толкает тебя к краю пропасти, а затем сбрасывает вниз.

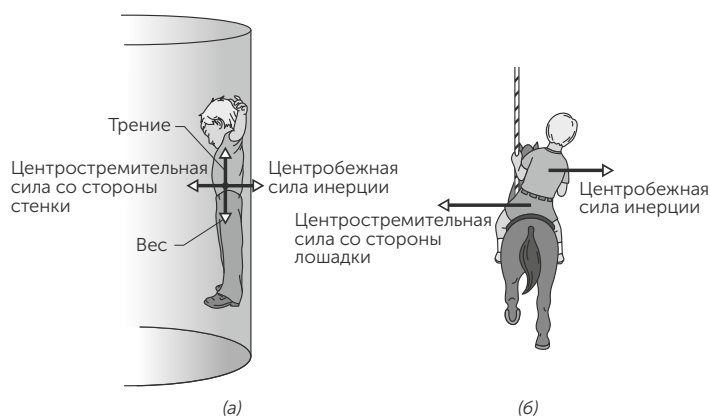
**Американские горки «Дикая мышь».** Вагончики по рельсам движутся поодиночке. Каждая кабинка закреплена на оси над снабженной колесами рамой, скользящей по рельсам; ось расположена у вагончика сзади. На крутом повороте рама послушно поворачивает по рельсам, но сам вагончик продолжает двигаться прямо и только потом поворачивает. В такие моменты возникает иллюзия, что вагончик слетел с рельсов.

**Современные американские горки.** Вертикальные петли и винтовые участки создают ощущение, что центробежная сила быстро меняет величину и направление, а ты сам переворачиваешься вверх ногами. Все это вселяет ужас. Когда, замедляясь, поднимаешься по вертикальной петле, центробежная сила должна уменьшиться. Чтобы этого не случилось, кривизна трека резко увеличивается. Еще страшнее, если сидишь спиной к направлению движения и не можешь знать заранее, что предстоит изменение силы, скорости или ускорения. Или если мчишься в темноте — тогда тоже заранее не известно, что ждет в следующий момент.

**Вращающийся барабан.** Стоя около внутренней стенки большого вращающегося цилиндра, чувствуешь себя как бы придавленным к ней мощной центробежной силой (рис. 1.4а). Такая сила может изменить представление о том, где низ, и создать иллюзию, что тело отклоняется назад. Если эта сила достаточно велика, можно вообще убрать, а удерживать от падения будет сила трения между спиной и стенкой. Хотя ощущение, что сила направлена наружу, весьма правдоподобно, на самом деле удерживает от падения сила, направленная внутрь: стенка толкает тебя по направлению к центру, чтобы ты продолжал движение по кругу. Поскольку ты не соскальзываешь вниз по стенке, сила трения должна быть направлена вверх и равняться твоему весу.

**Чертовое колесо, карусель и вращающиеся качели.** На таких аттракционах ощущения от воздействия центробежной силы не столь острые. Когда кабинка,

вращаясь, проходит через самую высокую точку чертова колеса, кажется, что эта сила поднимает тебя вверх. В самой низкой точке круга она как бы вдавликает тебя в сиденье. На каруселях кажется, что центробежная сила сейчас сбросит тебя (рис. 1.4б). Это ощущение сильнее, если твоя лошадка «скачет» вблизи края карусели: она движется по кругу быстрее лошадки, находящейся ближе к центру. Когда катаешься на цепочных качелях, вращающиеся вокруг центрального столба цепи отклоняются от вертикали, как если бы центробежная сила выталкивала тебя наружу. На самом деле на всех трех аттракционах центробежной силы нет. Наоборот, есть центростремительная сила (она действует со стороны сиденья на чертовом колесе, со стороны лошадки на карусели или цепей на качелях). Она-то и делает вращение возможным.



**Рис. 1.4 / Задача 1.19.** Силы, действующие на человека на аттракционах: а) во вращающемся барабане и б) на карусели.

**Аттракционы с вращающимися рычагами.** Ты сидишь в кабине, прикрепленной к наружному концу рычага, который вращается на шарнире вокруг конца другого рычага, расположенного ближе к центру. Если рычаги вращаются на шарнирах в одном направлении, ты ощущаешь наибольшую центробежную силу и движешься с максимальной скоростью, проходя через самую удаленную от центра точку. Когда рычаги вращаются в разные стороны, скорость в самой удаленной точке наименьшая (поскольку вращения встречные), но действующая в этой точке сила меняется максимально быстро, поскольку там твоя кабинка проезжает самый искривленный участок траектории.

**Башня свободного падения.** Ты сидишь в кабине на высоте примерно 40 м, в какой-то момент кабину

внезапно отпускают и отправляют практически в свободное падение. Возникает ощущение невесомости, поскольку и ты, и сиденье под тобой падаете с одной и той же скоростью и уже нет ощущения, что сиденье тебя удерживает. Некоторым любителям аттракционов такие ощущения доставляют удовольствие.

Мигрень американских горок может возникнуть на любом аттракционе, где человек испытывает большое и быстро меняющееся по направлению ускорение. Из-за большого ускорения в головном мозге возникает напряжение, а резкая смена направления ускорения приводит к смещению мозга относительно черепа, из-за чего может возникнуть сотрясение мозга и повреждение кровеносных сосудов в мозговых оболочках.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 1.20 • ЦИРКОВЫЕ ТРЮКИ «ЧЕРТОВА ПЕТЛЯ»

Современные парки развлечений изобилуют аттракционами, на которых испытываешь острые ощущения, но те меркнут по сравнению с некоторыми велосипедными цирковыми трюками, которые выполнялись в начале XX века. Поскольку один цирк старался перещеголять другой, разрабатывались и исполнялись рискованные трюки, и если исполнителям удавалось избежать травм, то трюки повторялись по несколько раз. Один из самых ранних трюков был продемонстрирован в 1901 году в цирке Адама Форпо и братьев Селлз. Акробат, известный под именем Старр, съехал по наклоненной под углом  $52^\circ$  дорожке с высоты 18 м. Может, угол и не очень впечатляет, но дорожка состояла из трех секций раздвижных лестниц, так что ехать пришлось по очень неровной поверхности.

В следующем году в Нью-Йорке в спорткомплексе «Мэдисон-сквер-гарден» та же цирковая труппа продемонстрировала еще один трюк на велосипеде — в исполнении акробата, выступавшего под именем Дьябло. Он съезжал на велосипеде по укрепленной на потолке дорожке, начало которой находилось чуть ниже люстр, потом проезжал по внутренней стороне петли диаметром 11 м и затем останавливался с помощью страховочной сетки. Все это время поблизости стояла машина скорой помощи. В 1904 году тот же цирк представил еще один трюк под названием «Великолепный Портос». Дорожка была той же, но верхняя часть петли отсутствовала,



то есть Портосу надо было пролететь по воздуху 15 м вниз головой, а потом приземлиться на вторую часть петли.

Но, пожалуй, самый смелый велосипедный трюк был показан в 1905 году, когда цирк Барнума и Бейли выступал в «Мэдисон-сквер-гарден». Номер начался с того, что перед зрителями предстали Уго Анчилотти, застывший на велосипеде высоко на одной дорожке, и его брат Фердинанд, сидевший на велосипеде еще выше на второй дорожке, расположенной напротив первой (рис. 1.5). По сигналу братья помчались вниз.

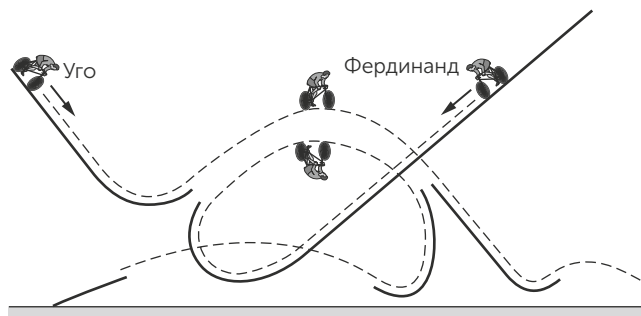


Рис. 1.5 / Задача 1.20. Велосипедный трюк братьев Уго и Фердинанда Анчилотти.

Когда Уго проскочил резко изогнутый нижний конец своей дорожки, он оторвался от нее и пролетел 14 м, после чего приземлился на другую часть дорожки, а затем повторил трюк, пролетев через разрыв во второй петле 9 м. В это же время Фердинанд, проехав по нижней части петли, взлетел, пролетел вниз головой по криволинейной траектории и опустился на вторую часть своей дорожки. В самый захватывающий момент представления Фердинанд летел головой вниз всего метром ниже Уго, который совершал свой полет в разрыве первой петли. Этот трюк был действительно очень опасен. Когда его попытались повторить в вечернем шоу, во время пролета разрыва в петле Фердинанд неудачно упал, и шоу, естественно, было отменено.

Позже в цирковых трюках стали заменять велосипеды на автомобили — частично из-за того, что автомобили в то время были новинкой. Один или двое акробатов мчались в авто вниз по дорожке, переворачивались в воздухе один или два раза, а потом приземлялись на вторую дорожку. Но и к этим видам цирковых трюков к 1912 году интерес ослаб — вероятно, потому, что зрители привыкли к ним и перестали чувствовать страх. Физика, лежащая в основе трюков, опять окуталась флером театральности только в более поздние времена, когда Эвел Книвел, его сын Робби Книвел и другие каскадеры начали съезжать на мотоциклах с трамплинов и перепрыгивать через автомобили и фуры.

## 1.21 • КАК ПОЙМАТЬ ВЫСОКИЙ МЯЧ В БЕЙСБОЛЕ?\*

Как игрок догадывается, где он должен находиться, чтобы поймать флай (высокий мяч), выпущенный в аутфилд (внешнюю часть поля)? Аутфилдер\*\* может

\*Несколько задач этого раздела касаются бейсбола — игры, чрезвычайно популярной в США и почти неизвестной у нас. Мы приведем здесь лишь те сведения о бейсболе, которые могут потребоваться при разборе задач. Бейсбольная площадка имеет форму квадрата со стороной 27,4 м. В каждом углу квадрата расположены базы, одна из которых называется домом. Подающий (питчер) находится в центре поля. Он бросает мяч игроку команды соперника — бьющему (хиттеру, или бэттеру), который в этот момент стоит в «доме». Этот игрок должен отбить брошенный ему мяч за пределы поля и успеть за время полета мяча добежать вдоль границы поля до следующей базы. В игре используются обтянутый кожей пробковый или каучуковый мяч весом около 148 г и диаметром около 7 см и деревянная или алюминиевая бита длиной около 107 см. Прим. пер.

\*\* Аутфилдер — игрок, находящийся во внешнем поле и принимающий мяч в перчатку. Прим. пер.

быстро прибежать в нужную точку и дожидаться мяча там. Или он может прикинуть скорость, которая требуется для того, чтобы прибежать в эту точку одновременно с мячом, и бежать туда с этой скоростью. Безусловно, сориентироваться игроку помогает его игровой опыт. Но может ли он усмотреть в полете мяча какие-нибудь подсказки, облегчающие ему принятие решения?

Роберт Вайншток из колледжа Оберлин, говоря о мастерстве аутфилдера, вспоминает, как однажды Бейб Рут поймал высокий мяч от Джимми Фокса из клуба «Филадельфия Атлетикс». Рут ожидал длинного высокого мяча от Фокса в глубине левого поля, но Фокс ударил мяч косо, и мяч получился высокий, но короткий. Как только звук удара достиг уха Рута, он подбежал точно к нужному месту на поле, подождал там и поймал мяч в перчатку.

**ОТВЕТ •** Хотя аутфилдер пользуется разными подсказками, чтобы поймать флай, главными, по-видимому, являются два угла. Один из них — вертикальный угол (угол

возвышения над горизонтом), под которым игрок видит мяч, летящий в сторону внешнего поля (рис. 1.6а). Если игрок уже на правильном месте, где он наверняка поймает мяч, он увидит, что в полете этот угол будет увеличиваться, но с уменьшающейся скоростью (вначале он возрастает быстрее, а потом медленнее). Если игрок находится слишком близко (и должен отбежать назад), этот угол увеличивается все быстрее. Если игрок находится слишком далеко (и должен пробежать вперед), вертикальный угол сначала увеличивается, а потом начинает уменьшаться. Игрок по опыту знает, что нужно перемещаться по полю до тех пор, пока не станет видно, что в конечной фазе полета мяча вертикальный угол возрастает и скорость этого возрастания уменьшается как надо.

Другой важный угол помогает выбрать правильную позицию для приема мяча, когда мяч летит слева или справа от игрока. В этом случае мяч летит в сторону внешнего поля под углом  $\theta$  в горизонтальной плоскости между направлением на место удара и направлением на мяч (рис. 1.6б). Игрок должен бежать так, чтобы этот угол возрастал с постоянной скоростью. Тогда игрок сможет бежать к месту, где он поймает мяч,

с более-менее постоянной скоростью, и ему в последний момент не придется совершать рывок.

Все эти приемы отрабатываются на тренировках, хотя на самом деле такая тактика естественна — ведь собаки, пытающиеся поймать брошенную хозяином игрушку, поступают так же (что подтверждают многочисленные видео, снятые на камеру, прикрепленную к ошейнику).

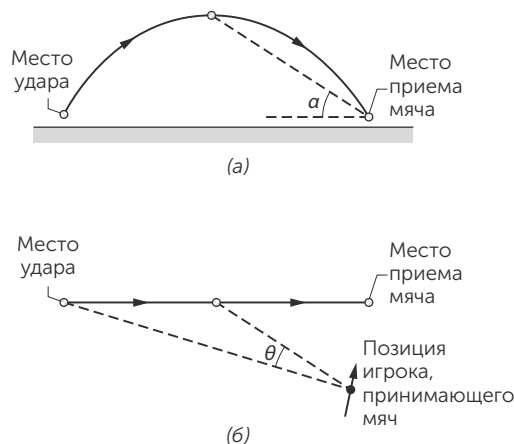


Рис. 1.6 / Задача 1.21. а) Траектория высокого мяча, вид сбоку. б) Траектория мяча, вид сверху.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 1.22 • МЯЧИ, СБРОШЕННЫЕ С ВЫСОТЫ

В 1938 году два кетчера\* из профессионального бейсбольного клуба «Кливленд Индианс» — Фрэнки Питлак и Хэнк Хелф — готовились установить мировой рекорд, поймав бейсбольный мяч, брошенный с самой большой высоты. Они заняли свои позиции на улице возле башни кливлендского вокзала. Третий бейсболист — Кен Келтнер — собирался бросать мячи с крыши этой башни высотой около 213 м. Предыдущий рекорд, установленный в 1908 году двумя кетчерами из другой команды, составлял 169 м. Тогда игроки поймали бейсбольные мячи, брошенные с монумента Вашингтона, находящегося в центре американской столицы.

У Келтнера не было возможности видеть товарищей по команде, ожидавших внизу, так что он бросал мячи вслепую. Питлак и Хелф были одеты в стальные шлемы, чтобы избежать травмы от удара мяча, летящего со скоростью 225 км/ч. Хелф поймал первый мяч и с довольной усмешкой сказал, что все как обычно — ничего особенного. Но Питлак следующие пять мячей пропустил. Один из мячей, упав, подскочил до уровня 13-го этажа и после третьего отскока был пойман сержантом полиции. Шестой мяч Питлак все-таки поймал и тем самым разделил рекорд с Хелфом.

В следующем году Джо Спринц из «Сан-Франциско Бейсбол Клуб» попытался поймать бейсбольный мяч, сброшенный из дирижабля с высоты 244 м (в некоторых сообщениях утверждалось, что дирижабль висел гораздо выше). С пятой попытки мяч попал в перчатку Спринца, но удар отбросил руку в перчатке с мячом к лицу, сломав смельчаку челюсть в 12 местах и выбив 5 зубов. Спортсмен потерял сознание и выпустил мяч.

Еще более курьезной была предпринятая в 1916 году попытка поймать бейсбольный мяч, сброшенный с небольшого аэроплана. Уилберт Робинсон — менеджер и бывший кетчер клуба «Бруклин Доджерс» — организовал полет тренера клуба Фрэнка Келли на аэроплане, чтобы тот бросил ему бейсбольный мяч с высоты 122 м. Но Келли, не предупредив Робинсона, заменил мяч на красный грейпфрут. Кожура плода при ударе лопнула, Робинсона залило брызнувшим соком, и он завопил: «У меня открытый перелом! Я истекаю кровью!»

\* Кетчер — игрок, который ловит мяч, поданный питчером. Прим. пер.

### 1.23 • УДАРЫ В БЕЙСБОЛЕ

Если бьющий игрок в бейсболе — правша, то почему он держит биту так, что правая рука у него выше левой, и поворачивается к питчеру левым боком? Сколько времени требуется бейсбольному мячу, чтобы долететь до пластины «дома»? Сколько времени нужно игроку, чтобы выполнить замах? Насколько допустимо ошибиться в замахе, чтобы все-таки попасть битой по мячу?

Некоторые успешные хиттеры, выбивающие хоум-раны\*, предпочитают пользоваться тяжелыми битами, утверждая, что лишний вес при ударе приводит к увеличению дальности полета мяча. А другие, наоборот, выбирают легкие или средние по весу биты, причем приводят те же доводы. Иногда при использовании деревянных бит игроки нелегально вставляют в середину прослойку из пробки, чтобы облегчить ее. Кто из них прав относительно веса биты? Должен ли игрок тренироваться со стандартной битой или с битой намного легче или тяжелее той, что будет использоваться в игровом матче?

В какое место биты должен попасть мяч, чтобы отлететь с наибольшей скоростью? Почему при соударении с мячом бита иногда обжигает руку и пытается выскочить из нее?

Питчеры так боялись легендарного Бейба Рута, что иногда бросали ему вместо быстрых медленные мячи, считая, что, если мяч с малой скоростью попал на биту, он и отскочит с малой скоростью, а следовательно, полетит не так далеко. Правильно ли они рассуждали?

**ОТВЕТ •** Если человек правша, во всех задачах, которые требуют точности, например при письме, он использует правую руку. Замах битой — одна из таких задач, поскольку для того, чтобы точно ударить по мячу, нужно безошибочно замахнуться битой. Когда игрок замахивается, он толкает биту правой рукой и подтягивает ее левой рукой. Левая рука делает большую часть работы, а правая — в основном направляет. Управлять движением биты легче, если правая рука находится выше, а притягивать биту легче, если левая рука ниже. В обычной позиции, когда игрок стоит левым боком к питчеру, при ударе он может повернуться навстречу мячу, при этом правая, контролирующая, рука будет

находиться позади биты — так она сможет лучше направлять движение биты.

Даже медленному мячу нужно меньше секунды, чтобы долететь до «дома», а быстрый может долететь и за 0,4 с. (С рекордной скоростью в 161 км/ч отбил мяч Нолан Райан, выступавший за клуб «Калифорния Энджелс». Это случилось 20 августа 1974 года.) В действительности у отбивающего игрока меньше 0,4 с на замах, поскольку ему нужно оценить бросок питчера и мысленно представить себе траекторию мяча, пролетающего через площадку дома. У профессиональных игроков на это уходит примерно 0,28 с, а некоторые особо одаренные бейсболисты умудряются потратить на это всего 0,23 с. Если игрок способен сделать быстрый замах, у него есть больше времени на изучение траектории мяча, до того как этот замах сделать.

Чтобы выбить мяч за пределы поля, нужно управлять битой с точностью до нескольких миллиметров. Если опустить биту чуть ниже, мяч взмлет вверх. Если поднять чуть выше, чем нужно, он далеко не пролетит и упадет на землю. Кроме того, движение биты во время замаха должно быть выверенным по времени с точностью до миллисекунд. Задачу еще усложняет и то, что решение принимается вслепую — мяч при приближении к бите невидим, и проследить его траекторию в последней стадии движения невозможно. Это просто чудо, что некоторые игроки отбивают мячи с неизменным успехом.

Эксперименты показали, что скорость отбитого тяжелой битой мяча больше, если ее вес не превышает 990–1120 г. Средняя по весу бита (около 905 г) лучше более тяжелой по крайней мере по трем причинам. Две из них очевидны для всех игроков: не слишком тяжелой битой легче замахиваться и легче манипулировать. Обе причины связаны с тем, что у таких бит меньший *момент инерции*, то есть более компактное распределение массы относительно центра (или центров), вокруг которых бита вращается во время замаха. Третья причина связана с передачей энергии при столкновении мяча с битой. В принципе, переход энергии от одного тела к другому при соударении тем эффективнее, чем ближе их массы (веса) друг к другу.

Тогда почему некоторые бьющие игроки все же предпочитают играть тяжелой битой? Их выбор, возможно, связан с тем, что тяжелые биты имеют большую длину. Легкая бита короче, и поэтому игроку нужно стоять близко к пластине «дома». Если мяч

\* Хоумран — удар бьющего, при котором он сам и игроки, находящиеся на базах, успевают совершить полный круг по базам и попасть в «дом». *Прим. пер.*

пролетает в ближней части *страйк-зоны*<sup>\*</sup>, игроку, возможно, придется отбивать его той частью биты, которая находится ближе к рукам. В такой ситуации шансы на хороший удар невелики. Чтобы избежать этого, игроки могут выбрать более тяжелую и, соответственно, более длинную биту. Тогда бьющий может стоять дальше от пластины, и удар придется на лучшую часть биты.

Экспериментально доказано, что бейсболист, до самой игры тренировавшийся не с той битой, которую потом использовал в матче, замахивается с *меньшей* скоростью. И неважно, тренировался ли он с более тяжелой, с более легкой или просто с утяжеленной битой, на конец которой надето свинцовое кольцо. По-видимому, причина в том, что, когда игрок какое-то время использует одну и ту же биту, в его голове записывается определенная программа (последовательность включения мышц) по замаху биты. Если бита на тренировках сильно отличается от биты на игре, уже сложившаяся программа не вполне соответствует реальным условиям, и замах игровой битой получается слабее.

Силы, действие которых ощущает бьющий игрок во время соударения биты с мячом, зависят от того, в какой части биты произошло это соударение. Обычно при ударе ручку отбрасывает назад и поворачивает, но если мяч попадает в точку, являющуюся лучшим местом удара и называемую *центром перкуссии* (COP, center of percussion), этого не случается. Если удар приходится на зону между центром масс и центром перкуссии, ручка дергается по направлению полета мяча, а если за центром перкуссии — ручка дергается в противоположную сторону (к питчеру).

Есть еще одно заветное место на бите, и оно связано с колебаниями, которые могут возбудиться в бите от удара и обжечь кожу на руках игрока. В большинстве случаев возбуждаются два вида колебаний. Первые — простейшие (их называют *фундаментальными*), когда дальний от рук конец биты колеблется с наибольшей амплитудой. Вероятнее всего, игрок и не заметит этих колебаний, поскольку их частота мала.

Колебания второго вида (их называют первым обертоном) вполне ощутимы и могут даже слегка поранить руки. В этом случае свободный конец биты колеблется сильно, но имеется точка, расположенная ближе к рукам и называемая *узлом*, которая вообще

не колеблется. Узел тоже является лучшей точкой удара, поскольку, если мяч ударяется в это место, первый обертон не возбуждается и, соответственно, руки не чувствуют колебаний биты.

Игрок может найти положение узла на бите, зажав один ее конец пальцами так, чтобы она свободно висела, и постукивая по ней сбоку другой рукой. Когда удар приходится на узел, колебания не возникают, а если стукнуть в другие точки, особенно ближе к центру, колебания будут не только ощутимы, но и слышны.

Чтобы придать мячу наибольшую скорость, нужно, чтобы он попал на определенный участок биты, расположенный между лучшими точками удара и центром масс. Но точное расположение этого участка зависит от начальной скорости мяча и соотношения масс биты и мяча. Чем быстрее летит мяч или чем легче бита, тем ближе к рукам должно находиться место соударения.

Представляю, как радовался Бейб Рут, увидев медленно летящий мяч. Чтобы послать мяч за пределы поля, нужно в первую очередь контролировать движение биты во время замаха и точно оценить, в каком месте мяч пролетит через пластину «дома». Медленный мяч предоставлял Руту достаточно времени для того, чтобы рассчитать и положение биты при замахе, и момент, когда надо сделать замах.

#### 1.24 • РАЗРЕШЕННЫЕ ПЕРЕДАЧИ В РЕГБИ

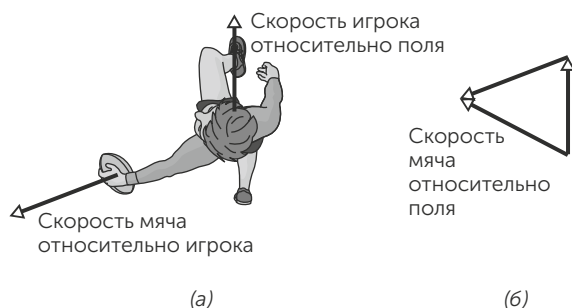
При игре в регби игрок может передавать мяч любому товарищу по команде, но только не вперед. Если игрок с мячом бежит по направлению к воротам соперника, в каком направлении можно бросать мяч? Может ли он бросить мяч назад, или все равно эта передача будет считаться запрещенным броском вперед?

**ОТВЕТ** • Вся проблема в скорости самого игрока. Когда он бросает мяч назад, относительно поля мяч может все равно лететь вперед. Например, на рис. 1.7а скорость мяча относительно игрока направлена назад-влево, но, поскольку она складывается со скоростью его движения вперед, результирующая скорость будет иметь составляющую, направленную вперед (рис. 1.7б).

Если судья, наблюдая за броском, тоже бежит, он видит движение мяча под другим углом из-за своей собственной скорости. Только неподвижные наблюдатели могут правильно определить, был ли мяч разрешенным, то есть его скорость не имела составляющей, направленной вперед.

<sup>\*</sup> Интервал высот от колен до груди бьющего игрока.  
Прим. пер.





**Рис. 1.7 / Задача 1.24.** Передача в регби налево может казаться игроку разрешенной (а), а в действительности иметь составляющую, направленную вперед (б).

### 1.25 • ЖОНГЛИРОВАНИЕ

На сегодняшний день мировой рекорд по количеству колец при жонглировании равен 11, при жонглировании другими предметами — меньше. Конечно, для жонглирования нужны хорошее взаимодействие между руками и глазами, а также длительная тренировка в подбрасывании и ловле предметов. Вопрос: есть ли какой-либо объективный фактор, ограничивающий число предметов при жонглировании?

**ОТВЕТ •** Ограничения накладывает, конечно, гравитация. Если вы хотите жонглировать большим количеством предметов, нужно подбрасывать их выше, чтобы успевать все их бросать и ловить. Но много времени на этом не выиграть. Даже если вы подбросите предмет на вдвое большую высоту, выигрыш во времени составит всего 40%. Да к тому же предмету нужно будет придать на 40% большую скорость, а это означает, что, скорее всего, бросок получится неточным.

### 1.26 • ПРЫЖКИ С ШЕСТОМ

Фибергласовые шесты совершили революцию в прыжках с шестом. Сначала шесты были бамбуковыми. В 1950-е годы их стали делать из стали и алюминия. Но с появлением в 1960-х годах фибергласовых шестов высота рекордных прыжков подскочила с 4,8 до 5,8 м. Некоторые специалисты считают, что со временем рекорды должны значительно превысить шестиметровую отметку. Почему фибергласовые шесты сыграли такую важную роль в увеличении высоты прыжка?

**ОТВЕТ •** Фибергласовые шесты более гибкие, чем применявшиеся ранее бамбуковые, стальные и алюминиевые. Гибкость шеста дает прыгуну два преимущества. Во-первых, кинетическая энергия, развитая атлетом

при беге к перекладине, эффективнее преобразуется в потенциальную энергию упругой деформации шеста, запасаемую им при изгибе. (Эта энергия накапливается именно в процессе бега и не является мускульной энергией бегуна, затрачиваемой на сгибание шеста.)

Возможно, этот фактор покажется вам очевидным. Менее очевидно то, что из-за гибкости шеста происходит задержка в превращении энергии упругой деформации шеста обратно в кинетическую энергию прыгающего спортсмена. Эта задержка позволяет атлету изменить положение тела таким образом, чтобы энергия от выпрямляющегося шеста пошла на движение вверх, а не вперед.

Для выполнения хорошего прыжка прыгун должен не только как следует разбежаться на пути к перекладине, чтобы накопить побольше кинетической энергии, но также соразмерять шаги с тем, чтобы точно попасть концом шеста в *ящик для упора*. Когда шест встает в упор, атлет прыгает вперед, чтобы сохранить движение вперед и правильно согнуть шест. Когда шест сгибается, в нем накапливается часть начальной кинетической энергии атлета. Во время сгибания шеста и последующего его разгибания атлет подбирает ноги и отклоняется назад, чтобы перевести тело в вертикальное положение. Чтобы шест при разгибании отдал обратно как можно больше энергии и чтобы легче было переориентировать тело, атлет толкает его вперед рукой, находящейся выше, и тянет назад рукой, находящейся ниже. Если все делается вовремя, разгибающийся шест отдает обратно запасенную в нем энергию и посылает атлета вверх.

### 1.27 • АТЛАТЛЬ И ЖАБИЙ ЯЗЫК

Некоторые древние народы, например ацтеки, использовали приспособление для метания копья или дротика, которое представляло собой деревянную палку с упором на одном конце и рукояткой на другом (рис. 1.8). Скорость выпущенного с его помощью копья была столь высокой, что копье пролетало около 100 м и даже после этого пробивало латы испанских конкистадоров, пришедших завоевывать землю ацтеков. Почему это устройство под названием *атлатль* придает копью большую скорость, чем если бросать его просто рукой? Почему часто к этому устройству привязывали камень?

Как удастся жабе выстреливать языком с молниеносной скоростью, чтобы поймать пролетающую мимо муху?

**ОТВЕТ** • Если бросать копьё рукой, кинетическая энергия копья обеспечивается тем, что рука при замахе производит работу по толканию копья вперед на некоторое расстояние. Атлатль увеличивает расстояние, на котором разгоняется копьё, и тем самым увеличивает передаваемую ему кинетическую энергию. В чем смысл подвешивать камень к атлатлю — не очень понятно. На самом деле экспериментально установлено, что добавочная масса приводит даже к небольшому уменьшению скорости копья при запуске.

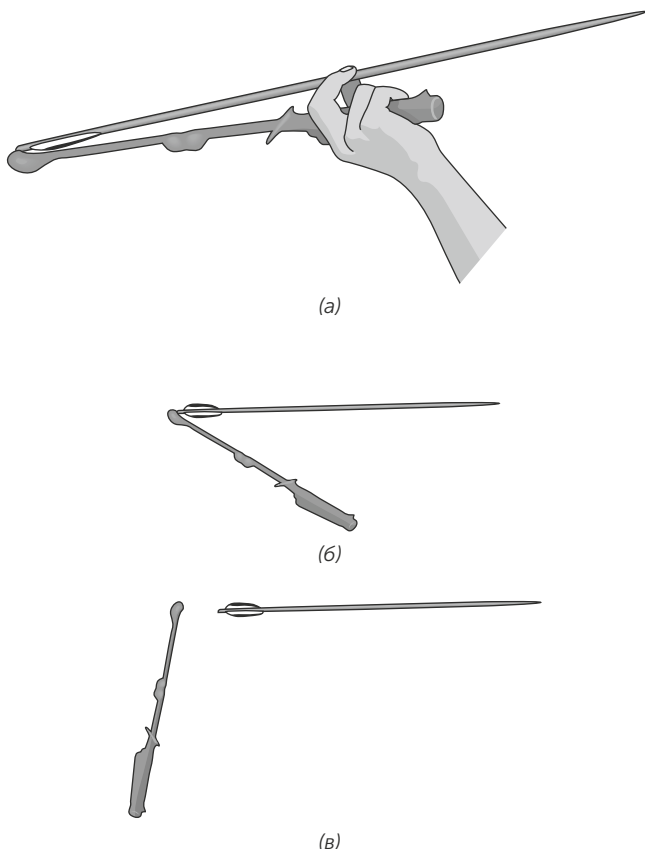


Рис. 1.8 / Задача 1.27. Запуск копья с помощью атлатля.

Что касается жабы, то она охотится, используя тот же принцип атлатля. Заметив жертву, жаба быстро выбрасывает язык в ее сторону, но при этом мягкий кончик языка остается загнутым назад и лежит на основной части языка (в этот момент твердеющей). Когда язык приближается к цели, кончик резко разворачивается вперед и прихлопывает добычу. С помощью этого приема — разворачивания кончика в том же направлении, в котором движется весь язык, — жаба добавляет кинетическую энергию разворачивающегося кончика языка к кинетической энергии поступательного

движения языка как целого. Эта дополнительная энергия увеличивает шансы на то, что жертва прилипнет к кончику языка, даже если она сидит на листке, который прогибается под ударом. Как только жертва прилипла к языку, жаба быстро втягивает язык обратно в рот.

### 1.28 • ПРАЩА

Искусные метатели пращи могут запустить камень весом 25 г со скоростью 100 км/ч и поразить цель на расстоянии 200 м и даже больше. Как можно разогнать камень до такой большой скорости или, точнее, как можно придать ему такой большой импульс? В битвах прошлых столетий это оружие оказывалось более эффективным, чем стрелы. Действительно, даже если вражеский воин облачен в кожаный доспех, удар камня может привести к смертельному повреждению внутренних органов, а стрела просто отскочит, не причинив вреда. Если на воине вообще нет доспехов, камень легко может войти внутрь тела. Кроме того, праща — более точное оружие, чем лук, и запускает камень дальше. По этой причине пращники часто стояли позади лучников, которым нужно было находиться ближе к цели, чтобы поразить ее.

Самая известная битва с применением пращи — это библейский поединок Давида с Голиафом. Сорок дней великан-филистимлянин призывал израильтян сразиться с ним, но никто не решался принять бой, пока не появился Давид. Он набрал пять гладких камней из ручья и приблизился к Голиафу на безопасное расстояние — так, чтобы меч Голиафа не мог достать его. Давид вынул из сумки первый камень, вложил его в пращу и запустил в великана. Импульс камня был так велик, что камень, попав в лоб Голиафа, пробил тому череп.

**ОТВЕТ** • Камень (это может быть обычный камень, комок глины или кусок металла) помещается в ложе из гибкого материала, например кожи, к которому прикреплены два ремешка. Один ремешок наматывают на безымянный палец, на другом завязывается узел, который захватывают ладонью.

Оттянув ложе с камнем левой рукой и держа пращу в правой, обе руки поднимают над головой. Затем левую руку отпускают, а правой резко начинают раскручивать пращу в вертикальной плоскости назад-вниз-вперед-вверх. Это движение выполняется в основном кистью, а не всей рукой. Камень прокручивается по окружности три или четыре раза, запасая кинетическую энергию. Как раз когда камень проходит нижнюю

точку последнего круга, ремешок с узелком отпускают, камень освобождается и летит в цель. Можно раскручивать пращу также и в горизонтальной плоскости, но в этом случае дальность полета будет меньше.

Преимущество этого вида оружия в том, что работа, которая затем превращается в кинетическую энергию камня, проводится над камнем в течение большего времени и на большем расстоянии, чем если его просто бросить рукой, как в бейсболе. Радиус окружности тоже играет роль, поскольку чем он больше, тем выше скорость и, соответственно, дальность полета выпущенного из пращи камня. В прежние времена воины имели при себе несколько пращей с ремешками разной длины, чтобы бросать камни на разные расстояния.

### 1.29 • ТОМАГАВКИ

Некоторые искусные метатели томагавка с неизменным успехом вонзают острие томагавка в цель. Возможно, они добились этого путем длительных тренировок. Но все ли зависит исключительно от мастерства или есть в технике метания какая-либо научная методика? И можно ли, руководствуясь этой методикой, поразить цель с первого раза?

**ОТВЕТ •** Чтобы запустить томагавк, нужно зажать его в руке так, чтобы его ручка была направлена перпендикулярно руке, занести согнутую в локте руку с томагавком за голову, сделать взмах вперед, разогнув руку в локте, и отпустить оружие. Скорость брошенного томагавка должна быть направлена вперед и лежать в горизонтальной плоскости. В полете томагавк будет вращаться вокруг центра масс (расположенного в тяжелой головке).

До тех пор пока вы не отработаете технику метания, при каждом броске вы будете получать разную начальную скорость полета и скорость вращения. Это значит, что только удача поможет вам поразить цель, находящуюся на определенном расстоянии. Но забавная особенность томагавка состоит в том, что отношение начальной скорости к скорости вращения не зависит от того, насколько быстро вы выбрасываете вперед руку с томагавком. Это означает, что независимо от того, как вы бросите его, он в любом случае повернется и окажется в нужном положении, чтобы поразить цель на определенном расстоянии от вас. Так что все, что вы должны сделать, чтобы поразить эту цель, — встать на нужном расстоянии от цели (его можно определить методом проб и ошибок или рассчитать)

и бросить томагавк. Возможно, вы и сумеете попасть в цель с первой попытки.

Конечно, в те времена, когда томагавки использовались в качестве боевого оружия, а у индейцев не было возможности изменить расстояние до цели, они меняли положение головки томагавка относительно своей руки. Расстояние от головки томагавка до руки определяет, на каком расстоянии томагавк окажется в боевом положении и сможет поразить врага. Чтобы в условиях боя суметь «настроить» томагавк на любое расстояние до цели, нужно, чтобы ручка томагавка была длинной. И действительно, первые томагавки имели длинные ручки.

### 1.30 • БОЛАС

Болас (он же боло) состоит из трех тяжелых шаров, к которым привязаны прочные веревки одинаковой длины, соединенные в одной общей точке (рис. 1.9а). Это орудие родом из Южной Америки, и пользуются им так: берут один из шаров в руку, поднимают его над головой и крутят кистью руки, раскручивая тем самым остальные два шара в горизонтальной плоскости. Как только шары достаточно раскрутятся, болас отпускают в цель. В полете скорость вращения боласа возрастает, и когда он достигает цели, веревка наматывается на жертву, а следом в нее с силой врезаются и шары. Почему в полете скорость вращения шаров увеличивается?

**ОТВЕТ •** Пусть длина веревок от точки крепления каждого из шаров до точки соединения всех веревок будет равна  $L$ . Поскольку один из шаров (первый) находится в руке, два других шара (вместе) начинают вращение вокруг первого шара, и расстояние между ними и первым шаром равно  $2L$ . Но когда болас бросают, шары отправляются в свободный полет, конфигурация двух вращающихся шаров вокруг одного становится неустойчивой и вскоре заменяется на равновесную. Это значит, что три шара расположатся симметрично относительно точки соединения веревок на расстоянии  $L$  от нее и начнут вращаться вокруг этой точки (рис. 1.9б). При этом изменении конфигурации меняется распределение масс шаров относительно их общего центра масс. А поскольку болас летит свободно, его угловой момент не может измениться, и, следовательно, при уменьшении расстояния шаров до центра масс должна увеличиться скорость вращения. Это похоже на вращение фигуриста на льду, прижимающего руки

к телу, чтобы изменить распределение масс и тем самым увеличить скорость вращения.

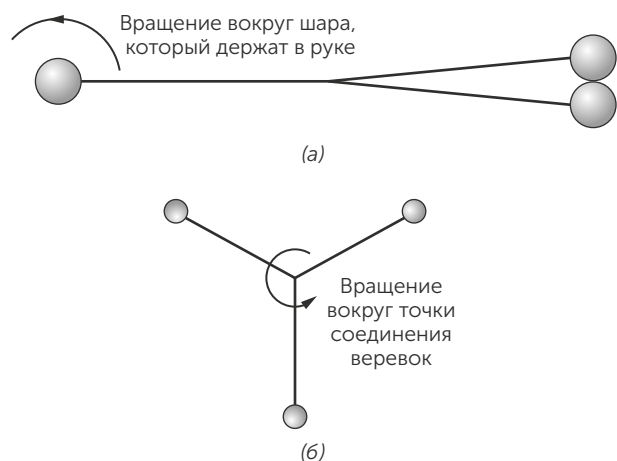


Рис. 1.9 / Задача 1.30. Положение шаров боласа а) при запуске и б) в свободном полете.

### 1.31 • ОСАДНЫЕ ОРУДИЯ

Представьте, что на дворе Средневековье и вам необходимо взять неприступную крепость. Слишком близко к крепости подходить опасно, поскольку на стенах засели лучники. Как можно атаковать крепость издалека?

**ОТВЕТ •** Для атаки на укрепленные стены существовало два вида осадных орудий: катапульта и фрондибола. Катапульта — это по сути мощный лук, который выстреливал стрелой или камнем (до 25 кг). В отличие от лука, в основе ее конструкции лежит рычаг, вставленный в канат из пучков воловьих жил или конского волоса. Такие машины называются торсионными, в них используется упругая энергия, запасаящаяся при скручивании канатов за счет растяжения жил. Катапульта гораздо больше обычного лука, ее стрела могла быть длиной до 2 м, а тетива оттягивалась назад при помощи лебедки. И все же разрушения, вызванные стрелой, были намного меньше, чем ущерб от 25-килограммового камня, поскольку и энергия, и импульс стрелы невелики.

Фрондибола (требушет) обладала гораздо большей разрушительной силой, чем катапульта: некоторые машины могли метать камни весом около 1300 кг. Иногда с ее помощью запускали дохлых лошадей и даже человеческие трупы — это делалось, например, когда у одной из враждующих сторон начиналась эпидемия и заразу хотели распространить в лагере противника. Во времена не столь давние фрондиболы использовались для забавы — например, чтобы забросить куда-то пианино или даже небольшой автомобиль.

На рис. 1.10 схематически изображена фрондибола. Метательный снаряд положен в веревочное гнездо, прикрепленное к длинному концу А деревянного бруса. К противоположному короткому концу бруса В прикладывают большую силу, в результате чего рычаг поворачивается вокруг оси, метательное гнездо резко взмывает вверх и перебрасывается через орудие. В тот момент, когда гнездо с зарядом пролетает над орудием, веревки, которыми оно привязано к брусу, слетают с крючка и снаряд отправляется в свободный полет. Таким образом, энергию снаряд получает в результате работы, совершенной силой, приложенной к концу бруса В. Эффективность работы устройства зависела от длин плеч рычага и длины веревок, на которых крепилось метательное гнездо.

Эта сила могла быть мускульной силой — когда несколько человек одновременно тянули за конец бруса В. Но чтобы запускать тяжелые снаряды на большие расстояния, на конец бруса В подвешивали тяжелый противовес, и тогда для запуска использовалась гравитационная сила, которая на него действовала. Когда противовес падал, то часть запасенной в нем энергии превращалась в кинетическую энергию снаряда. И кинетическая энергия, и импульс снаряда были очень велики, так что каменный снаряд мог пробить брешь в крепостной стене. После того как фрондиболы стали применять повсеместно, крепостные стены начали строить по-новому. Например, некоторые стены делали не вертикальными, а наклонными, и снаряд не столько ударялся в стены, сколько скользил по ним.

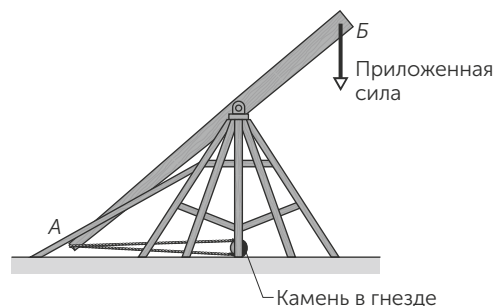


Рис. 1.10 / Задача 1.31. Фрондибола

### 1.32 • ЛЮДИ — ПУШЕЧНЫЕ ЯДРА

Цирковой трюк, в котором из пушки или чего-то подобного вылетает человек, появился в начале 1870-х годов. Тогда человек-ядро пролетал небольшое расстояние, и его ловил ассистент, висющий на трапеции. В 1922 году семейство Заккини возродило трюк, решив,



что каскадер сможет совершить более рискованный полет — с приземлением на сетке. Их первые пушки работали на пружинах, выталкивающих акробата, а в 1927 году для этой цели стали применять сжатый воздух.

Стремясь усилить зрелищность трюка, циркачи придумали отправлять акробата в полет через колесо обозрения. Началось все с одного колеса, но к 1939–1940-м годам был достигнут предел в три колеса, после которого начинался уже неоправданный риск. Тогда Эмануэль Заккини пролетел по горизонтали 70 м.

Выстрелы из пушки людьми, вероятно, один из наиболее рискованных трюков, поскольку, безусловно, существует шанс, что акробат промахнется и не попадет в сетку. Есть ли в этом трюке какие-то другие, менее очевидные опасности?

**ОТВЕТ •** Готовясь к выстрелу, акробат (или акробатка) вставляет ноги в «металлические штаны», приделанные к штоку внутри пушечного ствола. Штаны изготавливаются в точности по размеру ног и должны обеспечивать поддержку при резком начале движения штока вперед. Неявная опасность заключается в том, что для полета на большое расстояние в этот момент создается такое огромное ускорение, что акробат может на мгновение потерять сознание. Одна из целей тренировки акробата как раз состоит в том, чтобы сохранять сознание во время полета, поскольку приземление на сетке должно быть контролируемым. Если приземление окажется неконтролируемым, акробат при ударе о сетку и подбрасывании на ней легко может сломать руку, ногу или шею. По словам Заккини, начальная скорость акробата достигала 600 км/ч, но все-таки более правдоподобная цифра — 160 км/ч.

Другую, менее очевидную опасность для акробата представляет сопротивление воздуха во время полета. Сила сопротивления зависит от ориентации тела во время полета: она меньше, если тело ориентировано вдоль траектории полета, и больше, если тело ориентировано перпендикулярно траектории (что может произойти во время снижения). Маленькое сопротивление увеличивает дальность полета, большое — уменьшает. Поскольку положение акробата менялось от выстрела к выстрелу, нужно было примерно подсчитать (или предположить), как далеко полетит акробат, и натянуть достаточно широкую сеть, чтобы при всех возможных вариантах (и сопротивлении воздуха) акробат приземлился на нее.

### 1.33 • БРОСКИ МЯЧА В БАСКЕТБОЛЬНУЮ КОРЗИНУ

Для игры в баскетбол требуются и мастерство, и удача. А есть ли какой-нибудь способ увеличить вероятность попадания мяча в корзину при броске? Например, что лучше — послать мяч по высокой дуге или отправить его по плоской траектории? Когда мяч лучше подкрутить, а когда это нежелательно?

При *штрафном броске* (когда игрок бросает мяч без помех с расстояния чуть более 4 м от корзины) можно выполнить *бросок сверху* — примерно с высоты плеча. Или, наоборот, можно использовать *бросок снизу* («бросок из-под юбки») — примерно от пояса. Среди профессионалов в основном используется первый вариант, но легендарный Рик Бэрри установил рекорд по закидыванию штрафных мячей, используя технику броска снизу. Действительно ли существует техника, дающая лучшие шансы для попадания мяча в корзину?

**ОТВЕТ •** В любой позиции на поле существует широкий диапазон углов, под которыми можно бросить мяч, и он попадет в корзину, если, конечно, ему придать правильную скорость. Однако тот факт, что диаметр мяча меньше диаметра корзины, разрешает немного ошибиться в скорости бросания мяча. Если угол мал, разброс допустимых скоростей тоже мал, и нужно быть более точным. Кроме того, при таком ударе скорость бросания мяча должна быть весьма высока, то есть игрок должен бросать мяч с большой силой, а это трудно совместить с точностью удара. Наоборот, если бросать мяч под несколько большим углом, разброс в допустимых скоростях станет больше, а требуемые скорость и сила броска — меньше. Следовательно, у игрока выше шанс попасть в корзину. Однако для еще больших углов требуемые скорость и сила броска станут увеличиваться, что делает броски под большими углами менее желательными.

Новички обычно посылают мяч по слишком плоской траектории, а вот с опытом приходит умение бросать мяч в корзину по дуге. Чем выше выпущен мяч, тем меньше должна быть его скорость, и поэтому у высоких игроков есть преимущество. Преимущество, даваемое высотой, с которой брошен мяч, так велико, что некоторые игроки бросают мяч в прыжке, даже когда им не мешает игрок команды-соперника. Если применен удар с обратной подкруткой и мяч сначала попадает в баскетбольный щит за сеткой, вращение мяча может создать необходимое трение, которое позволит ему отскочить в корзину. Если мяч брошен не из центральной части поля, может помочь боковое подкручивание мяча.

Штрафной удар снизу имеет больше шансов на успех, чем сверху, но причины этого до сих пор неясны. Возможно, такой удар легче выполнить правильно, и поэтому шансы для мяча попасть в корзину возрастают. Но самое большое преимущество, видимо, в том, что при таком броске игрок может сильнее подкрутить мяч в обратном направлении, что позволяет скорректировать удар, если мяч попадает в баскетбольный щит.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 1.34 • РЕКОРДНЫЕ ШТРАФНЫЕ БРОСКИ

В 1977 году Тед Мартин установил мировой рекорд в серии бросков от штрафной линии — он забросил мяч в корзину 2036 раз подряд. В следующем году Фред Ньюмен установил необычный рекорд. Он забросил мяч в корзину 88 раз подряд с завязанными глазами. Несколькими годами позже Ньюмен в течение 24 часов сделал 13 116 бросков, уже с открытыми глазами, и из них 12 874 мячей попало в корзину.

### 1.35 • ЗАВИСАНИЕ В БАСКЕТБОЛЕ И БАЛЕТЕ

Иногда кажется, что некоторые искусные баскетболисты как бы повисают в воздухе во время прыжка и это дает им время перекинуть мяч с руки на руку, а затем послать его в корзину. И в балете профессиональные исполнители как будто парят над сценой во время прыжка, называемого *гранд жете* (*шпагат в воздухе*). Понятно, что гравитационное поле никому еще

не удавалось отключить, но тогда как объяснить иллюзию зависания в воздухе в этих двух случаях?

**ОТВЕТ** • И в баскетболе, и в балете зависание в воздухе игроков и балерин — иллюзия. В баскетболе она возникает прежде всего из-за быстроты действий игрока, способного выполнить множество манипуляций во время прыжка. В балете — из-за движения рук и ног балерины во время *гранд жете*: после того как ноги оторвались от пола, балерина поднимает руки вверх и вытягивает ноги в горизонтальном шпагате, в результате центр масс перемещается выше по телу (рис. 1.11). И хотя он, как ему и положено по законам гравитации, движется над сценой по параболе, из-за его перемещения внутри тела уменьшается высота, на которой окажутся голова и тело балерины в высшей точке прыжка, по сравнению с той, которая бы была, не двигай она руками и ногами. В результате этих движений голова и туловище балерины во время средней фазы прыжка перемещаются почти по горизонтальной траектории. Она и кажется зрителям необычной, поскольку из повседневного опыта они знают, что полет должен происходить по параболе, даже если само это слово им незнакомо.

Аналогично, и баскетболист может сделать так, чтобы во время прыжка голова двигалась почти по горизонтали, если подтянет ноги и вытянет руки с мячом. Но такая техника не особенно распространена. Игроки действительно поднимают руки с мячом вверх, когда выпрыгивают к корзине, но при этом они редко подтягивают ноги. И небольшое сглаживание траектории, описываемой головой, вряд ли обманет защитника

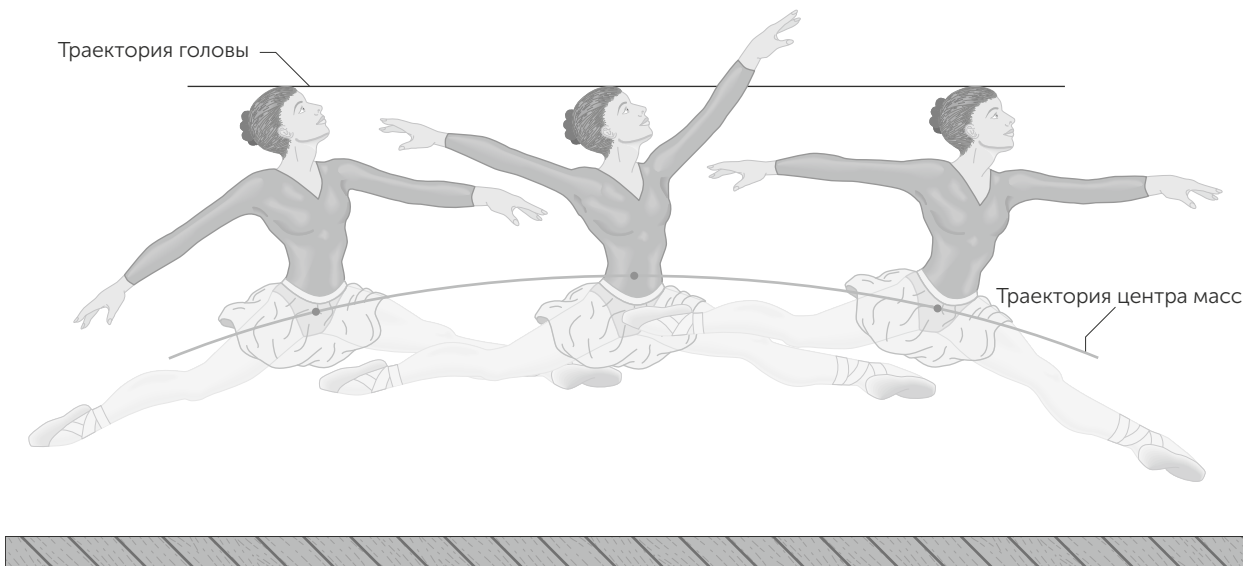


Рис. 1.11 / Задача 1.35. Траектория движения центра масс балерины во время *гранд жете*.

команды-соперника, выпрыгивающего рядом с игроком, забивающим мяч.

### 1.36 • СЕКРЕТЫ ИГРЫ В ГОЛЬФ

Как нужно замахнуться клюшкой для гольфа (выполнить свинг), чтобы удар по мячу при драйве\* получился наилучшим? Например, не стоит ли махнуть клюшкой вниз как можно сильнее, как будто вы хотите ударить противника в драке? Если же во время замаха вы в какой-то момент пожелаете увеличить или уменьшить усилие, с какой клюшкой это сделать легче — с упругой или с неупругой?

Почему патт\*\* с расстояния одного метра значительно труднее выполнить, чем патт с расстояния полуметра? Труднее ли выполнить 3,5-метровый патт, чем трехметровый? Почему мяч может катиться прямо к лунке, но так и не вкатиться в нее?

**ОТВЕТ** • Когда вы при свинге делаете мах вниз клюшкой, выполняя драйв, в начале замаха запястья согнуты под углом  $90^\circ$  по отношению к предплечьям. Если вы замахнетесь клюшкой как для удара по противнику, то автоматически разогнете запястья во время замаха. В действительности головка клюшки приобретет большую скорость в момент удара, если разгибать запястья не сразу, тем самым уменьшая вращательный момент, а на какой-то стадии замаха. Когда именно нужно разгибать запястья, подсказывает опыт. В тот момент, когда запястья разгибаются, кисть с зажатым в ней клюшкой вращается, в результате чего клюшка приобретает дополнительную скорость.

Многие игроки считают, что гибкость древка клюшки влияет на траекторию мяча, поскольку этим определяется угол, под которым головка клюшки бьет по мячу. В качестве доказательства приводится довод, что более гибкое древко во время свинга сначала отгибается назад, а потом выпрямляется, и клюшка ударяет по мячу с большей силой, чем клюшка с более жестким древком. В результате мяч получает большую энергию. Однако исследования показывают, что гибкость древка клюшки мало влияет на полет мяча: большая гибкость древка может уменьшить энергию, передаваемую мячу, поскольку соударение возбуждает колебания в клюшке.

\* Драйв — основной удар со стартовой площадки, цель которого — послать мяч специальной клюшкой-«драйвером» далеко и точно. *Прим. пер.*

\*\* Патт — катящий удар, выполняемый на грине — участке с самой короткой травой непосредственно вокруг лунки. *Прим. пер.*

Поэтому предпочтительнее пользоваться более жесткой клюшкой, которая ударяет по мячу под прямым углом, — она позволяет лучше контролировать удар.

Трудность попадания мячом в лунку при ударе патт зависит от углового размера лунки, под которым мяч ее «видит». Если отодвигать мяч дальше от лунки, сначала этот угол уменьшается быстро, а это значит, что забросить мяч в лунку становится все труднее. Но после того, как вы отойдете на расстояние примерно в метр, угол начинает убывать все медленнее, а это означает, что сложность попадания мячом в лунку с расстоянием возрастает тоже медленнее. Конечно, при таком упрощенном анализе из рассмотрения выпадают другие факторы, влияющие на длинный патт, — такие, например, как изменение свойств травы на пути к лунке.

Если мяч катится прямо к лунке, но скорость, с которой он подкатывается к ближней кромке лунки, выше некоторой критической, он не упадет туда. Он пересечет лунку, слегка провалившись в нее, но недостаточно, чтобы там остаться, и, ударившись о дальнюю стенку лунки, выкатится наружу.

### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

#### 1.37 • «ЗАНАВЕС СМЕРТИ» ПРИ ПАДЕНИИ МЕТЕОРИТА

Если метеорит не сгорает в атмосфере, а достигает земли, он образует кратер. При этом происходит выброс отраженной волной раздробленных и расплавленных пород. Эти обломки летят не по случайным траекториям. Самые быстролетящие камни вылетают под большими углами к земле. Если бы вы могли наблюдать это явление и стояли бы так, что выброшенные метеоритом камни летели на вас, то увидели бы, что они образуют тонкий выгнутый занавес (рис. 1.12). Обломки в верхней части занавеса вылетают с большей скоростью и под большими углами, чем камни, находящиеся в его нижней части. Медленные камешки падают на землю раньше, чем быстрые, так что по мере приближения к вам «занавеса» вы будете постоянно видеть и слышать, как они стучаются о землю.

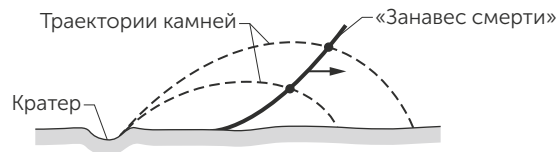


Рис. 1.12 / Задача 1.37. Камни, выброшенные из кратера, образованного метеоритом.

### 1.38 • ПРЫЖКИ В ДЛИНУ И ВЫСОТУ

Школьники, прыгая в высоту, обычно перелетают через перекладину «ножницами»: наклонив верхнюю часть туловища вперед, перекидывают через перекладину сначала одну ногу, а затем другую. Но более эффективный способ *взять планку* — прыгнуть «перекатом»: повернувшись боком и вытянув тело вдоль перекладины, нырнуть за нее головой и плечами.

Когда на Олимпийских играх 1968 года в Мехико Дик Фосбери выиграл соревнования по прыжкам в высоту, его прыжок показался диковинным. Такая техника в его честь стала называться *фосбери-фlop*, и сегодня она используется легкоатлетами во всем мире. Спортсмен бежит к перекладине ровными шагами, в последний момент поворачивается к ней спиной и как бы ложится на нее, прогибаясь в пояснице.

1. Какое преимущество дает этот способ? Почему нужно подбегать к перекладине ровными шагами? Ведь если бежать с ускорением, прыгуну сообщится больше энергии, и он прыгнет выше.

Одно из ошеломляющих событий в мире легкой атлетики произошло на тех же Олимпийских играх в Мехико. Днем 18 октября Боб Бимон готовился к первой из трех разрешенных попыток в прыжках в длину, измеря шагами дорожку от ямы к линии старта. Потом он развернулся, быстро разбежался, оттолкнулся от бруска для отталкивания и взлетел в воздух. Прыжок оказался таким гигантским, что специальное оптическое устройство не смогло зарегистрировать его длину. Пришлось использовать обычную рулетку. Один из судей крикнул Бимону, застывшему сбоку: «Фантастика, фантастика!» Длина прыжка была действительно фантастической — 8,90 м, она намного превысила предыдущий рекорд — 8,10 м (разница составила целых 80 см!). Бимону, безусловно, помог ветер в спину, который дул как раз с предельно допустимой регламентом скоростью — 2,0 м/с.

2. Помогло ли ему также то, что Мехико находится на большой высоте над уровнем моря и на маленькой долготе? Иными словами, сыграли свою роль в установлении этого удивительного рекорда плотность воздуха и сила земного притяжения?

Длина прыжка в длину засчитывается по следам от пяток прыгуна в момент приземления, при условии, что он не сел на песок. Если спортсмен коснулся песка ягодицами, длиной прыжка считается расстояние до ближайшего края следа от них. Таким образом, в прыжках в длину очень важно правильно приземлиться.

Когда атлет на последнем шаге отталкивается от бруска для отталкивания, его туловище располагает почти вертикально, при этом толчковая нога отставлена назад, а маховая вынесена вперед. При приземлении обе ноги должны оказаться вытянутыми вперед под таким углом, чтобы пятки оказались в песке максимально далеко, но при этом спортсмен не приземлился на ягодицы.

3. Каким образом прыгун во время полета может изменить положение тела, приобретенное при разбеге, на положение, необходимое для правильного приземления?

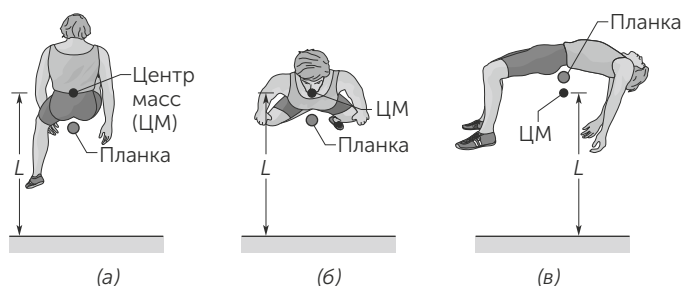
4. Почему на древнегреческих Олимпиадах во время прыжков в длину с места некоторые легкоатлеты прыгали, держа в руках хальтерес — гантели весом в несколько килограммов?

**ОТВЕТ •** 1. Высота, засчитываемая в соревнованиях по прыжкам в высоту, — это, естественно, высота планки, а не высота, на которой находится голова или иная часть тела прыгуна. Предположим, во время прыжка легкоатлет в состоянии забросить свой центр масс (ЦМ) на высоту  $L$ . Если атлет прыгает «ножницами», перебрасывая ноги через планку, то она должна находиться на высоте много меньшей  $L$ , поскольку спортсмен не должен коснуться ее никакой частью тела. Поэтому ее высота не очень велика (рис. 1.13а). При прыжке техникой «переката» тело располагается горизонтально, и когда атлет пролетает над планкой, та оказывается гораздо ближе к центру масс прыгуна. В этом случае может быть преодолена планка, установленная на большей высоте (рис. 1.13б). При прыжке «фосбери» (рис. 1.13в) тело атлета как бы обвивает планку, и в результате центр масс прыгуна оказывается вне туловища, и он может прыгнуть на большую высоту, чем при прыжке «перекатом». Изгиб тела при перелете через планку и поворот в последний момент, при котором прыжок совершается головой вперед, помогают выполнить этот высокий прыжок.

Легкоатлет подбегает к планке медленнее, чем, скажем, спринтер на дистанции, поскольку ключ к победе в его случае лежит в безошибочном исполнении прыжка, а значит, точный расклад движений по времени очень важен. В конце разбега прыгун выставляет толчковую ногу довольно далеко вперед по отношению к центру масс и сгибает ее, а туловище в этот момент поворачивается вокруг этой ноги. При этом некоторая часть кинетической энергии, развитой в беге, запасается в согнутой ноге. В следующий момент эта нога



отталкивается от земли, прыгун взлетает вверх, при этом часть запасенной энергии и дополнительная мускульная энергия атлета позволяют ему совершить высокий прыжок.



**Рис. 1.13 / Задача 1.38.** Разные стили прыжков в высоту:  
а) ножницы, б) перекат, в) фосбери.

2. Ветер и расположение стадиона лишь немного помогли Бимону прыгнуть далеко. Мехико расположен на высоте 2300 м над уровнем моря, и это намного выше, чем места проведения всех остальных Олимпиад. На большой высоте плотность воздуха меньше, а следовательно, сопротивление воздуха, замедляющее полет в прыжке, меньше, чем на уровне моря. Кроме того, на высоте ускорение свободного падения меньше, а следовательно, и притяжение к земле, мешающее прыгать, меньше. Это ускорение и притяжение еще уменьшаются из-за действующих на прыгуна центробежных сил, возникающих из-за вращения Земли. На малых широтах эти силы больше, поскольку там больше и линейная скорость на поверхности, возникающая из-за вращения Земли.

Однако все эти факторы лишь в очень малой степени влияют на длину прыжка. Тогда почему Бимон прыгнул так далеко? Во-первых, он быстро разбежался и сильно оттолкнулся от бруска для отталкивания. Большинство прыгунов в длину разбегаются довольно медленно из-за боязни заступить за брусок, поскольку в этом случае прыжок не засчитывается. Но они не хотят оттолкнуться и слишком далеко: тогда они во-первых, теряют возможность оттолкнуться от твердой опоры, а во-вторых, фиксируемая дальность их прыжка уменьшается (она всегда отсчитывается от бруска). Ширина бруска всего 20 см, и поэтому последний шаг нужно тщательно отмерить.

Бимон, который был известен множеством незначительных прыжков, решил, видимо, рискнуть в первой попытке и разбежался со спринтерской скоростью. Ему повезло, и на последнем шаге он не заступил

за брусок — в противном случае в следующих двух попытках он, вероятно, больше бы думал о том, как не заступить за брусок, и разбежался бы с меньшей скоростью.

Никто больше не прыгал так далеко, как Бимон, в течение следующих 23 лет. Но потом, на чемпионате мира по легкой атлетике 1991 года, Майк Пауэлл прыгнул на 8,95 м — на 5 см дальше Бимона. Сделал он это в Токио, расположенном на уровне моря, да и ветра особого не было — в спину ему дул легкий ветерок со скоростью 0,3 м/с. Пауэлл великолепно продемонстрировал, что высота над уровнем моря и ветер играют второстепенную роль в достижениях спортсменов.

3. Рассмотрим, как меняется положение тела прыгуна в длину в полете, и для этого будем считать, что он прыгает вправо от нас. В момент отталкивания от бруска сила, действующая на толчковую ногу со стороны бруска, приводит к закручиванию корпуса так, что туловище стремится двинуться вперед, а маховая нога — назад. Это закручивание еще усиливается, если маховую ногу вынести вперед, подготавливаясь к приземлению. Причина в том, что в полете на прыгуна не действуют никакие заметные внешние силы и угловой момент его тела должен оставаться постоянным. Поэтому, выдвигая вперед маховую ногу, спортсмен заставляет остальное тело повернуться назад.

Чтобы уменьшить это вращение и принять правильную позу для приземления, нужно, вытянув руки в стороны, покрутить ими по часовой стрелке. Кроме того, нужно продолжить перебирать ногами, как при беге: нога вытягивается или сгибается, а туловище при этих движениях либо отклоняется назад, либо вперед. (Ни одно из этих движений не сказывается на дальности прыжка, они только меняют расположение тела в пространстве.) Прыгуны-новички часто недостаточно вращают руками, или даже хуже — вращают одной или обеими руками в неправильном направлении. Туловище и ноги в этом случае оказываются не в лучшей позиции, и зафиксированный прыжок получится короче, поскольку следы от пяток окажутся ближе к бруску или перекроются следами от ягодиц.

4. Хальтерес, или гантели, которыми пользовались прыгуны античных Олимпиад, могут увеличить дальность прыжка. Легкоатлет в разбеге размахивает зажатymi в руке гантелями вперед-назад, затем в первой фазе прыжка взмахивает руками вперед, а готовясь к приземлению — назад. Если правильно пользоваться этими приспособлениями, можно увеличить

длину прыжка на 10–20 см. Этому есть две причины. Во-первых, в полете центр масс системы «прыгун — хальтерес» движется вперед, а при последнем взмахе рук назад хальтерес тоже сдвигается относительно общего центра масс назад, а следовательно, прыгун выдвинется относительно него вперед. А во-вторых, при толчке замах гантелями вперед увеличивает силу, направленную вниз на брусок со стороны ног атлета и, следовательно, силу, выталкивающую прыгуна в полет. (При отталкивании у атлета работают не только мышцы ног, но и мышцы плеч и рук.) Прыжок может стать еще длиннее, если атлет отшвырнет хальтерес назад во время последней фазы прыжка, фактически совершая рывок вперед. Общий центр масс системы «прыгун — хальтерес» остается в прежней точке, но прыгун теперь слегка улетит вперед по отношению к этой точке.

### 1.39 • МЕКСИКАНСКИЕ ПРЫГАЮЩИЕ БОБЫ

Если человек, сидя на одеяле, соберет в кулак все четыре угла одеяла и потянет их вверх, сможет ли он поднять себя? Ну конечно нет, хотя я знал одну девочку, которая изо всех сил пыталась так себя поднять. Как тогда умудряются подсакивать в воздух бобы?

**ОТВЕТ •** В бобах сидят маленькие червячки — личинки бабочек, которые подпрыгивают, ударяются о верхнюю часть боба, и боб от этого удара взлетает в воздух. Когда червячок начинает свой прыжок, отталкиваясь от внутренней поверхности боба, силой, которая создает его ускорение и скорость, является разность реакции опоры и притяжения Земли. Гравитация вообще постоянна, а в момент отталкивания реакция превосходит ее. Когда червячок внутри боба долетает до его верхней стенки и соударяется с ней, он тормозится. Тормозит его сила, действующая на него со стороны стенки, и с такой же силой он действует на стенку (третий закон Ньютона). Эта последняя сила может вызвать подпрыгивание боба, если она окажется больше его притяжения к Земле.

### 1.40 • КУВЫРКИ ЖУКОВ-ЩЕЛКУНОВ И АТАКИ РАКОВ-БОГОМОЛОВ

Если потрогать лежащего на спине жука-щелкуна, он подпрыгнет аж на 25 см, издав при этом довольно громкий щелчок. Во время полета он может перевернуться и приземлиться правильно — брюшком вниз. Для такого прыжка ему придется создать ускорение до 400 g

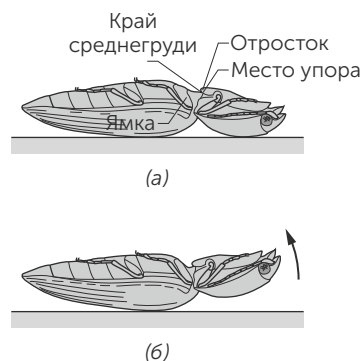
(то есть в 400 раз превышающее ускорение свободного падения) и развить мощность в 100 раз больше той, на которую способна любая из мышц жука. Как же удается жуку развить такую огромную мощность (раз он лежит на спине, это не может произойти за счет мышц его ножек)? Одну подсказку дает щелчок, а другую — то, что жук не может сразу повторить такой фокус (для этого должно пройти время).

Морской рак-богомол (*Odontodactylus scyllarus*) атакует свою жертву, быстро выбрасывая вперед одну из своих конечностей — вторую пару ногочелюстей. Но не сама конечность бьет наповал жертву, а возникающие при этом молниеносном движении пузырьки воздуха, которые при схлопывании создают разрушительную звуковую волну. Ускорение, развиваемое концом боевого органа рака-богомла, может достигать 10 000 g. Как у рака это получается?

**ОТВЕТ •** Прыжок жука напоминает действие мышеловки: и в том, и в другом случае срабатывает механизм, выстреливающий вверх. В нижней части переднегруди у жука имеется пальцевидный отросток, а на среднегруди — соответствующего размера ямка, куда он обычно вложен. Упав на спину, жук медленно сокращает мышцы на передней поверхности тела, выгибая переднегрудь назад. При этом отросток выходит из ямки и упирается концом в выступ среднегруди на краю ямки (рис. 1.14а). Затем, когда напряжение в мышцах нарастает, отросток срывается с упора, как сторожок мышеловки, и с громким щелчком падает в ямку. От этого резкого сдвига отростка переднюю часть тела насекомого подкидывает вверх, а задняя ударяется о поверхность, на которой жук лежит (рис. 1.14б). Толчок подбрасывает жука вверх, а возникшее в момент соскакивания отростка вращение приводит к тому, что в полете жук поворачивается вокруг своего центра масс. Он может перевернуться на 180° и приземлиться на брюшко.

Первоначальное медленное сокращение мышц позволяет жуку накопить энергию. Мгновенное высвобождение этой энергии обеспечивает такой мощный прыжок. Чтобы совершить следующий прыжок, энергию снова нужно накопить, а это требует времени. Подобный метод — накопление энергии и мгновенное ее высвобождение — используют многие виды животных, чтобы совершить быстрое движение, когда нужно либо добыть себе пищу, либо увернуться и самому не стать чьей-то добычей.

Похожий метод применяют и раки-богомолы. Их атакующая вторая пара ногочелюстей согнута и прижата к телу в седловидной выемке. В спокойном состоянии в мышцах выемки происходит медленное накопление энергии, подобно энергии сжатой пружины. Конечность удерживается на месте защелкой, которая отпускается, как только напряжение в мышцах выемки достигает максимума. В это мгновение от нее ногочелюстям передается огромная энергия, и они «выстреливают» в жертву. Пузырьки, о которых шла речь выше и схлопывание которых порождает относительно мощную звуковую волну, возникают из-за уменьшения давления за быстро движущимся в жидкости телом.



**Рис. 1.14 / Задача 1.40.** а) Жук-щелкун лежит на спине, отросток уперся в край среднегруды, мышцы напряжены. б) Отросток соскочил с упора и попал в ямку. Жука подбрасывает вверх.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 1.41 • РЕКОРДНЫЙ ВЕС ВЗЯТ

В тяжелой атлетике разного рода рекорды обновляются довольно часто. Однако самый большой вес, когда-либо поднятый человеком без помощи приспособлений, был взят в 1957 году американским тяжелоатлетом Полом Андерсоном. И этот рекорд не побит до сих пор. Атлет поднял груз *методом бэклифта* (спиной). Он встал, наклонившись вперед и согнув ноги в коленях. Перед ним стояла низкая скамейка, о которую он опирался руками и от которой мог оттолкнуться. Над ним стояла укрепленная и положенная на прочные стойки деревянная платформа — на ней лежали части автомобиля и сейф, наполненный свинцом. Андерсон плечами смог оторвать от опор груз весом 2845 кг!

Пожалуй, не менее впечатляет рекорд миссис Максвелл Роджерс из города Тампа, установленный в апреле 1960 года. Она увидела, что автомобиль, который ремонтировал ее сын, соскочил с домкрата, стоявшего под бампером, и придавил парня. Она бросилась к автомобилю, приподняла его и держала, пока сосед вытаскивал из-под машины ее сына. Автомобиль весил 1620 кг, из которых она подняла минимум четверть веса, правда, при этом повредила позвоночник. (Свидетельства такого рода периодически появляются в газетах. В момент стресса абсолютно нетренированный человек может поднять вес, который в обычном состоянии, скорее всего, поднять не смог бы.)

### 1.42 • СОУДАРЕНИЯ В ЦЕПОЧКЕ ШАРОВ И ИГРУШКА «МАЯТНИК НЬЮТОНА»

Если мяч ударяется о неподвижный мяч, при каких условиях второй мяч получит наибольшее количество энергии от первого? А получит ли он наибольшую скорость при тех же условиях? Как изменится ответ, если мяч ударяется в цепочку неподвижных мячей?

Предположим вначале, что движется больший мяч, а покоящийся мяч имеет меньшие размеры. Можно ли увеличить энергию, переданную меньшему мячу, если между этими двумя мячами будут находиться другие мячи? Если да, то какими должны быть массы этих мячей?

Допустим, мяч летит прямо в вашу голову. Если вы хотите смягчить удар, то есть уменьшить энергию,

переданную мячом голове, нужно ли вам выставить для защиты руку, чтобы получить удар по голове рукой, а не мячом?

Популярная игрушка — «маятник Ньютона» — состоит из нескольких касающихся друг друга подвешенных на нитках шариков, которые могут раскачиваться как маятники (рис. 1.15а). Шарiki сделаны из упругого материала, что означает, что лишь небольшая часть энергии шарика теряется при соударении с другими. Отведем крайний левый шарик назад и отпустим его. Он ударит следующий шарик. Почему после серии соударений отклонится только крайний шарик справа?

Перевесим шарики так, чтобы между ними было небольшое расстояние, и пошлем первый шарик ко второму под небольшим углом. Хотя первый удар

получится косым, по мере того как соударения распространятся по цепочке, нарушение строя шариков постепенно исчезнет. Но если увеличить расстояние между шариками и повторить опыт, нарушение строя будет с каждым ударом возрастать. Удары даже могут вообще прекратиться, если какой-нибудь шар получит совсем косой удар и при раскачке не попадет в следующий шар. Почему при косом ударе крайнего шара со временем, в зависимости от расстояния между шарами, либо произойдет восстановление порядка в строю шаров, либо строй будет разрушаться?

**ОТВЕТ** • Второй шар получает от первого максимальную энергию, когда его масса равна массе первого шара. Если оба шара идеально упругие, почти вся энергия при столкновении переходит ко второму шару, а значит, его скорость будет такой же, какой была до соударения у первого шара, а тот, следовательно, остановится.

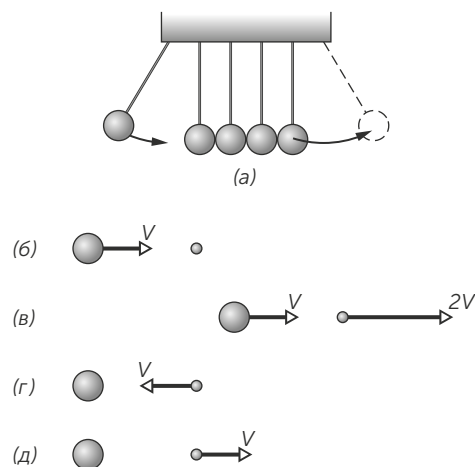
Второй шар приобретет максимальную скорость в том случае, когда его масса много меньше массы первого шара. Пусть  $V$  — скорость первого шара (рис. 1.15б). Если отношение масс очень велико и соударение абсолютно упругое, второй шар может приобрести скорость  $2V$  (рис. 1.15в). Это может показаться неправильным, но на секунду попробуем посмотреть на происходящее с точки зрения первого шара. Нам кажется, что второй шар движется на нас со скоростью  $V$  (рис. 1.15г), упруго отскакивает и улетает со скоростью  $V$  (рис. 1.15д). Теперь вернемся в нашу обычную систему отсчета. Второй шар улетает от первого с относительной скоростью  $V$ . А что делает первый шар? Поскольку второй шар имеет такую маленькую массу, соударение не сильно влияет на скорость первого шара. И она по-прежнему останется равной  $V$ . Таким образом, скорость второго шара должна быть равна  $V + V = 2V$ . Если происходит цепная реакция таких соударений, то скорость, сообщенная каждым столкновением, примерно удваивается по сравнению с предыдущим столкновением.

Если массы крайних шаров заданы и мы хотим передать максимальную энергию меньшему шару, нужно так выбрать массу каждого промежуточного шара, чтобы она была равна среднему геометрическому масс шаров, находящихся по разные стороны от него. (Среднее геометрическое двух масс — это корень квадратный из произведения этих масс.) При другом выборе масс промежуточных шаров тоже можно получить выигрыш в передаваемой энергии, но не такой большой.

Этот вывод применим и к удару мячом по голове. Если подставить руку на пути летящего мяча, это только увеличит передаваемую энергию, поскольку рука как раз имеет массу, среднюю между массами головы и мяча. И все же подставить руку стоит, поскольку она шире мяча и сила удара по голове распределится на большую площадь.

Теперь рассмотрим ситуацию с игрушкой из нескольких шариков. Фокусы с игрушкой с подвешенными рядышком шариками-маятниками обычно описывают, рассматривая импульс и кинетическую энергию шариков. Единственная возможность для этих величин остаться постоянными при серии соударений — чтобы последний шарик закончил процесс, получив всю первоначальную кинетическую энергию и импульс. Таким образом, в конце он движется один. Объяснение настолько просто, что сбивает с толку, ведь реальное движение промежуточных шариков может быть очень сложным.

В опыте, в котором первый шар ударяет второй шар под углом, важно отношение расстояния между шариками  $D$  к радиусу шарика  $R$ . Если  $D/R$  меньше 4, нарушение строя после серии соударений исчезает, поскольку точки соударения постепенно сдвигаются к плоскости, в которой расположены шары, и удары становятся все менее косыми. Если же  $D/R$  больше 4, нарушение строя будет нарастать, поскольку точки соударений будут сдвигаться по искривленной поверхности шара дальше от плоскости, в которой расположены шары.



**Рис. 1.15 / Задача 1.42.** а) Крайний слева шар отпущен, крайний справа отскакивает в сторону. б) До и в) после столкновения очень большого и очень маленького шаров. г) До и д) после столкновения с точки зрения большого шара.



### 1.43 • ПАДЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ МЯЧЕЙ

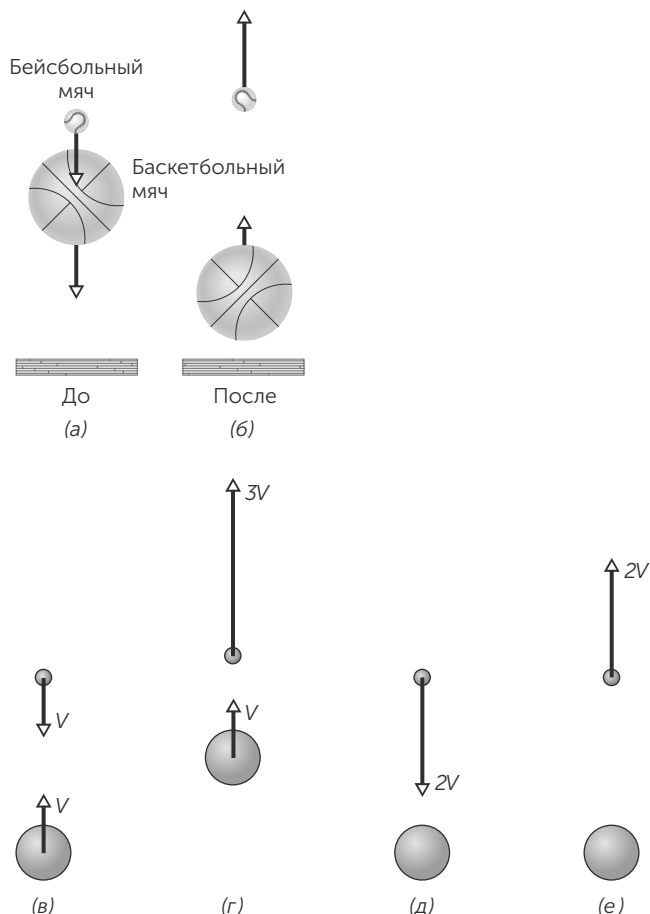
Допустим, мы роняем два мяча примерно с высоты метра, причем сверху располагается бейсбольный, а внизу — баскетбольный мяч (рис. 1.16а). Хотя при падении по отдельности с такой высоты ни один из мячей не отскочит от пола на заметную высоту, при падении пары мячей получается неожиданный результат. Баскетбольный мяч остается лежать неподвижно на полу, а бейсбольный подпрыгивает сильно, иногда даже к потолку (рис. 1.16б). При этом высота, на которую подпрыгнет бейсбольный мяч, всегда больше, чем сумма высот, на которые отскочили бы по отдельности бейсбольный и баскетбольный мячи. (Будьте осторожны. Если удар придется не по центру баскетбольного мяча, бейсбольный мяч может отлететь в сторону, а при такой скорости он может сильно ударить.) Если повторить опыт, но на бейсбольный мяч сверху положить еще один — маленький упругий мяч, тот взлетит как ракета и может подпрыгнуть даже выше, чем бейсбольный мяч, хотя и получит меньше энергии.

В теории, если мячи правильно подобраны, верхний мяч из пары брошенных может подпрыгнуть на высоту, в 9 раз большую, чем высота, с которой они были сброшены. С тремя мячами, опять же правильно подобранными и, конечно, при идеальных условиях, верхний мяч может подпрыгнуть на высоту, в 49 раз превышающую высоту, с которой они сброшены. Можно экспериментировать со множеством различных мячей, например с мячиками для пинг-понга, мячами-попрыгунчиками (суперупругие мячики) или теннисными мячами. Как нужно подбирать мячи в группе, чтобы верхний мяч подпрыгнул на большую высоту, и почему он прыгает так высоко?

**ОТВЕТ •** Когда падает группа из двух мячей, нижний отскакивает от пола, но сталкивается с верхним, который все еще продолжает падать. При соударении энергия передается от нижнего мяча к верхнему, и он приобретает скорость, направленную вверх. Если задаться целью передать максимальную энергию верхнему мячу, нужно, чтобы нижний мяч остановился. Если мячи упругие, наибольшее количество энергии передается, когда масса нижнего мяча в три-четыре раза больше массы верхнего. Примерно такое соотношение у баскетбольного и бейсбольного мячей.

Если же стремиться к тому, чтобы верхний мяч подпрыгнул как можно выше, его нужно выбирать как можно более легким по сравнению с нижним. Высота,

на которую подпрыгнет верхний мяч, пропорциональна квадрату скорости, полученной им при столкновении. Если масса верхнего мяча много меньше массы нижнего, верхний мяч получит большую скорость, и сможет подскочить на высоту, в 9 раз большую, чем высота, с которой он падал.



**Рис. 1.16 / Задача 1.43.** а) До и б) после того, как баскетбольный и бейсбольный мячи вместе брошены на твердый пол. в) До и г) после столкновения очень большого и очень маленького мячей. д) До и е) после столкновения с точки зрения большого мяча.

Чтобы понять результат, рассмотрим скорости мячей перед самым столкновением. Верхний мяч падает со скоростью  $V$ , а нижний летит вверх с такой же скоростью  $V$  (рис. 1.16в). Если соударение абсолютно упругое, верхний мяч приобретет скорость  $3V$  (рис. 1.16г). Это может показаться неверным, но представьте на мгновение, что вы — первый мяч, и посмотрите на ситуацию с его точки зрения: вы увидите, что верхний мяч приближается к вам со скоростью  $2V$  (рис. 1.16д), упруго отражается от вас и летит прочь со скоростью  $2V$  (рис. 1.16е).

А теперь вернитесь к своей собственной точке зрения. Верхний мяч летит прочь от нижнего с относительной скоростью  $2V$ . А что делает нижний мяч? Поскольку масса верхнего мяча мала, соударение сколько-нибудь существенно не изменит скорость тяжелого нижнего мяча, и она по-прежнему будет примерно равна  $V$ , так что скорость верхнего мяча будет равна  $V + 2V = 3V$ .

Если рассматривать падение группы мячей, нужно их расположить так, чтобы их массы убывали снизу вверх. Когда нижний мяч отскакивает от пола, он передает часть энергии второму мячу. Как только второй мяч полетит вверх, он ударит летящий вниз третий мяч и передаст часть своей энергии ему. Теперь третий мяч полетит вверх, ударит четвертый мяч и так далее. Если сделать цепочку мячей достаточно большой, теоретически можно верхний мяч запустить на космическую орбиту.

### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

#### 1.44 • РАЗОРИТЕЛЬНЫЙ ФОКУС

Когда Джон Макбрайд был студентом в Хьюстоне, он вместе с еще двумя студентами экспериментировал с мячами, отправляя пару мячей — софтбоольный и баскетбоольный — в свободное падение с высоты третьего этажа (из перехода между двумя общежитиями). Каждый раз при падении баскетбоольный мяч застывал на земле, а софтбоольный — взмывал высоко над их головами, не меньше чем на 10 м над землей. Фокус имел большой успех, но однажды при очередной попытке соударения мячей произошло не по центру, а под углом, и софтбоольный мяч влетел в окно кабинета завхоза, разбив все стекла в комнате. Ремонт обошелся в 250 долларов, но последствия могли бы быть гораздо печальнее, а наказание — более суровым, если бы в комнате в этот момент оказался сам завхоз.

#### 1.45 • КАРАТЕ

Представим себе удар кулаком, при котором сжатый кулак (ладонью вверх) от пояса выносится вперед и потом поворачивается ладонью вниз. Почему при нанесении этого удара учат соблюдать следующие меры предосторожности: подойти к противнику нужно на длину разогнутой руки, но не ближе (каратист не должен при этом наклоняться вперед), а контакт с противником должен происходить в момент, когда кулак прошел 90% пути (чтобы оставшиеся 10% пути

кулак прошел в теле противника)? Почему каратист поворачивается в момент начала удара? Почему удар кулаком, рубящий удар, удар ногой и другие удары обычно стараются нанести так, чтобы площадь контакта была минимальной? С какой скоростью и с какой силой профессионалы могут бить кулаком или ногой и какая энергия при этом передается? Почему, когда профессионал ломает противнику кость, его собственная кость при этом не ломается? Зачем, когда каратист раскалывает стопку предметов (например, досок), предметы прокладываются разделителями (например, карандашами)?

Когда я занимался в секции карате, я никогда не раскалывал доски рукой, но когда начал преподавать, то подумал, что раскалывание досок может служить прекрасной иллюстрацией работы сил при ударах. И однажды, спеша на лекцию, я прихватил пару сосновых досок, которые валялись в лаборатории. В аудитории я выбрал крепкого студента, которого попросил подержать доски вертикально, чтобы я смог ударить по ним костяшками двух пальцев правой руки. К сожалению, студент отшатнулся при ударе, и доски не раскололись. Я ударил еще и еще раз, но все так же безуспешно. После того как пальцы на руках распухли, а передняя доска окрасилась кровью, я сдался и ретировался из аудитории. Теперь я использую стопку садовых плиток, краями опирающихся на твердые подставки, а ударяю по стопке нижней поверхностью сжатого кулака. Почему этот метод оказался успешнее предыдущего?

**ОТВЕТ •** Наклоняться вперед нельзя по двум причинам. Нужно сохранять устойчивость, чтобы быть готовым мгновенно нанести следующий удар, а кроме того, поза каратиста должна быть такой, чтобы при нанесении удара не сломалась какая-нибудь кость. Каратисты-профессионалы могут выполнить серию ударов так быстро, что их невозможно разглядеть в подробностях. Рон Макнейр — один из астронавтов, погибших при взрыве «Челленджера», — был таким профессионалом. Он буквально осыпал своего соперника градом ударов руками, ногами, коленями и локтями, совершая их с невероятной скоростью.

Когда проводится контактный поединок каратистов, рекомендуется, чтобы кулак спортсмена входил в контакт с противником в момент, когда скорость кулака максимальна, поскольку тогда у него наибольший импульс и можно ударить противника сильнее, передав при ударе максимальную энергию. Оптимальная

точка контакта находится примерно на расстоянии 90% всей траектории кулака, и мысленно эта траектория строится так, как будто кулак должен пройти расстояние, равное длине вытянутой руки, из которого 10% проходится в теле противника. Если контакт возникает позже или раньше, то сила удара и переданная энергия будут меньше. Поворот туловища при ударе увеличивает скорость движения руки и, следовательно, воздействие на противника.

Удар наносится небольшой частью тела, поэтому сила, приходящаяся на единицу площади тела противника, очень велика, и энергия передается лишь на небольшой участок его тела. Поэтому при ударе у него может треснуть или сломаться кость. Существуют также правила, обеспечивающие вашу безопасность. Если вы правильно выполняете удар, например двумя костяшками пальцев руки, ребром разжатой и напряженной ладони или боковой частью стопы, а также если вы примете правильную позицию, при этих ударах ни одна из ваших костей не сломается.

То, что прогиб предмета важен при ударах по нему, иллюстрируется опытом, в котором каратист-профессионал ударяет по стопке досок или кирпичей, положенных на две опоры. Каждая из опор поддерживает один из краев объекта, так что когда каратист бьет по центру стопки, приложенная сила создает большой крутящий момент. Этот момент пытается повернуть правую и левую половины объекта вокруг точек опоры, и он прогибается вниз. Если прогиб достаточно велик, нижняя поверхность объекта трескается, трещина распространяется вверх, и он разламывается полностью.

Но когда каратист-профессионал разламывает стопку предметов, проложенных какими-то разделителями, он сначала раскалывает верхний предмет, куски его раскалывают следующий предмет, и так далее. Цепочка разломов распространяется по стопке быстрее, чем движется рука каратиста. Стопки сухих белых сосновых досок и бетонных тротуарных плиток — излюбленный реквизит для таких демонстраций. Доски выпиливаются так, чтобы волокна шли поперек (такие доски легче расколоть, чем доски с волокнами вдоль). Плитки обычно перед демонстрацией высушиваются в печи (таким образом из них выгоняется вся влага, поскольку вода уменьшает хрупкость бетона и увеличивает силу, которую нужно приложить к плитке, чтобы ее расколоть).

Удар по доске или плитке длится обычно 0,005 с. Скорость кулака в прямом ударе может достигать 10 м/с. Толчки и удары сверху вниз могут быть даже еще более

быстрыми. Сила, которую каратист развивает при разрушении досок кулаком, обычно достигает 4000 Н (408 кг). Если доска при ударе не раскалывается, приложенная сила оказывается еще большей, поскольку рука тогда не входит внутрь доски, где гасится часть импульса, — рука останавливается и может даже отколоться.

Когда мой студент отшатнулся, доска сдвинулась в его сторону. Это привело к увеличению времени соударения, а поскольку сила удара обратно пропорциональна времени соударения, она уменьшилась и оказалась недостаточной для того, чтобы доски раскололись. Трюк с разбиванием кирпичей более эффектен и более надежен, поскольку кирпичи легче уложить на опоры жестко и сократить тем самым время удара. К тому же он еще и более безопасен, поскольку каратист ударяет нижней частью кулака, а не гораздо более чувствительными костяшками пальцев.

### 1.46 • БОКС

Раньше, когда люди боксировали без перчаток, травмы и смертельные исходы случались чаще. Почему именно боксерские перчатки сделали бокс менее опасным? Почему, тем не менее, он лидирует по числу случайных смертей и серьезных повреждений мозга?

**ОТВЕТ •** Перчатки помогают распределить приложенную силу на большую площадь, уменьшая, таким образом, вероятность травмы для обоих боксеров. Из-за того, что материал, из которого изготовлены перчатки, пружинит во время удара, удар смягчается: длительность его увеличивается, а прикладываемая сила уменьшается. И все же сила, с которой боксер, особенно тяжеловес, наносит удар, огромна и вполне может привести к летальному исходу.

Опытный боксер знает, как смягчить удар, направленный ему в голову, — нужно отвести голову назад. Если не отклоняться или того хуже — податься вперед, сила удара будет еще больше. Наиболее опасные моменты боя — последние раунды, когда оба боксера устали и не могут предвидеть удар противника и вовремя отклонить назад голову.

Наиболее опасны удары, наносимые в нижнюю челюсть или лицо, особенно если они направлены под углом. При этом голова отбрасывается назад, мозг смещается и ствол его может быть передавлен, а между разными отделами мозга возникают напряжения, которые могут его повредить. Даже если боксер и не нокаутирован, его мозг неизбежно терпит ущерб, поскольку

он ударяется о череп, а затем смещается в обратную сторону. Из-за удара о череп нарушается ток крови в мозговых оболочках и повреждается поверхность мозга, а из-за внутренних напряжений, вызванных вращением, могут возникать внутренние повреждения. Кроме того, мозг повреждается и на противоположной по отношению к месту удара поверхности, поскольку, когда череп начинает движение назад, смещаясь относительно мозга, давление жидкости в пространстве между мозгом и черепом резко снижается, вызывая разрыв капилляров.

Если травмы повторяются, у боксера наступает так называемая деменция боксеров: он теряет способность думать, запоминать и говорить.

### 1.47 • ПАДЕНИЕ ГАЛЕРЕЙ

17 июля 1981 года только что открытый в Канзас-Сити отель «Хайят Редженси» был заполнен людьми. Публика слушала любимые мелодии 1940-х годов в исполнении оркестра и танцевала. Много народа скопилось на трех галереях, которые висели над огромным атриумом, подобно мостам. Внезапно две галереи обрушились на головы веселящихся внизу, убив 114 человек и ранив почти двести.

Что привело к падению галерей? Безусловно, вес людей на галереях стал одной из причин, но не было ли ошибки в самой конструкции? Через несколько дней после катастрофы в городской газете появилось сообщение о том, что во время строительства в проекте была изменена одна деталь. Галереи лежали на балках, а концы балок первоначально должны были быть подвешены на одном стержне, крепившемся к потолку. Гайки, накрученные на стержень, и шайбы, расположенные непосредственно под каждой галереей, держали бы вес своей галереи (рис. 1.17а).

Но, очевидно, кто-то из руководителей строительства решил, что такую систему подвешивания на одном стержне с несколькими участками резьбы сделать практически невозможно, и вместо одного стержня, который должен был пронизывать галерею насквозь, решил использовать два стержня (рис. 1.17б). Как такое простое и, казалось, оправданное изменение привело к гибели и тяжелым травмам такого количества людей, собравшихся отдохнуть и повеселиться в пятницу вечером?

**ОТВЕТ** • Рассмотрим крепление края самой верхней галереи. В первоначальном проекте вес этой галереи и людей, стоящих на ней, должен был удерживаться

гайкой под ней, накрученной на стержень. А как обстояло дело в измененной конструкции, где использовались две гайки? На верхней галерее гайка, накрученная на стержень, который шел вниз, должна была выдерживать вес обеих нижних галерей со стоящими на них людьми. Что еще хуже, гайка, накрученная на стержень, идущий вверх, должна была выдержать вес всех трех галерей со стоящими на них людьми. Очевидно, когда на галереях оказалось слишком много народа, их вес сорвал или сломал одну из этих гаек, и вся конструкция рухнула. Маленькое изменение — трагические последствия.

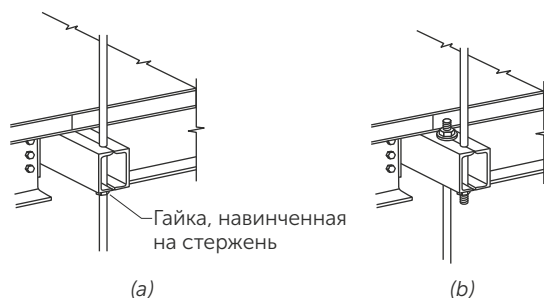


Рис. 1.17 / Задача 1.47. Первоначальный проект (а) и измененная при строительстве конструкция крепления галерей (б).

### 1.48 • ОБРУШЕНИЕ БАШЕН-БЛИЗНЕЦОВ

Какова физическая причина обрушения башен-близнецов Всемирного торгового центра в результате атаки самолетами 11 сентября 2001 года?

**ОТВЕТ** • Существует два основных объяснения, почему рухнули башни-близнецы.

1. Удар самолета и загорание самолетного топлива вызвали пожар, и температура в этом месте превысила 800 °С. Нагрев привел к уменьшению прочности вертикальных стальных колонн. В результате многие из этих колонн сложились, и верхние этажи рухнули на нижние. Даже если опоры нижних этажей и не нагрелись настолько, они все равно погнулись от сильного и резкого удара. И все этажи упали один на другой.

2. Удар самолета и возгорание самолетного топлива вызвали пожар, но несильный, и температура там была ниже той, при которой прочность вертикальных опор уменьшилась бы. (Некоторые исследователи заметили, что на этажах, куда врезался самолет, была не настолько хорошая вентиляция, чтобы раздуть большой пожар, да и количество дыма, вырывающегося из пробоины, проделанной самолетом, указывало на то, что пожар был не большой.) Но он привел к тому, что несколько перекрытий



и расположенных под ними горизонтальных балок расширились, а поскольку они были закреплены, то могли расширяться только выгибаясь, вертикальные же опоры при этом вогнулись внутрь. Прогиб мог быть еще сильнее, если и горизонтальные балки, и вертикальные колонны размягчились из-за высокой температуры. Когда вертикальные опоры прогнулись внутрь, они уже не могли поддерживать верхнюю часть здания, и оно рухнуло.

#### 1.49 • ПАДЕНИЯ С ВЫСОТЫ СО СЧАСТЛИВЫМ КОНЦОМ

Февраль 1955 года: парашютист прыгает с парашютом из самолета C-119 с высоты 370 м. Парашют не раскрывается, и десантник падает с этой высоты спиной в снег, оставляя за собой воронку глубиной 1 м. Его эвакуируют вертолетом в больницу, где у него обнаруживают лишь несколько переломов и синяков.

Март 1944 года: во время бомбового рейда над Германией сержант британских Королевских ВВС Николас Алкемэйд, стрелок бомбардировщика «Ланкастер», обнаруживает, что самолет горит, а до парашюта невозможно дотянуться. И он спрыгивает без парашюта с высоты 5,5 км, падает на кроны деревьев, а затем в снег, получив лишь царапины и синяки.

Вторая мировая война: лейтенант советских ВВС Иван Чисов принимает решение выпрыгнуть с парашютом из самолета, атакованного дюжиной «мессершмитов». Не желая стать мишенью для немецких стрелков, он намеревается раскрыть парашют не сразу, а после того, как минует вражеские самолеты. Падая с высоты 7 км, летчик теряет сознание. К счастью, он приземляется в снежное ущелье. Несмотря на довольно сильный удар, через 4 месяца он уже снова в строю.

Возможно, еще более невероятным был трюк, исполнявшийся Генри Ламоте в течение многих лет. Он прыгал с высоты 12 м плашмя в бассейн глубиной всего 30 см, ударяясь животом о воду с силой, в 70 раз превышающей вес его тела. (Трюк очень опасный, его нельзя повторять. Я слышал об одном молодом дурачке, который попробовал повторить трюк, и его парализовало от шеи до ног.)

В прессе часто пишут о других выживших при падении с большой высоты (и о многих других не выживших). Почему кому-то все же удается выжить?

**ОТВЕТ** • Смертельную опасность, естественно, представляет удар о землю (или о другую твердую поверхность), во время которого на человека действует

огромная сила. Эта сила прямо пропорциональна импульсу, который падающий приобрел непосредственно перед ударом, и обратно пропорциональна длительности соударения. Импульс зависит от массы и скорости падающего. Если падение происходит с большой (порядка нескольких сотен метров) высоты, в какой-то момент он перестает ускоряться и летит дальше с так называемой *терминальной (предельной) скоростью*. Хотя притяжение Земли продолжает на него действовать, но оно уравнивается сопротивлением воздуха, и ускорение становится равным нулю. Величина этой терминальной скорости зависит от позиции падающего: если он расставил ноги и руки, то сопротивление воздуха будет больше, чем если бы он падал ногами или головой вниз. Соответственно, в первом случае будет ниже и терминальная скорость. Однако в сам момент приземления после падения с большой высоты распластанная поза едва ли дает преимущества.

Длительность удара — более важный фактор. Если удар «жесткий», он может длиться от 0,001 до 0,01 с, и сила, останавливающая падение, наверняка приведет к летальному исходу. Но если соударение «мягче» (требуется больше времени, чтобы остановиться), останавливающая падение сила будет меньше. Падение в глубокий снег удлинит процесс соударения настолько, что сила удара может уменьшиться до уровня, позволяющего выжить. Очевидно, 30 см воды оказывались для Ламоте достаточными, чтобы выжить при прыжках.

Люди, падающие головой вниз, гораздо реже выживают, чем при ином расположении, поскольку позвоночник, ствол головного мозга и сам мозг очень чувствительны к повреждениям.

#### 1.50 • СПАСИТЕЛЬНЫЙ ПРЫЖОК С ПАРАШЮТОМ

Это случилось в апреле 1987 года во время очередного прыжка с парашютом. Парашютист Грегори Робертсон заметил, что член того же клуба Дебби Вильямс столкнулась с третьим парашютистом из группы, потеряла сознание и потому не может открыть свой парашют. Робертсон в этот момент был значительно выше Вильямс и сам еще не успел открыть свой парашют, прыгая с высоты 4 км. Он как-то умудрился подлететь к Дебби Вильямс, подстроившись под ее скорость, поймал ее и открыл сначала ее парашют, а потом и свой — максимум за 10 с до удара о землю. Вильямс получила значительные внутренние повреждения, поскольку в момент приземления не контролировала себя, но выжила. Как Робертсон смог догнать Вильямс?

**ОТВЕТ** • Робертсон смог поймать Вильямс, управляя силой сопротивления воздуха, которое он испытывал при падении. Когда парашютист начинает падать и скорость его падения возрастает, растет и сила сопротивления воздуха, направленная в противоположном направлении по отношению к силе гравитации, притягивающей парашютиста к земле. В какой-то момент эти силы сравниваются, и с этого момента парашютист полетит вниз с постоянной — *терминальной* — скоростью. Величина терминальной скорости зависит от площади поперечного сечения парашютиста в потоке обтекающего его воздуха. Чем меньше эта площадь, тем есть если он летит вверх или вниз головой, тем выше терминальная скорость (по сравнению с его скоростью при падении в распластанном положении).

Когда Робертсон заметил, что Вильямс угрожает опасность, он сразу переориентировал тело и полетел дальше головой вниз, уменьшив сопротивление воздуха и увеличив скорость падения. Вильямс падала, не контролируя себя, и испытывала большее сопротивление воздуха, а ее терминальная скорость составила 190 км/ч. Робертсон, летевший головой вниз, достиг скорости 300 км/ч, поравнялся с Вильямс и лишь тогда принял горизонтальное положение и расставил руки и ноги, увеличивая сопротивление воздуха и замедляя до скорости, с которой летела Вильямс.

### 1.51 • ПАДЕНИЕ КОШЕК С ВЫСОТЫ

Люди редко выживают при падении с большой высоты, но кошкам везет больше. В 1987 году были опубликованы данные о 132 кошках, случайно выпавших с разных этажей — от второго до тридцать второго (6–98 м), причем большая их часть приземлялась на бетонную поверхность.

Выжили 90% кошек, причем 60% из них вообще не получили повреждений. Странным образом тяжесть повреждений (то есть количество сломанных костей или смерть) с высотой уменьшалась при падении с этажей выше седьмого или восьмого. (Кошка, выпавшая с 32-го этажа, получила лишь легкие повреждения груди и одного зуба и после 48-часового обследования была выписана домой.) Почему у кошек больше шансов на выживание при падении с большой высоты? (Конечно, благополучный исход не гарантирован, поэтому, если вы живете на высоком этаже, держите кошку подальше от открытых окон. Впрочем, на низких этажах это тоже не помешает, хотя и по другой причине.)

**ОТВЕТ** • Когда кошка выпадает из окна и летит вниз, она инстинктивно старается переориентировать тело так, чтобы лапы оказались под туловищем. Она использует упругость своих лап, чтобы амортизировать удар при приземлении: такое приземление увеличивает время столкновения и тем самым уменьшает силу, действующую на кошку.

Когда кошка летит, сила сопротивления воздуха, направленная вверх, возрастает. Если кошка падает всего лишь с подоконника на пол, эта сила будет не очень большой. Но когда животное падает с большой высоты, сила сопротивления воздуха может стать достаточной, чтобы уменьшить ускорение. Действительно, если кошка падает с этажа выше шестого, сила сопротивления воздуха может стать достаточно большой и уравновесит силу земного притяжения. И дальше кошка будет падать без ускорения, с постоянной — терминальной — скоростью.

До тех пор, пока терминальная скорость не достигнута, кошка напугана тем, что ускоряется, и держит лапы поджатыми. (Человек тоже воспринимает больше ускорение, чем скорость.) Но при достижении терминальной скорости ускорение исчезает, кошка слегка расслабляется и инстинктивно расставляет лапы (чтобы увеличить сопротивление воздуха).

Как только кошка расставила лапы, сопротивление воздуха автоматически увеличивается, а скорость уменьшается. Чем с большей высоты животное падает, тем значительно уменьшается скорость — до тех пор, пока вновь не будет достигнута терминальная скорость, равная теперь примерно 100 км/ч. Таким образом, при падении с десятого этажа кошка может приземлиться со скоростью меньшей, чем при падении с пятого, и, соответственно, у нее будет больше шансов выжить.

### 1.52 • ПРЫЖКИ С ТАРЗАНКОЙ И «БАНДЖИ-ДЖАМПИНГ»

На острове Пентекост архипелага Новые Гебриды существует древний обычай: юноша становится мужчиной, только совершив прыжок на лиане. Юноша объявляет лодыжки концом лианы, второй конец которой прикреплен к площадке. Лиана должна остановить падение, прежде чем он достигнет земли. В мае 1982 года некий молодой абориген совершил прыжок с высоты около 25 м. Сообщалось, что его скорость перед тем, как его остановила лиана, была 55 км/ч. Ускорение, которое он испытал при остановке, составило 110 g

(в 110 раз больше ускорения свободного падения). Но смог ли он потом ходить, не сообщалось.

Современный вариант прыжков с тарзанкой — банджи-джампинг, когда человек спрыгивает с высокой платформы, обвязав ноги эластичной лентой, второй конец которой привязывается к платформе. И несмотря на меры предосторожности, иногда случаются травмы и даже смертельные случаи. Этот аттракцион родился 1 апреля (когда же еще!) 1979 года, когда члены Клуба опасных видов спорта спрыгнули с моста в Бристоле (Англия). Представьте, что вы прыгаете этим способом с моста. Где вы испытаете наибольшую силу и ускорение? Если вы побоитесь лететь со всей высоты и обвяжетесь укороченной вдвое эластичной лентой, уменьшатся ли вдвое наибольшая сила и ускорение?

**ОТВЕТ •** Наибольшую силу и ускорение прыгун испытывает в самой нижней точке, где лента меняет направление его движения и прыгун на мгновение останавливается. Если бы ленту можно было рассматривать как идеальную пружину, тогда наибольшая сила и ускорение не зависели бы от ее длины и, соответственно, от высоты, с которой совершается прыжок. Хотя при прыжке с меньшей высоты ленте придется гасить меньшую скорость, более короткая лента, используемая при этом, будет жестче (короткая пружина жестче, чем длинная) и ускорение при сбрасывании до нуля этой меньшей скорости будет тем же самым, что и при сбрасывании до нуля большей скорости менее жесткой лентой.

Направленное вверх ускорение, останавливающее прыгуна, иногда настолько велико, что может травмировать его. Особенно уязвимы глаза, поскольку в момент остановки голова прыгуна находится внизу и скачок кровяного давления может вызвать кровоизлияние.

### 1.53 • ПОСТАРАТЬСЯ ВЫЖИТЬ В ПАДАЮЩЕМ ЛИФТЕ

Вдруг случилось ужасное — вы оказались в старом лифте, не обеспеченном системой аварийного торможения, трос рвется, кабина падает. Что нужно делать, чтобы увеличить по максимуму шансы на выживание, какими бы ничтожными они ни были? Например, не стоит ли подпрыгнуть перед самым падением кабины на дно шахты?

**ОТВЕТ •** Пожалуй, лучше всего лечь на пол. Можно подумать, что это невозможно, поскольку и вы, и пол кабины находитесь в свободном падении. Но на самом деле падение кабины тормозится трением при скольжении ее по направляющим и сопротивлением воздуха. Так что упасть на пол можно, а там нужно расправиться. Идея в том, что тогда сила, действие которой вы вот-вот испытаете, распределится на максимально большую площадь.

Остаться стоять — плохое решение, поскольку сила распределится на маленькую площадь, примерно равную поперечному сечению ваших коленей. Если удар сильный, они не выдержат, и все тело рухнет на пол.

Подпрыгнуть в последний момент (этот момент вообще невозможно предугадать в закрытой кабине) — это вообще самое худшее, что можно сделать. Если подпрыгнуть во время падения, это только уменьшит скорость движения вниз. Но предположим, вы подпрыгнули в последний момент, а кабина отколошетила при соударении со дном шахты. В этот момент вы движетесь вниз, а пол кабины — вверх, а дальше... лучше опустим ужасные подробности.

### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

#### 1.54 • КАК БОМБАРДИРОВЩИК ПРОТАРАНИЛ ЭМПАЙР-СТЕЙТ-БИЛДИНГ

В субботу 28 июля 1945 года в 9:45 бомбардировщик В-25 ВВС США, двигаясь в густом тумане, врезался в нью-йоркский небоскреб Эмпайр-стейт-билдинг на уровне 78–79-го этажей. Трое пилотов и десять рабочих, находившихся в здании, погибли, еще 26 человек получили ранения. Если бы это была не суббота, а обычный рабочий день, жертв оказалось бы намного больше.

Ударом самолета оторвало крылья, а фюзеляж и два двигателя застряли внутри здания, при этом топливо вспыхнуло, причем пламя было такое сильное, что зеваки наблюдали его, несмотря на туман. Один двигатель пробил здание насквозь и упал на крышу другого здания, где тоже начался пожар.

Когда самолет врезался в небоскреб, он ударил одну из балок лифтовой шахты, повредив ее и несколько кабелей. Женщину-лифтера, которая в этот момент открывала дверь 75-го этажа, выбросило из лифта взрывом

и бросило в огонь — горело топливо. Загоревшуюся на ней одежду потушили двое оказавшихся рядом клерков. Оказав ей первую помощь, они посадили ее в другой лифт, и ее коллега согласилась отвезти ее на первый этаж, чтобы там ей оказали помощь. Как только дверь закрылась, послышался характерный треск: тросы порвались, и кабина полетела в подвал небоскреба.

Спасатели, бросившиеся в подвал сразу после обрыва тросов, ожидали обнаружить в кабине два трупа. Но когда они проделали в стене дыру, чтобы добраться до кабины, они нашли обеих женщин живыми, но сильно пораненными. Они пролетели больше 75 этажей, но системы безопасности лифта, очевидно, сильно замедлили падение кабины и смягчили ее удар о дно шахты. Что делали женщины во время падения, не сообщалось, но маловероятно, что в таком состоянии, да еще испытывая постоянные толчки, они остались стоять.

### 1.55 • ПАДЕНИЯ В БОРЬБЕ, ПРИЗЕМЛЕНИЕ ПРИ ПАРАШЮТИРОВАНИИ

Когда в дзюдо- или айкидо-поединке участника бросают на пол, как он должен приземлиться, чтобы минимизировать вероятность травмы? Как профессиональные борцы умудряются ничего себе не повредить, когда падают сами или их бросают на татами? Ведь при неправильном падении очень велика вероятность сломать кость или повредить внутренние органы.

Как правильно приземляться с парашютом, чтобы уменьшить риск получения травмы? Хотя парашют сильно уменьшает скорость падения, скорость все еще велика — примерно как при прыжке из окна второго этажа.

**ОТВЕТ •** Нужно приземляться так, чтобы при ударе о пол площадь контакта была максимальной. Овладев техникой падения, можно уменьшить давление, приходящееся на ту часть тела, которая ударяется о пол, и уменьшить риск того, что к кости или внутреннему органу в точке удара будет приложена сила, способная согнуть, повернуть кость или повредить орган. Если спортсмен брошен на пол, в момент касания поясом татами он должен хлопнуть ладонью вытянутой руки о татами. Подставленная рука увеличивает площадь контакта, уменьшает силу удара, приходящегося на грудную клетку, и помогает быстро подняться. Профессиональные борцы в совершенстве владеют приемами самостраховки и могут прыгать с высоты (например, с каната на противника, лежащего на мате). Бои проходят на площадках с очень упругим покрытием (татами): при приземлении на татами длительность соударения увеличивается за счет его пружинистости, а сила удара уменьшается.

Парашютистов учат при приземлении группироваться и поворачиваться так, чтобы удар сначала

пришелся на подушечки стопы. Затем нужно согнуть колени и повернуться так, чтобы упасть на боковую поверхность бедра, а под конец перекатиться на спину. В этой методике есть два преимущества: удлинняется время соударения и, соответственно, уменьшается сила, действующая на парашютиста, и эта сила распределяется на большую площадь. Если парашютист приземлится стоя, компрессия коленных суставов может привести к переломам.

### 1.56 • ЛОЖЕ ФАКИРА

После того как я увидел на показательных выступлениях каратистов ложе факира (доску, утыканную гвоздями), я стал его использовать на своих лекциях по физике. Мой показ состоял из двух частей. В первой я снимал майку и ложился между двумя досками с гвоздями, причем на верхнюю доску становились один или два человека. Хотя гвозди причиняли изрядную боль, они редко прокалывали кожу. Какие факторы уменьшают риск быть проколотым?

Во второй части я опять ложился между двумя досками с гвоздями, но на этот раз на верхнюю доску мой ассистент ставил бетонный блок, который потом разбивал тяжелой кувалдой. Эта часть опасна по многим причинам, одна из которых — осколки, которые могут отлететь и поранить кого-нибудь. (Однажды, когда я давал представление «Физический фейерверк», номер с ложем факира был последним. Мой постоянный ассистент не смог со мной поехать, так что пришлось попросить помочь пригласившего меня профессора. Он как следует замахнулся кувалдой, но под таким углом, что большинство бетонных осколков полетело прямо мне в лицо. Один из кусков сильно ударил меня в подбородок, и когда я, пошатываясь, встал и хотел дать заключительные пояснения, все было залито кровью — тело, брюки, туфли. Никогда больше этот опыт



не заканчивался так драматически и никогда аудитория не реагировала так остро.) Почему безопаснее разбивать большой блок, чем маленький?

**ОТВЕТ •** Когда на доске надо мной стоят люди, их вес распределяется на большое количество гвоздей, вбитых в верхнюю доску, так что давление каждого гвоздя на мою кожу оказывается недостаточным, чтобы проколоть ее. Давление на спину больше, поскольку эти гвозди поддерживают еще и мой вес (и, соответственно, давят на мою спину с дополнительной силой). Экспериментально я определил, какой вес стоящих на мне людей еще не приводит к прокалыванию кожи спины. (Да, было больно, но наука требует жертв.)

Большой блок, поставленный сверху, не только добавлял опыту зрелищности, но и делал его более безопасным, на что есть две не очень очевидные причины. 1. Для того чтобы с силой нажать на меня, верхняя доска и блок, лежащий на ней, должны с ускорением двинуться вниз, но из-за большой массы блока это ускорение меньше. 2. Большая часть энергии кувалды идет на то, чтобы разбить блок, а не на то, чтобы привести в движение доску. В первый раз, когда я провел опыт с ложем факира в аудитории, я вместо большого блока использовал маленький кирпич. И после удара кувалдой оглушенный пролежал на полу несколько минут.

### 1.57 • ВИСЯЩИЕ ЛОЖКИ

Вымойте как следует свой нос и небольшую легкую ложку, подышите на внутреннюю поверхность углубления ложки, а потом прижмите эту поверхность к носу. Проверьте, прилипла ли она, слегка переместив ее и немного ослабив нажатие. Если почувствуете, что она держится, уберите руки. И получите то, чего хотели: ложка свисает у вас с носа. Все будут в восторге.

Почему ложка повисла? Чем помогло то, что сначала на нее подышали? Как долго может ложка висеть на носу? Одно время я всем говорил, что мой рекорд — час и 15 минут — был поставлен во французском ресторане в Торонто. Однако на самом деле это случилось на стоянке для грузового транспорта в Юнгстауне, где один бандитского вида байкер пошутил, что ложка продержится дольше, если он слегка изменит форму моего носа.

**ОТВЕТ •** Если ни на носу, ни на ложке нет следов жира, трение между ложкой и носом должно быть достаточным, чтобы удержать ложку на месте. Она будет неподвижно висеть при условии, что ее центр масс лежит

на вертикали, проходящей через точку, в которой она прилипла к носу. В противном случае, когда вы ложку отпустите, сила тяжести будет стремиться повернуть ее, и она может соскользнуть. Конденсация выдыхаемого вами воздуха на ложке помогает ей приклеиться к носу. Хотя слой воды, если он сравнительно толст, действует как смазка, очень тонкий слой является клеем из-за возникающих между молекулами воды и соседними молекулами поверхностей носа и ложки электростатических сил притяжения; кроме того, ложку прижимает к носу атмосферное давление.

### 1.58 • СЛЕДЫ ОТ КАМНЕЙ

На дне высохших озер, которыми изобилуют Калифорния и Невада, иногда попадают камни, от которых идут длинные следы, прочерченные на твердой корке дна. Эти следы иногда достигают десятков метров в длину, а масса камней — 300 кг. Откуда взялись следы? Камни решили прогуляться? Или их перекачивал какой-то псих? Какова бы ни была причина, передвигать эти камни очень тяжело, поскольку трение между камнями и твердой поверхностью пустыни огромно.

**ОТВЕТ •** Многие ученые пытались выяснить происхождение этих следов. Одна из теорий объясняла их появление намерзанием дождевой воды во время редких заморозков. Когда дует ветер и порывы его достаточно сильны, они в состоянии сдвинуть камни, завернутые в ледяные «фантики», и те могут прочертить полосы на твердой поверхности пустыни.

Сторонники другой теории считают, что следы могли появиться во время ливней, случающихся, хотя и редко, в пустыне. Когда дождь смачивает поверхность пустыни, образуется смазка, и шквалистый ветер может сдвинуть или перекатить камни — в результате остаются следы. Трение между камнями и поверхностью оказывается минимальным, когда земля покрывается тонким слоем грязи, а под ним находится все еще твердая основа. В этот момент порыв ветра может резко сдвинуть камень, а для продолжения движения требуется меньшая сила.

### 1.59 • УЗЛЫ

В морском узле, показанном на рис. 1.18а, два конца — один свободный, а другой привязан к грузу. Если увеличить нагрузку, может ли узел проскользнуть, то есть может ли свободный конец выскочить из узла, так что узел развяжется? Или же этот узел самозатягивающийся?

**ОТВЕТ** • Можно математически проанализировать силы трения и натяжения веревки в узле и таким образом определить, что будет с узлом при большой произвольной нагрузке: будет ли он удерживать груз или развяжется. Здесь мы проведем простой анализ и начнем со свободного конца, который не натянут (рис. 1.18б). Свободный конец проходит под петель, образованной другой частью веревки, накинутой сверху на него и прижимающей его к стержню. Чтобы свободный конец не выскользнул из-под петли, трение, создаваемое этим давлением, не должно быть меньше натяжения веревки, стремящегося вытянуть свободный конец из-под петли.

Веревка в этом узле обвивает стержень дважды (двумя витками). Натяжение на конце той петли, которая находится ближе к свободному концу, мало, а на другом конце витка — велико. Чтобы этот виток оставался неподвижным, трение между веревкой и стержнем должно быть достаточно велико, чтобы уравновесить разницу в натяжениях веревки на обоих концах этого витка.

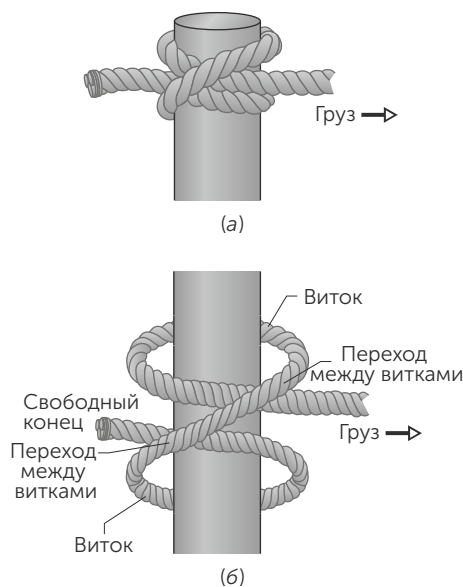


Рис. 1.18 / Задача 1.59. а) Морской узел.  
б) Элементы морского узла.

Затем веревка обвивает стержень еще раз и проходит под второй петлей. Натяжение на конце веревки, противоположном свободному, создается грузом. Если верхняя часть веревки в этом витке создает достаточное давление на нижнюю, виток остается неподвижным.

Таким образом, в морском узле есть три требования на трение в разных точках узла. Если во всех этих

точках веревка натянута и трение достаточно, чтобы удержать узел от проскальзывания, узел будет держать при любой нагрузке. Но если в какой-то из них веревка ослабла, узел развяжется, как только нагрузка сделается достаточно большой.

Некоторые типы узлов развязываются при большой нагрузке, даже если все части веревки в витках и переходах между витками сильно натянуты. Другие автоматически затягиваются с увеличением нагрузки: тогда узел надежен и только веревка может порваться на отрезке между грузом и узлом.

## 1.60 • ЛАЗАНЬЕ ПО СКАЛАМ

Когда вы карабкаетесь вверх по широкой трещине в горе, вам поможет прием, используемый, например, при *подъеме в трубе*. Для этого необходимо принять положение «в распор» — прижаться спиной к одной стенке трещины и упереться ногами в другую (рис. 1.19). До тех пор, пока вы можете давить на стенки с достаточной силой, вы не упадете, но подъем потребует от вас много сил. Есть ли какое-то определенное расстояние по вертикали между ногами и плечами, при котором необходимое давление, позволяющее не упасть, будет наименьшим?

А вот еще несколько из множества возможных вопросов:

1. Если на вертикальной скале вы нащупали небольшой выступ на уровне ног, как лучше упереться в него — носком ботинка или ребром его?
2. Допустим, вы находитесь на крутом склоне скалы, на котором вы еще можете стоять вертикально. Почувствуете ли вы себя более устойчиво, если наклонитесь вперед и обопретесь на руки, чтобы увеличить общее трение?
3. Если две плиты пересекаются под острым углом, что безопаснее: карабкаться вверх по одной из них или по линии их пересечения?
4. Почему скалолазы часто окунают пальцы в толченый мел?

5. Какую веревку лучше использовать для организации страховочной цепи при скалолазании и альпинизме — растяжимую или жесткую?

6. Благодаря вбитым в скалу крючьям (промежуточным точкам страховки) альпинист, если сорвется, пролетит только до ближайшего крюка. Однако здесь есть другая опасность — веревка может растянуться и порваться. Многие новички-скалолазы считают, что все зависит от высоты скалолаза относительно последнего

крюка в момент падения: чем больше эта высота, тем больше растянется веревка и тем вероятнее, что она порвется. Почему они не правы?

**ОТВЕТ** • Во-первых, ни одно из упражнений, которые мы тут рассматриваем, нельзя повторять без участия профессионалов, поскольку все допущения, принятые для объяснений, здесь очень приблизительны, а в реальности в каждом случае есть множество факторов, влияющих на ситуацию.

В методе «подъем в трубе» существует позиция, когда минимизируется давление, с которым ноги и плечи будут давить на стенку. В принципе, можно найти эту позицию, поставив сначала ноги низко и уменьшая их давление на стенку до тех пор, пока не начнется проскальзывание. Если затем переставить ноги повыше и опять давить ими на стенку на пределе проскальзывания, это давление будет меньше, чем в первой позиции. Однако при этом увеличится сила, с которой необходимо давить на стенку плечами, поскольку уменьшилась сила, с которой на противоположную стенку давят ноги, а для того, чтобы скалолаз не упал, сумма сил трения должна быть равна его весу. Переставляя ноги все выше и выше до тех пор, пока уже плечи едва не начнут проскальзывать, вы как раз и найдете положение, в котором давление на стенки будет минимальным.

Теперь ответы на другие вопросы по порядку.

1. Наименьшее усилие требуется, если используется ребро ботинка. Чтобы стабилизировать ногу, мускулы ноги должны уравновесить крутящий момент, образованный силой давления со стороны уступа. Этот крутящий момент больше, если упираться носком ботинка, поскольку расстояние между носком и костью ноги больше, чем расстояние между боковой частью ноги и костью.

2. Как правило, человек более устойчив, когда стоит вертикально. Если он наклонится, сила трения между ботинками и поверхностью склона уменьшится и ботинки могут начать проскальзывать. Можно создать дополнительное трение, оперевшись руками о скалу, но если вынести руки слишком далеко вперед, сила трения между ними и поверхностью окажется направленной вниз по склону и будет только уменьшать устойчивость.

3. Нужно подниматься по линии пересечения плит, поскольку ее наклон меньше, чем наклон каждой из плит.

4. Скалолазы используют мел, чтобы убрать лишнюю влагу с кончиков пальцев и увеличить сцепление

пальцев с выступами. Бытует мнение, что влага уменьшает статическое трение между пальцами и каменной поверхностью и мел поэтому должен увеличить трение до значения, характерного для сухой кожи. Однако одно исследование показало, что мел на самом деле уменьшает трение по двум причинам: 1) высушивая кожу, мел уменьшает эластичность кончиков пальцев; 2) частички мела образуют скользкий слой между пальцами и скалой. Тем не менее до сих пор альпинисты любят использовать мел, и, видимо, нужны новые исследования в этой области.

5. Альпинисты, в отличие от спелеологов, используют веревку, которая под действием нагрузки деформируется. При падении на такой веревке альпинист останавливается не мгновенно, и сила, действующая на него в момент остановки, не такая большая. Когда веревка начинает растягиваться, волокна веревки трутся друг о друга и нагреваются, большая часть потенциальной и кинетической энергии, теряемой альпинистом при падении, превращается в конце падения в тепловую энергию, выделяемую внутри веревки.

6. Опытные альпинисты знают, что риск обрыва веревки определяется величиной *коэффициента опасности*  $2H/L$ , где  $H$  — высота альпиниста по отношению к самой высокой промежуточной точке страховки, а  $L$  — длина веревки от альпиниста до страховочной станции, где веревка надежно закреплена (или до *страхующего* — человека, удерживающего веревку). В зависимости от величины  $H$  и  $L$  этот коэффициент опасности может быть очень высок, даже если  $H$  мало, но при этом мало и  $L$ . По мере того как альпинист ползет вверх и  $L$  растет, при той же величине  $H$  риск становится меньше.



**Рис. 1.19 / Задача 1.60.** Движение вверх методом «подъем в трубе».

### 1.61 • КАК БЕГАЮТ ПО СКАЛАМ СНЕЖНЫЕ БАРАНЫ

Скалолазы взбираются на скалы в ботинках со специальными подошвами, которые увеличивают трение между ботинками и поверхностью склона. Если поверхность влажная, лазанье может стать опасным. Вспомним, как трудно пройти по мокрому полу и не поскользнуться. У снежных баранов нет ботинок со специальными подошвами, но, тем не менее, они способны беззаботно скакать по скалистым склонам, даже если те влажные или покрыты мхом. Как бараны цепляются за скалы?

**ОТВЕТ** • При ходьбе у человека первой с полом соприкасается пятка ноги, на которую он наступает. Если пол влажный, сила трения, возникающая между полом и пяткой, мала, и нога может поехать вперед, а человек — упасть. У снежного барана первой в контакт со скальной поверхностью входит задняя часть раздвоенного копыта как раз в том месте, где обе половинки копыта соединяются. Площадь этой области мала, так что она легко вдавливается в мох или во что-то другое, чем покрыты камни. Когда нагрузка на копыто увеличивается, уже большая часть его двух пальцев соприкасается с поверхностью камня. При этом пальцы слегка разъезжаются, и копыто становится V-образным. Кромки копыта сдирают с поверхности камня мох и зацепляются за любую неровность, не давая копыту проскальзывать вперед, когда вес животного перенесен на него полностью.

### 1.62 • ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ИСТУКАНОВ ПО ОСТРОВУ ПАСХИ

Доисторические люди, обитавшие на острове Пасхи, изваяли сотни каменных истуканов, которых потом перетаскивали по всему острову и устанавливали в разных местах. Как они делали это, имея в своем распоряжении только примитивные средства?

**ОТВЕТ** • Скорее всего, гигантские каменные статуи острова Пасхи передвигались доисторическими обитателями острова на деревянных салазках по почти одинаковым бревнам, служившим роликами. И хотя передвижение этих салазок требовало от островитян огромных усилий и затрат энергии, это было намного легче, чем тащить их по земле, когда пришлось бы преодолевать несравнимо большую силу трения ползьев о землю. В новейшие времена была проделана

реконструкция этого процесса: 25 человек протащили копию истукана весом 9000 кг на 45 м за 2 минуты.

### 1.63 • ДРЕВНИЕ СООРУЖЕНИЯ СТОУНХЕНДЖА

Как каменные блоки мегалитических сооружений Стоунхенджа, находящиеся на равнине Солсбери, были доставлены на место и установлены в нужной позиции? Блоки, из которых состоят конструкции Стоунхенджа, делятся на два типа: *опоры* — стоящие вертикально огромные каменные блоки из песчаника (сарсены) и *перемычки* — чуть меньшие каменные плиты, лежащие сверху на сарсенах.

**ОТВЕТ** • Маловероятно, что каменные блоки перевозились на расстояния больше 5–10 км, несмотря на красивые мифы об их происхождении. Возможно, материал для строительства был принесен на равнины Солсбери движущимися ледниками в ранний ледниковый период, задолго до того, как Стоунхендж был построен.

Ученые полагают, что древние строители укладывали каменный блок на волокуши, изготовленные из связанных вместе бревен. Их тянули за веревки люди или домашние животные. Работу облегчала смазка, наносимая на землю перед волокушами.

Для установки опорных блоков на место также могли использовать волокуши. Блок на бревнах втягивали вверх по насыпи, которая заканчивалась крутым обрывом (рис. 1.20а). Возможно, когда блок тащили по пологой верхушке насыпи и его передняя часть зависала над обрывом, на заднюю часть блока ставили дополнительный блок. Он служил для перемещения центра масс: когда опорный блок балансировал над ямой, этот дополнительный блок перемещался вперед до тех пор, пока сарсен не опрокидывался в яму. После этого натягивали веревки, которыми обвязывалась вершина стоящего наклонно блока, и выпрямляли его.

Один из возможных способов подъема плит-перемычек и установки их на пару опорных блоков был опробован в наше время в маленьком чешском городе. Цементную плиту весом 5124 кг протянули по двум дубовым балкам, поверхность которых была ошкурена и смазана жиром (рис. 1.20б). Каждая из этих 10-метровых балок шла от земли до вершины одного из двух опорных блоков, на которые должна была быть установлена перемычка. Плита затаскивалась наверх с помощью веревок, которые одним концом были обмотаны вокруг плиты, а другим привязаны к концам двух еловых бревен. На другом конце каждого бревна



располагалась платформа, на которой стояли или лежали рабочие. Когда их собиралось достаточное количество, бревно поворачивалось вокруг вершины вертикальной опоры и протягивало плиту немного вверх по балке. После этого под нижний конец плиты подставлялись колодки, чтобы она не соскользнула вниз, пока платформу перемещали для следующего подтягивания плиты. Так, «по-утиному», подтягивая сначала одну сторону, потом другую, плиту поднимали по балкам вверх, при этом на платформе находилось всего восемь-девять рабочих.

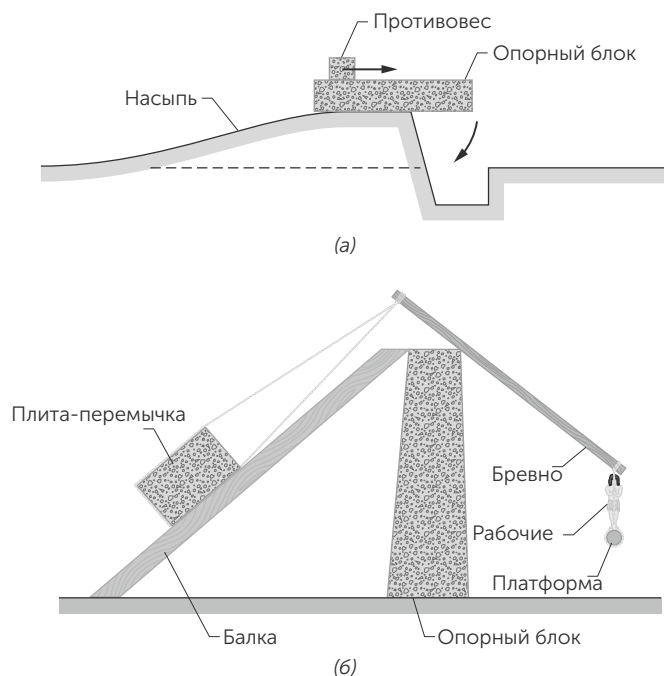


Рис. 1.20 / Задача 1.63. а) Подъем опорного блока в Стоунхендже. б) Подъем плиты-перемычки.

### 1.64 • КАК ПОДНИМАЛИ КАМЕННЫЕ БЛОКИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЕГИПЕТСКИХ ПИРАМИД

Строителям египетских пирамид приходилось поднимать вырубленные в каменоломнях каменные блоки, грузить их на салазки и везти на площадку. Средний вес камней составлял 2300 кг, но попадались и особо крупные экземпляры, весившие 14 000 кг. Как древние строители умудрялись поднимать их, если тогда еще не было ни машин, ни полиспастов (талей), да и вообще устройств с колесами?

Возможно, использовался следующий метод. Под блок вбивался клин, приподнимавший край, под него подсовывалось несколько гибких шестов так, чтоб их концы выступали за противоположный край блока.

Затем выступающие концы одного или двух шестов слегка приподнимались (скажем, на полсантиметра) и удерживались на месте с помощью подложенных под них клиньев из прочного материала. Такая же процедура проделывалась и с другими шестами, пока все они не оказывались поднятыми на одинаковую высоту — в результате весь блок немного поднимался. Как такой метод позволял поднять огромный вес всего лишь несколькими людьми? Почему так важно, чтобы шесты были гибкими?

Как строители могли затаскивать эти блоки наверх и складывать из них стены пирамид? В частности, использовали ли при этом глиняные пандусы?

**ОТВЕТ •** Поднимать большой вес с помощью гибких шестов значительно легче, чем с помощью жестких. Предположим, вы протащили жесткие шесты под плитой. Чтобы поднять свободный конец такого жесткого шеста, вы должны приложить к нему силу, направленную вверх и почти равную по величине половине веса плиты. Действительно, когда каменную плиту поднимают на одном шесте, она перестает касаться всех остальных шестов и, соответственно, опираться на них. Таким образом, рабочим пришлось бы принимать на себя весь этот колоссальный вес.

А когда под блоком проложены гибкие шесты, можно в одиночку поднять конец любого шеста, применив силу, значительно меньшую веса блока. Действительно, когда поднят конец гибкого шеста, блок не теряет контакта с остальными шестами и они продолжают его поддерживать.

Чтобы поднять блоки на пирамиду, строители, возможно, использовали глиняные пандусы — либо прямые, с нужной стороны пирамиды, либо спиральные, вокруг всей пирамиды. Бригада строителей могла тащить блок на веревках по такому пандусу, поливая его водой, чтобы уменьшить трение между его поверхностью и блоком. Чем меньше уклон пандуса, тем меньшую силу необходимо прикладывать, чтобы втащить камень, а следовательно, требуется и меньше строителей. Однако каким бы заманчивым ни казалось это объяснение, мы понимаем, что те пандусы должны были быть страшно длинными (до 1,5 км в длину), а перетаскивание огромной плиты по спиральному пандусу, опоясывающему пирамиду, — процесс и долгий, и опасный.

Более правдоподобно другое объяснение: скорее всего, блоки втягивали непосредственно на нужную

грань пирамиды на салазках (рис. 1.21а). Когда очередной уровень пирамиды был выложен, строители шлифовали внешнюю поверхность уложенных блоков, то есть делали ее гладкой, и салазки хорошо скользили по ней. Кроме того, их полозья смачивались водой, и трение становилось совсем маленьким. Расчеты показывают, что бригада из 50 человек могла поднять не очень тяжелый блок за несколько минут. Такими темпами пирамиду могли возвести в те сроки, о которых говорят историки. Можно было бы справиться еще меньшими силами, если бы египтяне догадались перекинуть веревку на противоположную сторону пирамиды через строительную площадку наверху, привязали бы к концу веревки другие салазки и посадили бы в них людей (рис. 1.21б). Эти салазки служили бы противовесом. Как только строители сдвигали салазки с плиты с места, салазки на противоположной грани пирамиды помогали бы тащить их к вершине. В этом методе есть еще одно преимущество: когда блок поднят, салазки-противовес оказываются на земле, и их можно опять нагружать.

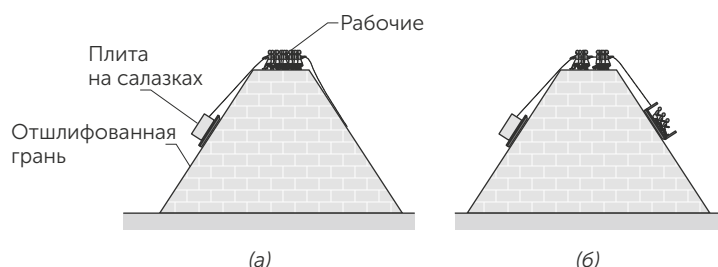


Рис. 1.21 / Задача 1.64. Два варианта подъема каменной плиты на пирамиду.

### 1.65 • ИГРУШКА-ПРУЖИНКА СЛИНКИ

Слинки — известная игрушка-пружинка, которую можно заставить спускаться по лестнице (точнее сказать, кувыркаться вниз по лестнице). Вы ставите игрушку на верхнюю ступеньку, оттягиваете верхнюю часть пружинки вверх, опускаете ее на следующую ступеньку и отпускаете игрушку. Если высота ступенек правильно подобрана, слинки сама спустится по ступеням до конца пролета. Время, которое понадобится игрушке для спуска на один пролет, зависит от количества шагов, которое она сделает (можно настроить ее так, чтобы она спускалась через две ступени за раз), но не зависит от высоты каждой ступени. (И с высокой, и с низкой ступеньки слинки спускается за одно и то же время.) Как слинки спускается с лестницы?

**ОТВЕТ** • Когда вы вытягиваете пружину сначала вверх, а потом опускаете на следующую ступеньку, вы пускаете по длине пружинки волну. Когда волна начинает распространяться по пружинке, витки сначала поднимаются вверх, а потом по дуге пружинки спускаются вниз — на нижнюю ступеньку, и постепенно туда переходит все больше витков. Когда волна дойдет до последних витков, оставшихся на верхней ступеньке, их с достаточно большой скоростью протащит по дуге, они перелетят над второй ступенькой и (если размеры ступеньки подобраны правильно) остановятся на третьей. После этого процесс повторится.

Кувыркаться вниз по ступенькам (причем достаточно медленно, так что вы видите этот неторопливый спуск) слинки может за счет прямоугольного сечения провода, из которого сделана пружинка. Для этой конструкции, запатентованной в 1947 году Ричардом Джеймсом, характерно меньшее отношение жесткости пружины к ее массе по сравнению с такой же пружинкой, сделанной из провода с круглым сечением. Меньшее значение этого отношения приводит к тому, что волна, которую вы пускаете вдоль длины пружины, распространяется с меньшей скоростью. Пластмассовые слинки, у которых другое значение этого отношения и, соответственно, другая скорость распространения волны, кувыркаются с вдвое меньшей скоростью, чем первые слинки, сделанные из металла.

Но в любом случае время для спуска слинки на одну ступеньку определяется отношением жесткости пружинки к ее массе, а не высотой ступеньки. На невысоких ступеньках волна распространяется медленно, на высоких — быстрее, но время, требуемое для пробега волны по всей длине растянутой пружинки, одинаково для обеих ступенек.

### 1.66 • НАКЛОННАЯ БАШНЯ

Поставим друг на друга на край стола книги, костяшки домино, карты, монетки или другие одинаковые плоские предметы так, чтобы стопка свисала с края стола. Как нужно расположить эти предметы, чтобы при заданном их количестве длина навеса (расстояния по горизонтали от края стола до края самой выступающей части стопки) была максимальной? Предположим, что вы укладываете костяшки домино длиной  $L$ . Сколько нужно костяшек, чтобы навес был равен  $L$ ? А  $3L$ ?

У вас есть комплект из 28 костяшек домино. Постройте арку между двумя столами одинаковой высоты. Что нужно сделать, чтобы арка была максимально длинной?

Кубики «лего» — это игрушечные пластмассовые параллелепипеды. На одной из широких сторон детали сделано четыре углубления, а на противоположной стороне находятся четыре небольших штырька. Одну деталь можно соединить с другой так, чтобы четыре штырька первой вошли в соответствующие отверстия второй, а можно и так, чтобы верхняя деталь была сдвинута на половину длины, то есть только два ее штырька вошли в два отверстия нижнего. Пусть  $x$  — половина длины грани детали, а  $n$  — количество деталей. Сколько различных типов устойчивых (не падающих без поддержки) башен можно собрать из этого количества деталей?

Рассмотрим башню, в которой каждая деталь, за исключением самой нижней, установлена либо прямо над предыдущей, либо сдвинута вправо относительно предыдущей. Какое минимальное количество деталей нужно взять, чтобы навес всей стопки был равен, скажем,  $4x$ ? Есть ли более рациональный способ укладки в стопку при том же самом навесе?

**ОТВЕТ •** Стопка находится в равновесии, если вертикальная линия, проведенная через ее центр масс, не выходит за границы стола. Таким образом, чтобы добиться наибольшего навеса, нужно, чтобы эта вертикаль проходила через самый край стола. Один из способов получить большой навес основан на гармонических рядах (рис. 1.22а). Допустим, мы строим башню из костяшек домино. Чтобы уравновесить костяшку, нужно положить ее так, чтобы ее центр приходился на край стола, и тогда получим навес, равный  $L/2$ . Потом положим на нее следующую костяшку и сделаем так, чтобы общий центр масс двух костяшек приходился на край стола. Навес теперь будет равен  $(L/2)(1 + 1/2)$ . Потом положим на них третью костяшку и уложим стопку так, чтобы центр масс трех костяшек приходился на край стола. Новый навес будет равен  $(L/2)(1 + 1/2 + 1/3)$ . Когда башня будет построена из  $n$  костяшек домино, навес башни будет равен  $(L/2)(1 + 1/2 + 1/3 + \dots + 1/n)$ , где выражение в скобках — гармонический ряд. Приведу несколько результатов.

Навес	Количество костяшек в башне
$L$	4
$2L$	31
$3L$	227
$4L$	1674

Теоретически в этой последовательности нет предела (навес пропорционален логарифму количества

костяшек в башне — его можно сделать любым), есть только предел, задаваемый здравым смыслом.

Более рациональный метод состоит в том, чтобы на выступающие за кромку стола костяшки сверху ставить другие костяшки так, чтобы они служили противовесом. Укладывая в стопку четыре костяшки домино первым способом, можно обеспечить навес чуть больше  $L$  (рис. 1.22б), а вторым — с помощью всего 63 костяшек можно получить навес, равный  $3L$ .

Использование метода противовесов помогает и в сооружении арки из 28 костяшек. Если левая и правая части арки уравновешены, пролет может составить  $3,97L$ . Существует по крайней мере один метод строительства арки, при котором обе стороны ее не уравновешены, а пролет равен примерно  $4,35L$ .

Все навесы и арки можно сделать еще длиннее, если укладывать костяшки так, чтобы перпендикулярны к кромке стола были не длинные их стороны, а диагонали.

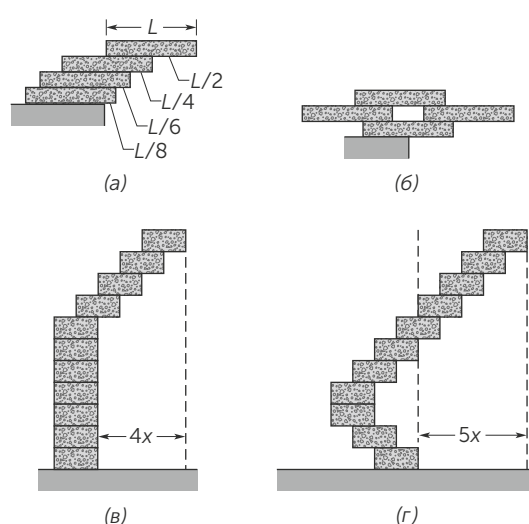


Рис. 1.22 / Задача 1.66. Башни из костяшек домино (а)–(б) и деталей «лего» (в)–(г).

Из трех деталей «лего» можно построить пять разных типов башен (зеркально-симметричные варианты исключаются), и четыре из них абсолютно устойчивы. Одна башня ограниченно устойчива — легчайший толчок обрушит ее, поскольку центр масс лежит на линии, проходящей через край нижнего кубика. Максимальный навес в ограниченно устойчивой башне равен длине детали, то есть  $2x$ , а для других трех башен — половине длины детали, то есть  $x$ . Для наиболее устойчивой — вертикальной — башни (когда детали просто стоят друг на друге) навес равен нулю.

Правила, по которым можно строить наклонную башню, определяют выбор нужной стратегии для получения максимального навеса. Допустим, они таковы, что вы не рассматриваете ограниченно устойчивые башни и должны либо просто ставить одну деталь на другую, либо укладывать ее только со сдвигом вправо. Тогда наиболее экономный метод строительства состоит в том, чтобы все детали, кроме верхних, просто ставить друг на друга — так, чтобы они образовали фундамент для «лестницы», идущей вправо. Например, чтобы получить навес в две длины детали ( $4x$ ), вам понадобится минимум 11 деталей, из которых четыре верхних укладываются ступеньками (рис. 1.22в). Чтобы получить навес в  $nx$ , вам понадобится минимум  $0,5n(n + 1) + 1$  деталей, из которых  $n$  верхних образуют лестницу. (Для постройки ограниченно устойчивой башни можно убрать часть нижних деталей.)

Чтобы построить башню с заданным навесом и при этом использовать меньшее количество деталей, сначала укладывайте их со сдвигом влево, а потом вправо. Например, из 11 деталей можно построить устойчивую башню с навесом в  $2,5$  длины детали, то есть  $5x$  (рис. 1.22г).

### 1.67 • ПАДАЮЩАЯ ПИЗАНСКАЯ БАШНЯ

Знаменитая башня в итальянском городе Пиза начала крениться на южную сторону еще во время строительства, которое растянулось на два века. А когда наконец дело дошло до самой звонницы, ее поставили вертикально в надежде приостановить дальнейший наклон всей башни.

Пизанскую башню закрыли для туристов на многие годы после того, как упала башня в Падуе, убив при этом четырех человек. Но действительно ли знаменитая падающая башня была на волосок от падения? Максимальный угол ее наклона составил чуть более  $5^\circ$ , и хотя наклон с каждым годом увеличивался, этот прирост не превышал  $0,001^\circ$  в год. Разве башня может упасть, если ее центр масс находится над основанием? А у Пизанской башни он бы вышел за его границы еще не скоро.

**ОТВЕТ •** Хотя наклон башни всегда был небольшим и проекция ее центра масс не покидала центральной части фундамента, перед недавно проводившимися реставрационными работами выяснилось, что наклон вызвал увеличение нагрузки на южную стену. Это увеличение привело к чудовищному давлению на нижние секции этой стены, а это угрожало тем, что стена могла выпятиться наружу и рухнуть. Опасность

возрастала еще и из-за того, что спиральная лестница проходила по внешней стороне башни, а это уменьшало прочность всей конструкции. Наклон возник из-за рыхлости почвы под башней, и ситуация ухудшалась после каждого ливня. Чтобы стабилизировать башню и слегка уменьшить наклон, инженеры соорудили под башней дренажную систему для отвода воды и вынули грунт из-под северной части башни.

### 1.68 • ЭФФЕКТ ДОМИНО

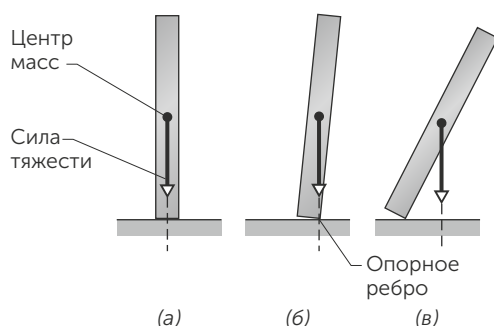
Как только первая костяшка домино из длинного ряда стоящих вертикально на одинаковом расстоянии друг от друга костяшек упадет на соседнюю, падения распространятся, как волна, по всему ряду. Сколько костяшек будет находиться в движении в каждый произвольный момент времени уже после того, как волна пошла, и чем определится скорость распространения этой волны? Расстояние между костяшками, естественно, не должно превышать длину каждой из них. А есть ли еще какой-то параметр, определяющий минимальное расстояние? Почему детские кубики не падают так же, как костяшки? Возникнет ли цепная реакция в ряду костяшек, если первая костяшка маленькая, а каждая следующая больше предыдущей в некоторое количество раз?

**ОТВЕТ •** Стоящая вертикально костяшка имеет два положения *равновесия*. Одно из них — когда костяшка стоит на меньшей грани вертикально (рис. 1.23а), а другое — когда она повернулась на небольшой угол относительно этого положения и ее центр масс находится как раз над ребром, на котором костяшка стоит (рис. 1.23б). В обоих положениях сила тяжести, которая, как мы предполагаем, приложена в центре масс костяшки, проецируется на основание костяшки. Однако про второе положение говорят, что в нем костяшка находится в положении *неустойчивого равновесия*. Действительно, любое малейшее воздействие выводит костяшку из этого положения, поскольку проекция силы тяжести сдвигается влево или вправо от ребра костяшки. Если она сдвигается вправо, как на рис. 1.23в, костяшка опрокинется.

Когда вы ударяете по первой костяшке в ряду, она пролетает через положение неустойчивого равновесия и падает плашмя на следующую. Если вы просто слегка подтолкнете первую костяшку, энергия от ее падения пойдет на выведение второй костяшки из равновесия. Если расстояние между костяшками мало, время падения на вторую костяшку и переданная ей энергия



слишком малы, чтобы уронить и ее. Падение более вероятно при большем расстоянии — конечно, если оно не превышает длины костяшки. То же касается и остальных костяшек в ряду. (Конечно, вы могли бы как следует врезать по первой костяшке и не заботиться о соблюдении нужного расстояния между костяшками, но это будет неспортивно.)



**Рис. 1.23 / Задача 1.68.** Костяшки домино проходят через положение неустойчивого равновесия.

В каждый произвольный момент времени в движении может участвовать пять или шесть костяшек. Волна набирает скорость по мере ее движения вдоль ряда костяшек, и эта скорость приближается к определенному значению, зависящему от расстояния между костяшками, трения между ними и того, как одна из них отскакивает от другой. Когда расстояние меньше, волна движется быстрее, и высота звука, издаваемого костяшками при падении, выше.

Профессор Лорн Вайтхед из Университета Британской Колумбии однажды описал, как цепная реакция распространяется по ряду костяшек домино, если все ребра каждой следующей костяшки в 1,5 раза больше, чем у предыдущей. Он опрокинул первую костяшку, «толкнув ее длинным тонким ватным жгутиком», а к моменту, когда опрокинулась тринадцатая костяшка, энергия в этой цепной реакции возросла в 2 миллиарда раз. Он посчитал, что в более длинном ряду таких же костяшек понадобилось бы только 32 штуки, чтобы снести «костяшку» размером с Эмпайр-стейт-билдинг. (Такого не сделал бы и Кинг-Конг.)

### 1.69 • ПАДАЮЩИЕ ТРУБЫ, КАРАНДАШИ И ДЕРЕВЬЯ

Когда падает высокая труба, вероятнее всего, она где-то треснет. Что вызывает появление разлома, где он возникает, и как труба согнется после того, как треснет (рис. 1.24а)? Вы можете проверить правильность ответа, опрокинув башенку из детских кубиков

и проследив за тем, как эта башенка изогнется во время падения. А еще можно составить башенку из полых коротких цилиндров, которые удерживаются вместе эластичными нитками, пропущенными внутри, и опрокинуть ее.

Если вы поставите карандаш вертикально на острый конец и отпустите, то куда будет двигаться заостренный конец — в направлении падения или в противоположном направлении?

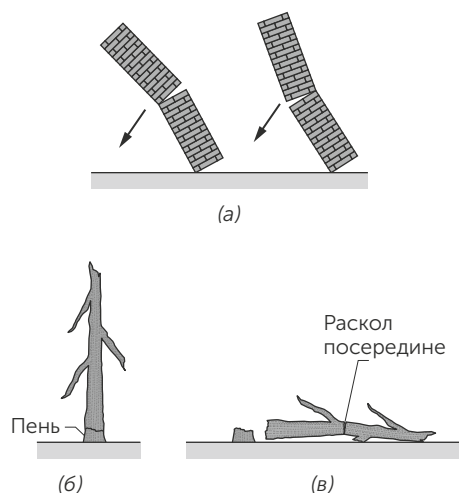
Когда падает дерево, в каком направлении движется нижняя его часть и какую форму принимает дерево в процессе падения? Сломается ли дерево так же, как труба? Почему иногда кажется, что непосредственно перед ударом о землю дерево парит? Почему комель дерева иногда ударяет по пню так сильно, что вырывает его с корнем?

(Представьте, что вы оказались в лесу, как настоящий лесоруб срубили свое первое большое дерево и наблюдаете за его падением. Вы хорошо образованны и знаете, куда должно упасть дерево, поэтому встали с противоположной стороны. Но после того, как ствол с грохотом ударяется о землю, он отскакивает в вашу сторону, ударяет в грудь и ломает три ребра. Дерево вам отомстило — хватит играть в лесоруба.)

**ОТВЕТ •** Когда труба начинает поворачиваться вокруг своего основания, нижняя часть стремится повернуться быстрее, чем верхняя, и труба изгибается назад. Если труба представляет собой однородный цилиндр, наибольшая деформация сдвига возникает на уровне трети высоты, и, скорее всего, труба надломится именно там. Если труба имеет какую-нибудь другую форму, она надломится в каком-то другом месте. Трещина начнет распространяться по периметру трубы от направления падения (так изображено на правом рисунке), но сжатие с противоположной стороны сдвинет трещину немного вниз. Иногда, если верхняя часть трубы попытается проскользнуть назад по нижней части и надавит на ее верхнюю поверхность, стремясь подтолкнуть ее, может образоваться второй разлом ниже первого.

Когда стоящий на заостренном конце грифеля карандаш падает, направление, в котором движется этот конец, зависит от трения между грифелем и поверхностью, на которой он стоит. Если трение мало, карандашный грифель движется в направлении, противоположном падению. Если трение больше, грифель будет двигаться в сторону падения, даже если сначала он сдвинулся в противоположную сторону.

Срубленное дерево согнется назад, как труба, но сломается, только если оно мертвое и высохшее. Если оно сломается в начале падения, нижняя часть упадет в одну сторону, а верхняя может упасть в противоположную. Если вы будете поблизости, то можете пострадать. Если вы сделаете клиновидный выруб на живом дереве, а затем с противоположной стороны дерева сделаете тонкий горизонтальный почти сквозной пропил, дерево упадет в сторону выруб, сломает перемышку, подкинёт комель дерева вверх и протащит его в направлении падения. Если у дерева много веток, при ударе о землю они сожмутся, а потом с силой распрямятся и могут забросить комель обратно на пенек. Впечатление, что дерево перед ударом о землю парит, создается из-за сильного сопротивления воздуха при падении дерева, покрытого листвой.



**Рис. 1.24 / Задача 1.69.** а) Как ломается труба при падении? Старое дерево перед падением (б) и в момент, когда вершина дерева ударяется о землю и оно разваливается на две половины (в).

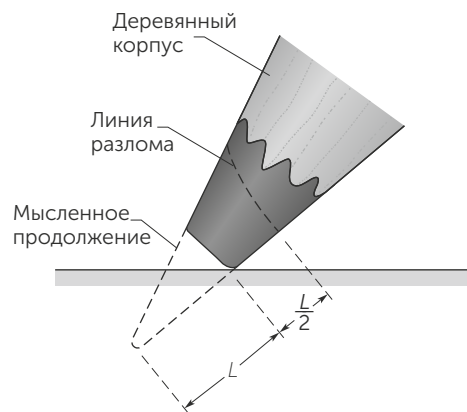
Иногда некоторые деревья при ударах о землю раскалываются на кусочки. Если дерево сломалось (скажем, из-за сильного ветра) невысоко от земли (рис. 1.24б), первой ударится о землю его верхушка. В этом случае при падении ствол может расколоться на две части (рис. 1.24в). Более короткий отрезок ствола ударится о землю чуть позже и тоже расколется пополам. Прежде чем последний кусок упадет и ударится о землю, части ствола дерева могут расколоться пополам несколько раз.

## 1.70 • ПОЧЕМУ ЛОМАЮТСЯ ЗАТОЧЕННЫЕ КАРАНДАШНЫЕ ГРИФЕЛИ

Когда я увлеченно пишу что-то, грифель деревянного карандаша часто ломается. Где именно он ломается? Почему грифель скорее сломается, если он хорошо заточен, чем если им много писали и он затупился?

**ОТВЕТ •** Когда вы пишете карандашом, вы держите его в руке под углом и нажимаете на заостренный грифель, создавая усилие, а оно стремится согнуть не закрытую деревянным корпусом часть карандашного грифеля, растягивая нижнюю часть (ту, которая касается бумаги) и сжимая верхнюю его часть. Грифель менее устойчив к растяжениям, чем к сжатиям, поэтому сначала трещина возникает в нижней части. По мере того как трещина стремительно распространяется по толщине грифеля вверх, одна половина сломанного грифеля пытается сдвинуться относительно другой, и трещина может дойти до деревянного корпуса.

Трещина возникает в месте, где усилие по растяжению нижней части грифеля максимально. Чтобы найти это место, мысленно дополним видимую часть грифеля до конуса (рис. 1.25). Если длина отсутствующей части направляющей конуса равна  $L$ , трещина возникнет на расстоянии  $L/2$  от настоящего конца грифеля, или на расстоянии  $3/2L$  от вершины воображаемого конуса. Этот факт означает, что трещина пойдет от того места, где диаметр грифеля будет равен  $3/2$  диаметра затупленного кончика грифеля. Этот результат вы можете проверить, если не пожалеете на эксперимент нескольких карандашей. (Вы должны проделать это тайно, поскольку один из признаков ненормального поведения — ломать карандаш за карандашом.)



**Рис. 1.25 / Задача 1.70.** Линия разлома на грифеле карандаша.

Если карандаш только что заточен, изгиб возникает близко к острию, и требуется лишь небольшое усилие, чтобы трещина пошла. Если конец уже затупился, максимальный изгиб возникнет дальше от кончика грифеля — там, где грифель толще, поэтому нужно сильнее надавить на карандаш, чтобы он сломался. В этом случае шансы сломать карандаш при обычной манере письма будут ниже. Если грифель настолько тупой, что точка максимального изгиба лежит внутри деревянного корпуса, то это уже другой случай, не имеющий отношения к настоящему исследованию. И в этом случае грифель может сломаться, только если вы ударите им по поверхности бумаги (и окончательно убедите окружающих, что с вами что-то не в порядке).

### 1.71 • ОБРУШЕНИЕ МОСТА

Гринвич, штат Коннектикут, США, 28 июня 1983 года, 1 час 28 минут ночи. Тридцатиметровый мост, по которому проходит шоссе I-95, связывающее разные штаты, обрушивается. В темноте водители двух легковых машин, трейлера, перевозившего трактор, и еще одной фуры вовремя не разглядели провала на месте обрушившейся секции моста и рухнули с высоты 20 м в реку. Трое погибли, трое ранены.

Мосты иногда обрушиваются от ветхости или из-за не проведенного вовремя ремонта, но этот мост был в порядке. Могло ли привести к трагедии что-нибудь в его конструкции или особенности движения по мосту автомобилей?

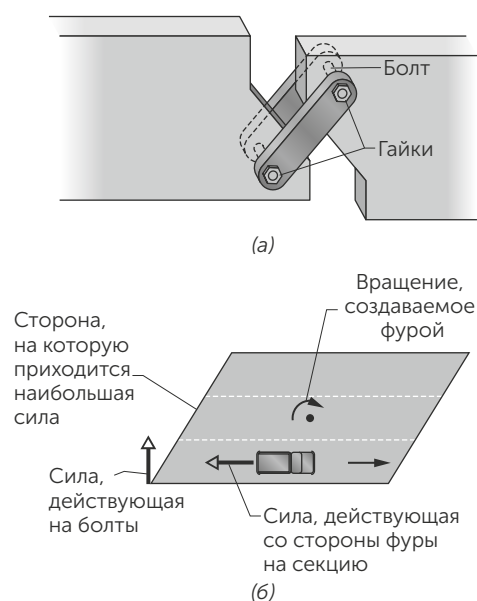
Вот некоторые подсказки. Из-за того, что шоссе подходит к реке под углом, секции моста были сделаны в форме ромба. Каждая секция крепилась с двух сторон. С южного конца обрушившейся секции она крепилась с помощью двух болтовых соединений, по одному на каждом углу (рис. 1.26а). Каждое из этих соединений состояло из двух стальных пластинок с отверстиями, в которые были вставлены стальные болты. На оба конца каждого болта были накручены и заварены мощные гайки.

Такой способ соединения дает секциям моста некоторую свободу движения и позволяет гасить вибрации, возникающие при движении транспорта по мосту, а также делает конструкцию устойчивой к температурным колебаниям, из-за которых меняется длина конструкций. Очевидно, одна из гаек в соединении на дальнем от центра секции углу проржавела, и болт выпал из пластинки, в результате чего из-за перегрузки

не выдержали соединения на остальных углах и секция упала в реку. Какая боковая сила заставила болт выпасть? К ответу стоит отнестись с вниманием, если мы хотим избежать подобных катастроф.

**ОТВЕТ** • Рассмотрим фуру, проезжающую секцию моста по крайней полосе. Чтобы фура двигалась с определенной скоростью, ее шины должны постоянно отталкивать назад поверхность моста, создавая секции вращающий момент относительно ее центра (рис. 1.26б). Усилия, направленные на вращение секции, приводят к возникновению боковой силы, приложенной к обоим парам крепежных болтов и гаек на одной стороне секции, но величина этой силы максимальна в одном — дальнем — углу, поскольку расположенные там болты находятся на наибольшем расстоянии от центра.

Постоянные колебания и напряжения раскочаили соединение, одна из гаек слетела с болта, в результате колебаний болт выпал из крепежа, и угол секции свободно повис. Без этого болта остальные точки крепежа оказались перегруженными, и секция упала. Если бы секция была прямоугольником, а не ромбом, усилие распределилось бы равномерно между четырьмя углами и разрушения крепежа на одном углу, скорее всего, не случилось бы.



**Рис. 1.26 / Задача 1.71.** а) Болтовое соединение, удерживающее пролет моста. б) Вращение, которое пытается создать движущаяся фура.

### 1.72 • КРУШЕНИЕ ПОЕЗДА

Когда локомотив сталкивается с каким-нибудь массивным препятствием и сходит с рельсов, почему локомотив и вагоны отбрасывает по разные стороны железнодорожного полотна, а не в одну сторону? Почему это происходит только с несколькими первыми вагонами?

**ОТВЕТ •** Предположим, что локомотив столкнулся с массивным предметом, частично перегораживающим рельсы и лежащим на рельсах несимметрично. Разложим силу, действующую на локомотив, на две части: составляющая силы, параллельная рельсам, замедляет движение локомотива, а составляющая силы, перпендикулярная рельсам, стремится столкнуть локомотив с рельсов в какую-то одну сторону. Эта перпендикулярная составляющая стремится также повернуть локомотив вокруг его центра масс. Предположим, передняя часть локомотива съехала вправо от рельсов. Тогда из-за вращения задняя часть локомотива смещается от рельсов влево. Поскольку задняя часть локомотива прикреплена к первому вагону, она отъедет влево не так далеко, как передняя часть — вправо.

Поскольку передняя часть первого вагона смещается влево, он стремится повернуться вокруг своего центра масс, поэтому задняя его часть съедет вправо от рельсов. Но поскольку первый вагон прикреплен ко второму, передняя часть второго вагона тоже сдвигается вправо. Однако этот сдвиг меньше, чем сдвиг локомотива или передней части первого вагона. И так далее.

### 1.73 • УДАРЫ В БОУЛИНГЕ

В боулинге участвует 10 кеглей (рис. 1.27). Как нужно бросить шар, чтобы шансы выбить *страйк* — удар, при котором падают все кегли, — были максимальными? Новички в игре в боулинг стремятся ударить в головную (центральную переднюю) кеглю, направляя шар по центральной линии дорожки, но профессионалы бросают шар с одной стороны дорожки и придают ему боковое вращение. Со стороны кажется, что в какой-то точке дорожки (брейк-пойнт) шар совершает брейк, или хук (то есть резко изменяет траекторию своего движения), и потом летит на кегли по косяй траектории. В идеале шар должен подкатиться к строю кеглей (треугольнику, составленному из 10 кеглей), коснувшись одной стороны головной кегли, и попасть в так называемый карман (обычно правой части, если шар запущен с правой стороны дорожки).

Этот брейк — реальный или воображаемый? Действительно ли прием профессиональных игроков, состоящий в том, что шар запускается под углом по дорожке, гарантирует успех?

**ОТВЕТ •** Выбить страйк при стратегии, используемой новичками, трудно по крайней мере по двум причинам. Шар может сбить ряд кеглей, но крайние кегли справа и слева от шара останутся стоять. Если шар слегка отклонится от центральной линии, при столкновении с головной кеглей он может ударить ее сбоку с такой силой, что участники столкновения отлетят в стороны, не задев все остальные кегли, и те останутся стоять.

Но если шар подлетает к кеглям под углом через карман, его мощный отскок гораздо менее вероятен и он собьет большее количество кеглей. Если шар летит под углом в несколько градусов по отношению к центральной линии и если он правильно ударит головную кеглю сбоку, внешние кегли по обеим сторонам треугольника упадут, как костяшки домино. После этого шар ударит две кегли внутри треугольника, и они попадают друг на друга.

Угол, под которым шар подлетает к карману, зависит от соотношения бокового подкручивания и направленной вперед составляющей скорости в момент удара, а также от увеличения трения при движении шара по дорожке. Обычно первые 50% дорожки смазываются специальным маслом, чтобы уменьшить трение. Запущенный шар скользит первую часть пути, двигаясь по криволинейной траектории. Когда он начинает катиться без проскальзывания, траектория выпрямляется. Хук — сильно искривленная часть траектории, крюк, который делает шар перед тем, как начнет катиться. Способность игрока в боулинг бросить шар по этой траектории зависит в первую очередь от изменения трения вдоль траектории шара, но на нее также влияет и то, что шар — не идеальная сфера: в нем сделаны углубления для пальцев.

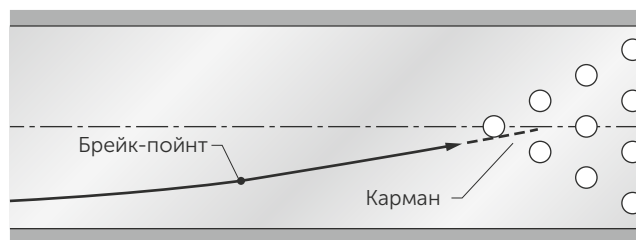


Рис. 1.27 / Задача 1.73. Траектория движения шара для боулинга.



### 1.74 • УДАРЫ В АМЕРИКАНСКОМ И ДРУГИХ БИЛЬЯРДАХ

Как должен ударить кий по битку, чтобы произошло следующее:

1. Шар сразу начнет крутиться без проскальзывания.
2. Шар направится прямо на покоящийся прицельный шар, а после соударения последует за этим шаром. Это накат, или удар *с протяжкой*.
3. Шар будет двигаться так же, как в предыдущем случае, но после соударения откатится обратно. Это удар *с оттяжкой*.
4. Шар будет двигаться так же, как в предыдущем случае, но после соударения прокатится немного, а потом остановится.

Когда кий ударяет по битку в некой точке вдоль линии пересечения поверхности шара с проходящей через центр шара вертикальной плоскостью и биток стучается о прицельный шар, каким будет угол между траекториями этих двух шаров? Если биток ударяется о борт бильярдного стола под определенным углом, под каким углом он отскочит? Если шар получил удар кием сбоку — по любую сторону от центральной вертикальной плоскости — и потом направляется на борт, как в этом случае изменится направление отскока?

При ударе *массе́* (обводящем ударе) биток обходит один шар как препятствие на пути к шару-мишени (рис. 1.28а). Как выполнить такой удар и как получается такая криволинейная траектория? (Этот удар в большинстве бильярдных запрещен, поскольку, промахнувшись, можно порвать кием суконное покрытие стола.)

Почему высота борта всегда составляет  $7/5$  радиуса шара?

**ОТВЕТ •** Во всех четырех случаях первого вопроса кий ударяет по битку в какой-то точке на линии пересечения поверхности шара с вертикальной плоскостью, проведенной через центр шара. В первом и четвертом случаях удар производится на высоте  $7/5R$  (то есть выше центра на величину  $2/5R$ ). Во втором случае кий ударяет биток в какой-то другой точке, лежащей выше центра, а в третьем — в какой-то точке ниже центра.

Ответы зависят от того, какое вращение кий придал шару. Если биток ударяют на высоте  $7/5R$ , то при таком ударе у мяча возникает достаточно сильное верхнее вращение — *топспин* — и он покатится вперед по столу без проскальзывания. Если затем биток ударит прицельный шар, энергия движения битка

передастся прицельному шару и биток останется вращаться на месте до тех пор, пока энергия вращательного движения целиком не перейдет в тепловую из-за трения шара о поверхность. (Трение направлено вперед и может заставить биток некоторое время двигаться в этом направлении до тех пор, пока шар не прекратит вращаться.)

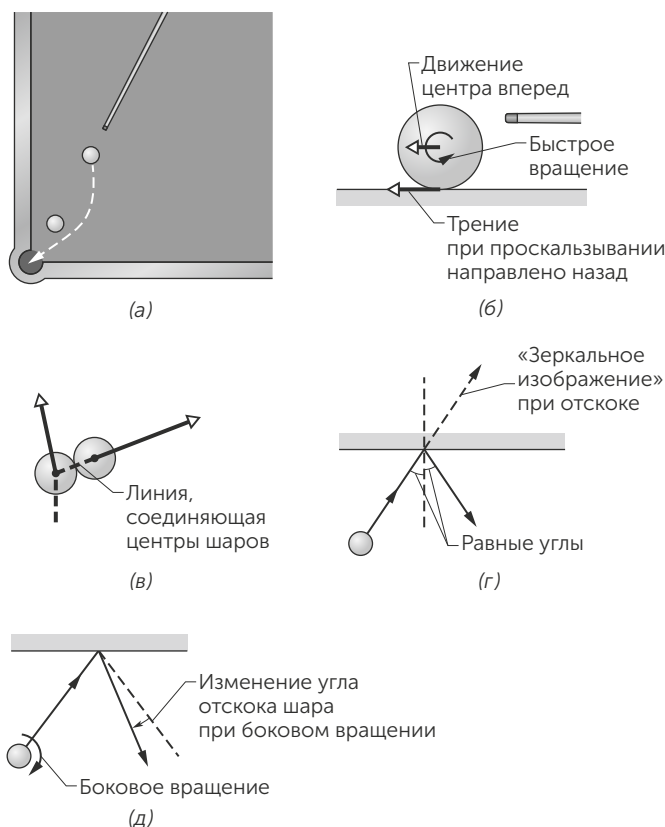
Если же кий ударит по шару в каком-то другом месте выше центра, биток двинется вперед, тоже вращаясь, но скорость вращения окажется слишком большой, поэтому шар вначале будет проскальзывать. При проскальзывании возникнет трение, оно со временем синхронизирует вращение с движением вперед, после чего биток плавно покатится вперед.

Допустим, вы ударите по шару на высоте больше  $7/5R$ . Тогда он будет вращаться слишком быстро, чтобы двигаться вперед, поэтому его нижняя точка будет проскальзывать назад, в результате чего возникнет трение, направленное вперед (рис. 1.28б). Трение будет замедлять вращение и увеличивать скорость движения вперед до тех пор, пока шар не начнет катиться равномерно. Если биток перед этим ударит прицельный шар, он передаст тому свой импульс, направленный вперед, а сам короткое время будет вращаться на месте, но сильное трение заставит его покатиться за прицельным шаром.

Если же ударить биток ниже центра, нижнее вращение — *бэкспин* — закрутит его в неправильном направлении и плавного качения не возникнет. Направленное назад сильное трение вскоре изменит направление вращения и замедлит движение битка вперед — и только тогда биток покатится вперед равномерно. Если до этого биток ударится в прицельный шар, он передаст ему все количество поступательного движения вперед, а сам будет некоторое время вращаться на месте, пока сильное трение не заставит его покатиться обратно в вашу сторону.

Когда биток ударяет прицельный шар под скользящим углом, тот отлетает в сторону вдоль линии, которая проходит через центры двух шаров в момент соударения (рис. 1.28в). Сам биток отскакивает в другую сторону. Обычно считается, что угол между траекториями после соударения равен  $90^\circ$ , но это так, только если соударение приходится по самому краю прицельного шара. (Начальный участок пути битка сразу после столкновения в действительности искривлен из-за того, что шар начинает скользить по столу, но этот участок обычно слишком короток, чтобы его учитывать.)

Если биток катится к борту по прямолинейной траектории, не вращаясь вокруг вертикальной оси, угол, под которым он отскакивает от борта, равен углу падения (совсем как при отражении света от зеркала). Один из способов представить себе, куда отскочит шар, — вообразить, что мишень (луза или прицельный шар) лежит по другую сторону от борта, как раз на таком же расстоянии от него, что и настоящая мишень на столе (рис. 1.28г). Это напоминает изображение, которое мы видим «внутри» зеркала. Нужно направить биток на воображаемую мишень, и тогда он отскочит под правильным углом от борта, попав в мишень реальную.



**Рис. 1.28 / Задача 1.74.** а) Удар массе (обводящий). б) Высокий удар приводит к появлению направленной вперед силы трения. в) Удар под скользящим углом. Отскок от борта без бокового вращения (г) и с левым боковым вращением (д).

Однако если при ударе по шару ему придать боковое вращение, то есть если выполнить удар под названием боковик, или винт (шар при таком ударе закручивается не только вокруг горизонтальной, но и вокруг вертикальной или наклонной оси), угол отскока изменится. Боковое вращение шару можно придать, если

биток ударить кием слева или справа от центральной линии. Левый с вашей точки зрения боковик (шар ударили по левой стороне) при отскоке вращается по часовой стрелке (рис. 1.28д), а правый — против часовой.

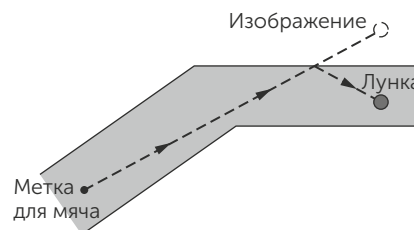
Чтобы выполнить удар массе, нужно ударить шар кием сверху вниз по боковой поверхности. Удар заставит шар вращаться как при комбинации ударов — с оттяжкой и боковика. При этом ударе шар отправится в одном направлении, но трение, возникающее при вращении шара, искривит траекторию.

Высота борта выбирается таким образом, чтобы столкновение шара с ним не вызывало скольжения и потери энергии на трение, а сразу после соударения шар катился бы плавно.

### 1.75 • МИНИ-ГОЛЬФ

В игре мини-гольф мяч для гольфа при ударе может двигаться вдоль небольшого изогнутого трека, ограниченного невысокими стенками. Цель, естественно, состоит в том, чтобы загнать мяч в лунку с помощью как можно меньшего количества ударов. Часто лунка лежит за неким барьером или углом трека, и, чтобы оптимальным способом загнать туда мяч, игрок должен ударить по нему так, чтобы он отскочил от стенки. Как нужно направить мяч, чтобы тот с одного удара попал в лунку?

**ОТВЕТ •** Когда мяч в гольфе отскакивает от стенки, это очень напоминает отражение светового луча от зеркала: и в том, и в этом случае угол падения равен углу отражения. Тогда представим, что мячик — это луч света, и ударим по мячу так, чтобы он полетел к бортику и отразился от него, как от зеркала. Из рис. 1.29 видно, как мяч нужно направить на стенку, чтобы он попал в лунку. Представьте себе, что стенка — это зеркало, в котором отражается лунка. Эта воображаемая лунка за бортиком находится на том же расстоянии от бортика, что и настоящая лунка. Если вы направите мяч в воображаемую лунку, он отразится от бортика и попадет в лунку реальную.



**Рис. 1.29 / Задача 1.75.** Вид сверху на трек для мини-гольфа с лункой.

Игроки, тренированные для гольфа (или бильярда, где практикуются такие же удары с отскоком), могут мысленно представить себе последовательность таких отскоков. Конечно, некоторые реальные обстоятельства, например шероховатость или наклон площадки или конкретные детали соударения с бортиком, могут помешать воплощению этого простого плана в жизнь, поэтому при игре в мини-гольф игрокам нужна и толика везения.

### 1.76 • ФОКУСЫ С МЯЧИКОМ-ПОПРЫГУНЧИКОМ

Если вы просто выпустите из руки мяч-попрыгунчик, он отскочит обратно и долетит почти до руки. А если вы бросите его вниз и даже закрутите его, куда он полетит?

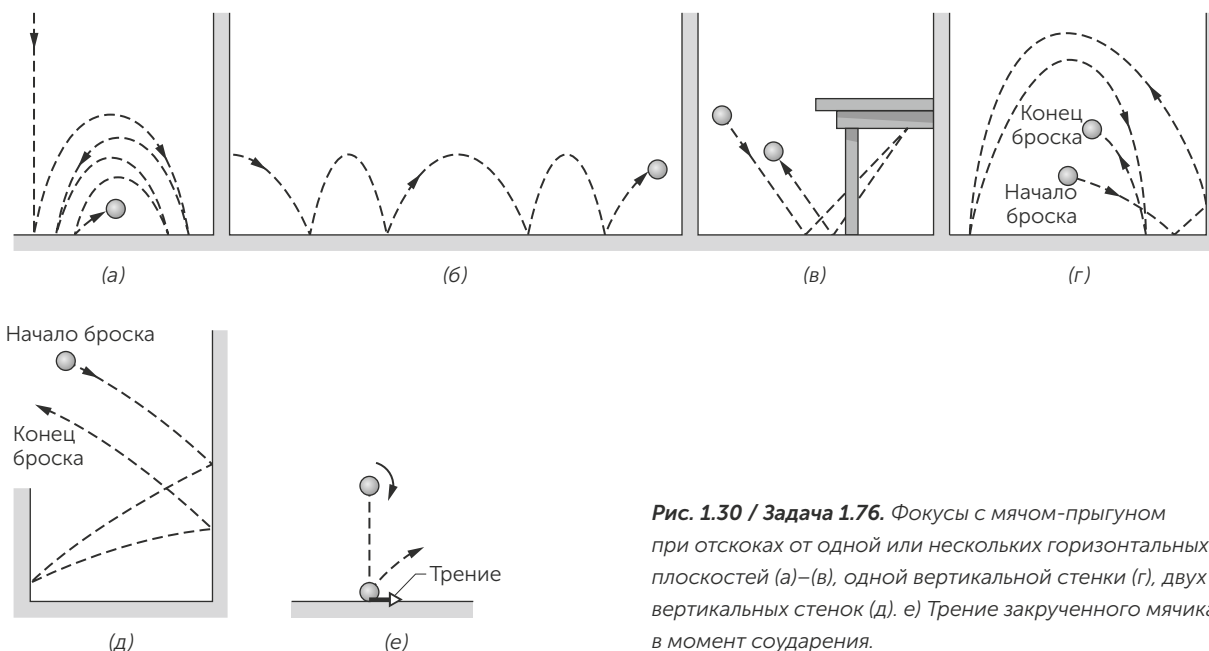
Если вы закрутите мяч с нижним вращением, на себя (*бэкспин*), и бросите вниз под углом, он будет скакать между двумя точками на полу (рис. 1.30а). Если вместо этого вы придадите мячу верхнее вращение, вперед и вверх от себя (*топспин*), мячик начнет прыжками удаляться от вас, причем длинные прыжки будут чередоваться с короткими (1.30б). Может показаться, что высоты прыжков тоже чередуются, но это иллюзия. Если вы бросите мяч с нижним вращением под стол с тем, чтобы он отскочил от нижней поверхности столешницы и продолжил прыгать под столом, он может не захотеть оставаться под столом и полетит к вам (рис. 1.30в). Если вы бросите мяч на одну из параллельных вертикальных стен, расположенных

близко одна к другой, мяч, вероятно, отскочит и полетит на вас (рис. 1.30г). Что означает такое странное поведение и почему этот мячик-попрыгунчик настолько прыгучее обычного резинового мяча?

**ОТВЕТ** • Когда мячик закручен, его неровная поверхность мгновенно зацепляется за пол, и возникшее при этом трение посылает мяч в непредсказуемом направлении. Трение еще и изменяет вращение, так что следующий прыжок мяча может быть совсем не похож на предыдущий.

Например, если мяч брошен строго вниз с закруткой по часовой стрелке, если смотреть с одной стороны, трение будет направлено вправо (1.30д). Во время соударения мяч также испытывает направленную вверх силу со стороны пола. Составляющая двух сил направит мяч вверх-вправо. А если вы бросите закрученный мяч вниз под углом, он может отскочить в сторону от вас, прямо вверх или назад на вас, в зависимости от направления и скорости закручивания, которые, в свою очередь, определяют направление и величину силы трения.

Иллюзия того, что высоты отскоков чередуются, возникает из-за разницы в крутизне траекторий между отскоками. Когда прыжки меняются с длинного на короткий, угол отскока тоже меняется. (Эта иллюзия так сильна, что я дважды в своих книгах написал, что, видимо, высоты все-таки чередуются, хотя только что уверял, что они не могут отличаться.)



**Рис. 1.30 / Задача 1.76.** Фокусы с мячом-прыгуном при отскоках от одной или нескольких горизонтальных плоскостей (а)–(в), одной вертикальной стенки (г), двух вертикальных стенок (д). е) Трение закрученного мячика в момент соударения.

Мячики-попрыгунчики отскакивают так хорошо из-за того, что при отскоке в них возбуждаются необычные колебания. Когда простой резиновый мяч ударяется о пол, сжатие его нижней части вызывает колебания, период которых зависит от материала, из которого сделан мяч. Есть вероятность, что этот период отличается от времени, в течение которого длится соударение, и тогда мяч продолжит колебаться и после того, как он отскочил от пола. На колебания расходуется энергия, так что у мяча, летящего вверх, остается меньше энергии, и он не может подпрыгнуть очень высоко.

А в мячике-попрыгунчике есть ядро и оболочка, сделанная из другого материала. При такой конструкции колебания возбуждаются иначе, и время, в течение которого длится первое колебание, соответствует времени соударения мячика с полом. Точно в момент, когда нижняя поверхность мячика распрямляется

и отталкивается от пола, колебание оболочки направлено наружу, от пола, а значит, оно помогает подкинуть мячик выше. В результате энергия колебаний вкладывается в движение вверх, и мяч подпрыгивает выше.

Чтобы определить направление, в котором отскочит закрученный мячик, нужно воспользоваться законами сохранения кинетической энергии и углового момента при отскоке. Вертикальная составляющая скорости просто меняет направление на противоположное. Горизонтальная составляющая в нижней точке тоже меняется на противоположную, но про нее что-то утверждать труднее, поскольку она зависит из горизонтальной скорости центра и скорости вращения мяча. Если вы векторно сложите вертикальную и горизонтальную скорости сразу после отскока, то сможете найти направление, в котором полетит отскочивший мяч.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 1.77 • СПОРНЫЙ МЯЧ

В финале чемпионата мира 1975 года по хоккею на траве индийская команда выиграла из-за того, что рефери засчитал за гол бросок, в котором мяч пересек линию ворот, ударился в правую вертикальную стойку ворот (которая была за линией ворот) и отрикошетил обратно на игровое поле (рис. 1.31 — это вид сверху, рисунок выполнен не в масштабе). Хотя подобный отскок маловероятен и уж точно случается крайне редко в матчах, такое может произойти, если мяч летит под определенным углом по направлению к воротам и при этом вращается. Если удар нанесен вблизи левой стороны ворот, такой отскок произойдет при меньшей скорости вращения. Если угол полета к воротам (угол между траекторией летящего мяча и линией ворот) превышает  $25^\circ$ , мяч обратно на поле отскочить не сможет. Никто не помнит точных деталей спора по поводу гола, но решение рефери звучало, по крайней мере, убедительно.

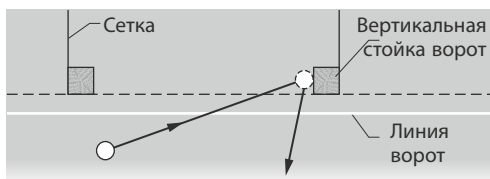


Рис. 1.31 / Задача 1.77. Вид сверху на поле для хоккея на траве и траекторию мяча, ударившегося о стойку ворот и отскочившего обратно на поле.

### 1.78 • ТЕННИС

В какую точку головы ракетки должен попасть теннисный мяч, чтобы: а) он отлетел с наибольшей скоростью, или б) при соударении с ним отдача в руку была наименьшей, то есть ручка ракетки как можно меньше стремилась бы вывернуться из руки, или в) колебания ракетки были наименьшими (и, значит, наименьшими были бы колебания ручки ракетки в руке)?

Влияет ли напряжение мышц руки, с которым вы сжимаете ручку, на скорость отскока мяча? Есть ли в действительности такие понятия, как «быстрый корт» и «медленный корт»?

**ОТВЕТ •** При ударе ракеткой по мячу нужно постараться ударить в некоторой точке, лежащей на продольной оси ракетки, и тогда не только у отбитого мяча будет большая скорость, но и ракетка не будет проворачиваться в руке. Но где именно на этой оси должен прийтись удар, зависит от типа ракетки и того, какую цель из перечисленных в вопросе вы преследуете. Каждая из зон на струнной поверхности, при использовании которой достигается одна из этих целей, называется *игровым пятном*. Поскольку цели разные, нужно уточнять, для какой именно цели это игровое пятно — лучшее.

Лучшее игровое пятно 1 — место, откуда мяч отлетает с наибольшей скоростью. Это место расположено близко к шейке ракетки, а не в центре головы, как можно было бы подумать. При попадании туда минимальны потери энергии во время соударения, когда и ракетка, и мяч деформируются, а потом возвращаются обратно



к первоначальному состоянию. Не вся энергия, затраченная на деформацию ракетки, возвращается мячу, поскольку тот отскакивает от струнной поверхности до того, как она расправляется полностью. Поэтому, чтобы минимизировать эти потери, мяч должен ударяться очень близко к шейке ракетки, где из-за близости ручки обод ракетки — самый жесткий. Однако потери энергии из-за деформации мяча немного сдвигают игровое пятно от шейки ракетки. Эти потери больше около самой шейки, где струны сильнее натянуты, и поэтому эта поверхность для мяча жестче, чем в центре. Таким образом, лучшее игровое пятно 1 должно было бы находиться рядом с шейкой ракетки, так как там ее жесткость больше, но из-за того, что там струны слишком натянуты, немного сдвигается к центру головы.

Лучшее игровое пятно 2 — область струнной поверхности, при ударе о которую не возникает отдача, то есть сила, действующая на руку со стороны ручки. Хотя удар стремится отбросить и ракетку, и руку назад, одновременно он пытается закрутить ракетку. Но при ударе в игровое пятно 2 отбрасывание руки назад компенсируется движением ручки ракетки вперед из-за ее закручивания. Если мяч попадет в какое-нибудь место, расположенное дальше от руки, чем игровое пятно 2, вращение ракетки будет стараться вырвать ручку из руки. Если удар придется на область, расположенную к руке ближе, чем игровое пятно 2, вращающаяся ручка ракетки будет вдавливаться в руку.

Игровое пятно 3 — это область, при ударе в которую в ракетке возникают лишь небольшие колебания (и, следовательно, в руку передаются тоже только небольшие колебания). Если удар приходится не в игровое пятно 3, ракетка в течение короткого периода времени будет колебаться и, возможно, сильно (как, например, это происходит при ударе палочкой о пластинки ксилофона).

Существует также игровое пятно 4 — оно выбирается из субъективных соображений, и каждый игрок по разным причинам считает, что именно им лучше всего отбивать мяч.

Хотя некоторые тренеры советуют игрокам во время удара ракеткой по мячу держать ее крепче, чтобы отбитый мяч летел как можно быстрее, исследования говорят о том, что скорость отскока мяча не зависит от силы сжатия ручки. Главное преимущество крепкой хватки, видимо, в том, что, если игрок крепко держит ракетку, а мяч не попадает на продольную ее ось, игрок сможет удержать пытающуюся вывернуться из руки

ручку. А самый большой недостаток крепкой хватки — в том, что в этом случае отдача и результирующие колебания ракетки большей частью отдаются в руку, что может привести к заболеванию с говорящим названием *теннисный локоть*. Для того чтобы уменьшить эту отдачу, опытный теннисист непосредственно перед ударом по мячу перестает ускорять ракетку, частично ослабляя в этот момент хватку.

Материал покрытия корта (глина, дерево, трава, ковер или что-то другое) может повлиять на горизонтальную составляющую скорости мяча, который летит низко над сеткой и проскальзывает, прежде чем отскочить. Сколько после такого отскока останется от горизонтальной скорости, определяет, «быстрый» корт или «медленный»: на быстром корте трение мало, и горизонтальная скорость сильно не изменится. На медленном корте трение велико, и горизонтальная скорость уменьшится. Когда же посылается высокий мяч, он падает на землю под достаточно большим углом и поэтому не скользит, а закручивается и, независимо от того, какое на корте покрытие, всегда теряет около 40% своей горизонтальной скорости.

## 1.79 • ВЕЛОСИПЕДЫ И МОТОЦИКЛЫ

Почему движущиеся велосипеды и мотоциклы не падают, даже если отпустить руль? Что нужно сделать, чтобы повернуть в такой ситуации? Можно ли на велосипеде повернуть, не держась за руль?

Почему современные велосипеды более устойчивы, чем велосипеды более старых конструкций? В частности, почему вилка переднего колеса у них выгнута в сторону от седла? Какое преимущество в гонках у велосипеда с низким центром масс?

**ОТВЕТ •** Вопрос о том, почему устойчивы движущиеся велосипеды и мотоциклы, обсуждается давно. Некоторые исследователи продвигают идею о том, что колеса действуют как гироскопы — они препятствуют любому случайному наклону, поскольку имеют угловой момент. Однако исследования показали, что этот эффект мал, особенно для велосипедов. Кроме того, практика показывает, что, когда вы поворачиваете колесо в направлении случайного наклона и движетесь вперед, велосипед выравнивается. Но это не всё объясняет, и это знают все, кто ездил на велосипеде, не держась за руль. Оба соображения не могут объяснить, например, как велосипедист может удерживать велосипед в вертикальном положении, даже когда велосипед стоит на месте.

Мне кажется, лучшее объяснение основано на понятии трейла, или выката переднего колеса, — расстояния по земле от места, где касается земли перпендикуляр, проведенный через ось переднего колеса, до места пересечения мысленной проекции оси руля с землей. Если проекция оси руля выдается вперед по отношению к точке касания шиной земли (большинство моделей велосипедов так и делаются), то, если вы вдруг случайно начнете наклоняться в какую-то сторону, переднее колесо автоматически направится в сторону наклона и уменьшит его. Вы можете помочь велосипеду выровняться, поворачивая руль в эту сторону, но это не обязательно — велосипед и так все сделает правильно. Но если ось руля смещена назад по отношению к точке касания земли шиной переднего колеса, оно не будет автоматически исправлять случайные наклоны, и тогда вы должны будете заняться этим сами, и, значит, таким велосипедом управлять будет гораздо труднее.

Вопрос о том, как на велосипеде или мотоцикле начать поворот, также обсуждался давно, отчасти потому, что правильное объяснение на первый взгляд казалось неправильным. Если вы хотите повернуть велосипед, скажем, направо, вам нужно на мгновение повернуть переднее колесо влево, это называется *контррулением*. Тогда и вы, и велосипедная рама, и переднее колесо автоматически наклонитесь вправо, то есть в направлении намеченного поворота. Действительно, этот наклон порождает вращающий момент, который противодействует контррулению, поворачивая и вас, и велосипедную раму, и переднее колесо направо, после чего велосипед снова принимает вертикальное положение.

В велосипедной гонке, где гонщик стоя быстро крутит педали, велосипед резко бросает то вправо, то влево, и он качается вокруг точек соприкосновения шин с землей. Чем ниже центр масс велосипеда, тем ближе он к точкам соприкосновения с землей и тем проще для гонщика качать велосипед.

### 1.80 • ДЛИННЫЕ ПРЫЖКИ НА МОТОЦИКЛЕ

Каскадер Эвел Книвел в 1960–1970-е годы выполнил множество потрясающих трюков: он въезжал на мотоцикле вверх по трамплину, пролетал по воздуху над крышами стоявших рядами легковых автомобилей и фур, а затем приземлялся на другой, дальний трамплин. Как правило, он выполнял эти трюки весьма успешно, но однажды при приземлении не справился с мотоциклом и серьезно пострадал. В 1978 году некий молодой человек попытался проделать похожий

трюк — перепрыгнуть через крылья самолета DC-3, но сделал фатальную ошибку, оставив дроссельную заслонку мотоцикла открытой (не убрав газ) во время полета. Почему эта ошибка стоила ему жизни?

**ОТВЕТ** • Когда заднее колесо покидает первый трамплин\*, трение, замедляющее его движение, моментально исчезает. Если дроссельная заслонка остается открытой, то есть двигатель продолжает крутить колесо, при отрыве от трамплина оно начинает крутиться быстрее, чем когда оно было в контакте с трамплином. В полете на мотоцикл и на сидящего на нем мотоциклиста не действуют внешние силы, создающие вращающий момент, и момент импульса мотоцикла не может измениться. Поэтому, когда заднее колесо начинает крутиться быстрее, мотоцикл и его водитель, чтобы сохранился начальный импульс, будут закручиваться в противоположном направлении, и это приведет к тому, что передняя часть мотоцикла поднимется вверх, может, даже и вертикально, а в таком положении приземлиться на дальний трамплин почти невозможно. Если в момент отрыва от первого трамплина убрать газ, такого опасного закручивания мотоцикла не произойдет. Если бы удалось еще как-нибудь замедлить вращение заднего колеса, было бы еще лучше, потому что тогда передняя часть мотоцикла смогла бы опуститься вниз и мотоцикл подготовился бы к приземлению на второй трамплин.

### 1.81 • СКЕЙТБОРДЫ

Почему балансировать на скейтборде легче в движении, чем когда он стоит на месте? Каким образом можно на скейтборде перепрыгнуть через препятствие, то есть выполнить трюк, называемый *олли*?

**ОТВЕТ** • Равновесие теряется при отклонениях от вертикали вправо или влево, которые неизбежно случаются во время езды на скейтборде. Исследование простейшей модели скейтборда показало, что наклон автоматически корректируется движением доски вперед при условии, что скорость ее выше критической (равной 0,8 м/с). Тогда при любом случайном наклоне передние и задние колеса поворачиваются, в доске возбуждаются небольшие колебания влево или вправо, которые компенсируют наклоны, и вы остаетесь на доске. Частота колебаний возрастает со скоростью.

\* Практически все мотоциклы заднеприводные. *Прим. пер.*

Это же исследование показало, что в более сложных моделях досок при скорости выше второго критического значения доска опять становится неустойчивой по отношению к случайным наклонам и для сохранения устойчивости требуется изрядная ловкость скейтбордиста. Устойчивость восстанавливается при достижении третьей критической скорости, однако такая высокая скорость в этом виде спорта достигается редко.

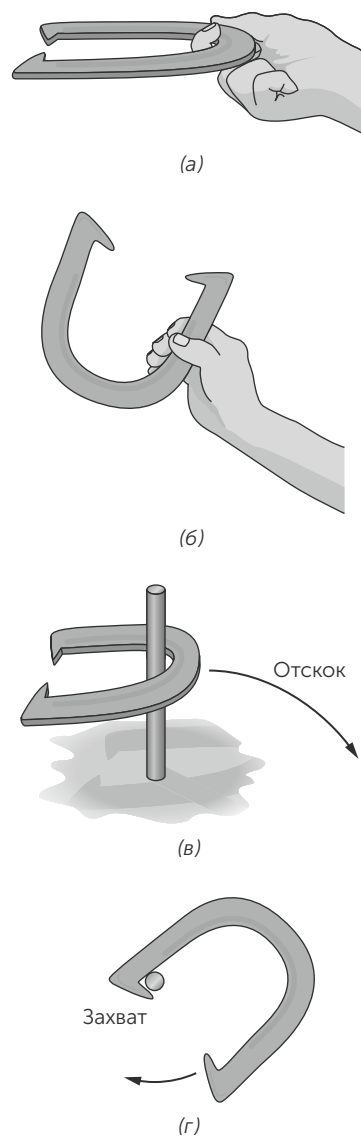
Чтобы выполнить олли, нужно совершить следующие действия. Слегка разгонитесь. В нужный момент поставьте ведущую ногу между серединой доски и передними винтами, а заднюю толчковую ногу сдвиньте на хвостовую часть доски (тейл), согните ноги в коленях и приготовьтесь к прыжку. Резко ударьте ступней толчковой ноги по тейлу так, чтобы доска подбросила вас вверх (поскольку толчковая нога находится на задней части доски, за задними колесами, из-за толчка эта часть доски ударится о тротуар, соударение подбросит доску вверх и начнет вращать ее вокруг центра масс). В момент, когда доску подбросит и начнет вращать, вы должны поджать ноги, чтобы не мешать полету доски, и тут же вытянуть ведущую ногу вверх и вперед, чтобы контролировать вращение доски. С помощью этой ноги вы сможете выровнять доску в наивысшей точке подъема. После этого можно готовиться к приземлению — согнув ноги в коленях, чтобы смягчить удар. Этот трюк позволяет перепрыгивать препятствия, но сначала нужно овладеть техникой прыжка на пустой дороге.

### 1.82 • МЕТАНИЕ ПОДКОВ

В игре «Метание подков» игроки набрасывают металлическую скобу (она по форме напоминает лошадиную подкову) на металлический колышек, находящийся на расстоянии 12 м. При броске нужно опустить руку вниз, потом отвести назад, а затем сделать быстрый мах вперед и отпустить подкову, когда рука окажется в горизонтальной позиции. Когда подкова коснется земли, желательно, чтобы она обхватила колышек. Это может случиться, если она упадет рядом и до него проскользит, но вероятность накинуть подкову на колышек больше, если летящая подкова ударится о него, упав после этого на место.

Если вы не искушены в метании подков, вам, вероятно, захочется бросить ее способом *флип*, держа за середину, как показано на рис. 1.32а. Перед броском «флип» подкова должна находиться в горизонтальной плоскости, а ее концы должны быть направлены

на колышек, а в момент броска нужно закрутить подкову так, чтобы она вращалась во время полета.



**Рис. 1.32 / Задача 1.82.** а) Запуск подковы при броске «флип». б) Хват при более правильном броске. в) Отскок от колышка. г) Рингер.

Первоначально флип был наиболее распространенным броском, но затем игроки придумали другие методы. При одном из них подкова захватывается сверху за один из концов и поворачивается так, чтобы она лежала в плоскости, расположенной под углом к вертикали, концами вверх (рис. 1.32б). В зависимости от скорости, с которой вы бросаете подкову, она сделает в воздухе  $\frac{3}{4}$ ,  $1\frac{3}{4}$  или даже  $2\frac{3}{4}$  оборота, прежде чем долетит до колышка. При другом способе подкову тоже

держат не за центральную часть, но ее концы направлены вниз, и тогда подкова в полете сделает  $\frac{1}{4}$ ,  $1\frac{1}{4}$  или  $2\frac{1}{4}$  оборота. Почему эти более современные способы позволяют заработать больше *рингеров* (когда подкова ударяется в колышек, прокручивается вокруг него и падает на место), чем флип?

**ОТВЕТ** • Если внутренняя часть подковы ударяется о колышек при традиционном броске «флип», подкова, скорее всего, отскочит обратно на вас и остановится далеко от колышка (рис. 1.32в). При более современных техниках бросания вращение подковы происходит в том числе вокруг вертикальной оси. Когда внутренняя поверхность подковы ударяется о колышек, вращение вокруг этой оси продолжится и поэтому подкова будет вращаться теперь вокруг колышка. Через некоторое время выступ на одном из концов зацепится за колышек, и подкова упадет на место (рис. 1.32г). Название *рингер*, скорее всего, объясняется тем, что подкова надевается на колышек, как кольцо (ring), хотя оно вполне может быть обусловлено звоном (ring), который слышится, когда подкова крутится вокруг колышка.

### 1.83 • КРУЧЕНИЕ ХУЛА-ХУПА\* И ЛАССО

Как людям удастся крутить хула-хуп (обруч) так, чтобы он не падал, а крутился почти в горизонтальной плоскости? Как ковбой добивается похожего эффекта с лассо?

**ОТВЕТ** • Оба эффекта возможны благодаря силе, действующей на вращающийся объект в точке упора. В случае с обручем эта сила приложена в точке соприкосновения его с телом. В случае лассо это сила, созданная рукой, натягивающей короткий кусок веревки между петель и рукой. В каждом случае точка упора перемещается по окружности малого радиуса. Действующая в этой точке сила толкает или тянет наружу вращающийся обруч или лассо и стремится сделать плоскость вращения по возможности горизонтальной. Для того чтобы объект вращался, точка упора в своем движении должна опережать вращение объекта.

\* Хула-хуп — это пластмассовый или алюминиевый обруч, который можно крутить на талии, выполняя вращательные движения корпусом. Это развлечение приобрело популярность в 1950-е годы, но подобные обручи — их крутили на руках или ногах — давно использовались у различных народов в играх и танцах. Американские индейцы, например, с ними танцевали. *Прим. ред.*

### 1.84 • ИГРУШКА ЙО-ЙО\*\*

Как при простом бросании йо-йо вниз из-за ее вращения происходит увеличение энергии? Почему ее скорость, направленная вниз, сначала возрастает, а потом убывает? Почему некоторые виды йо-йо «засыпают», то есть остаются вращаться в нижней точке, в то время как другие сразу после того, как достигли нижней точки, начинают движение по нитке вверх? Как разбудить «спящую» йо-йо и заставить ее карабкаться вверх? Почему она будет карабкаться ленивее или вообще не полезет вверх, если «спала» слишком долго? Почему, когда йо-йо подбирается близко к руке, игрушка начинает поворачиваться вокруг нити (это движение называется прецессией)? Суть в том, что нить, которая является осью вращения игрушки, смещается и игрушка начинает вращаться. Почему «спящие» йо-йо прецессируют с гораздо меньшей вероятностью?

С йо-йо можно проделывать множество трюков — например, фокусы под названием «Вокруг света» и «Прогулка с собачкой». В первом из них вращающуюся йо-йо в нижней точке заставляют описать большой круг в вертикальной плоскости. Во втором «заснувшую» йо-йо опускают на пол, и она катится по нему. Если нитку держать натянутой горизонтально, а потом резко дернуть, по какому пути будет двигаться игрушка?

Йо-йо бывает разных видов, но одна из самых впечатляющих — это йо-йо, сконструированная в Массачусетском технологическом институте в 1977 году. Нить (в действительности нейлоновый шнур) имела длину 81 метр, к ней была привязана конструкция из двух велосипедных колес диаметром 66 см, соединенных стальной втулкой. Бросали эту йо-йо с высоты 21-го этажа.

Еще более необычную йо-йо сконструировал Томас Кун в 1979 году. Она весила 116 кг, имела 1,3 м в диаметре и 0,8 м в ширину. Это была увеличенная

\*\* Йо-йо — игрушка, состоящая из двух одинаковых по размеру и весу дисков, скрепленных между собой втулкой, к которой нить или жестко прикрепляется, или же накидывается петлей. Сначала нить наматывают на втулку. Затем вы бросаете игрушку одной рукой, удерживая в ней свободный конец нити. Игрушка начинает падать, вращаясь все быстрее и быстрее. Если нить накинута на втулку петлей, втулка может свободно проворачиваться в петле — это будет «спящая» йо-йо. При ослаблении нити на втулку может наматываться пара витков, трение увеличится, и йо-йо начнет подниматься, накручивая на себя нить. Когда йо-йо достигнет верхней точки, то опять начнет скатываться вниз. Поведение игрушки похоже на поведение маятника Максвелла. *Прим. пер.*



копия запатентованной им годом ранее йо-йо No Jive 3-in-1. Кун бросал ее с подъемного крана высотой 30 м и установил рекорд. Эта йо-йо стала самой тяжелой.

А что, если космонавт на космической орбите захочет поиграть в йо-йо? Почему ему будет трудно заставить свою игрушку «заснуть» в такой обстановке?

**ОТВЕТ** • Представьте себе, что вы уронили йо-йо, а не бросили ее вниз. Обычно, когда предмет падает, его потенциальная энергия превращается в кинетическую и он летит со все возрастающей по мере падения скоростью. С йо-йо все не так по двум причинам: она вращается, и скорость ее вращения зависит от толщины бухты намотанной на втулку нити. По мере того как йо-йо падает, а бухта слой за слоем разматывается, йо-йо вращается все быстрее и быстрее. При этом компонента кинетической энергии, связанная с линейным перемещением, становится меньше, в результате скорость падения йо-йо сначала возрастает, а потом, где-то примерно на полпути, уменьшается. Когда игрушка долетает до нижней точки, то есть когда нить полностью разматывается, йо-йо подскакивает.

Если нить прикреплена к втулке (обычно продергивается в отверстие в ней), она тотчас же начнет опять наматываться на втулку, причем направление вращения не изменится. Если же нить накинута на втулку петелькой и удар о пол не сильный, йо-йо «заснет». Вы можете ее «разбудить», дернув нить вверх. Рывок потащит йо-йо вверх, и натяжение в нити мгновенно ослабнет. Поскольку йо-йо вращается, часть провисшей нити наматывается на втулку. При условии достаточного трения этот намотанный отрезок нити удержится на втулке, а йо-йо станет наматывать нить на втулку дальше и опять начнет подниматься. Однако если вы замешкаетесь и не сразу начнете будить «спящую» йо-йо, на трение между петлей нити и втулкой потратится слишком много энергии и «спящая» йо-йо не сможет подняться к вашей руке.

В космосе гравитации нет, поэтому и космонавт, и йо-йо находятся в свободном полете, и игрушка сама не отлетит — космонавт должен ее отбросить. Когда нить разматывается до конца, из-за внезапной остановки игрушка отскочит назад, при этом, скорее всего, нить не будет проскальзывать, а наматывается на втулку, и йо-йо начнет подниматься. Чтобы «усыпить» йо-йо, космонавт должен слегка отпустить нить в момент отскока, и тогда наматывание нити и возврат

не произойдут. Чтобы в нити возникло натяжение, космонавт может еще вращать йо-йо по кругу.

Случайные возмущения стремятся заставить йо-йо прецессировать, но обычно прецессия заметна, только когда йо-йо находится вблизи руки, то есть когда вращение замедлилось. Когда игрушка «спит», высокая скорость вращения создает большой угловой момент, который стабилизирует йо-йо и делает ее нечувствительной к случайным возмущениям. В этом случае йо-йо ведет себя как гироскоп.

Разгадку фокусов я оставляю вам, но для «прогулки с собачкой» вы могли бы рассмотреть разные вариации расположения нити, как это сделано в следующей задаче.

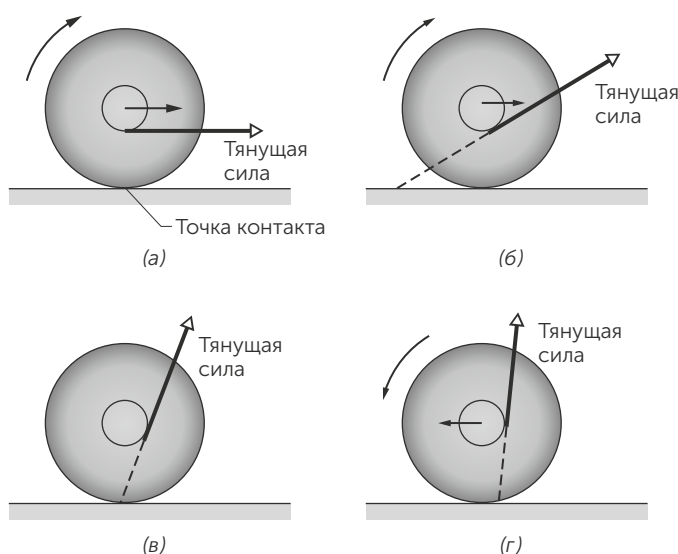
### 1.85 • РАСКРУЧИВАНИЕ ЙО-ЙО

Предположим, вы оставляете свободным конец нити йо-йо, кладете игрушку на стол таким образом, чтобы нить разматывалась с нижней части втулки, а потом тянете нить горизонтально на себя. Куда будет двигаться йо-йо — к вам, от вас или останется на месте? Что она будет делать, если вы потянете вверх под углом к столу? Как она поведет себя, если вы ее перевернете, так что нить будет разматываться с верхней части втулки? Прежде чем провести опыт, попробуйте угадать ответ. Если у вас нет под рукой йо-йо, ее можно заменить, например, катушкой ниток.

Поставьте велосипед у стола, переведите педаль вниз и потяните ее в сторону задней части велосипеда. Придет ли велосипед в движение, и если да, то в каком направлении?

**ОТВЕТ** • Легче всего проанализировать поведение йо-йо, если рассматривать точку контакта игрушки со столом как точку, относительно которой нужно посчитать вращающий момент. Поскольку сила трения со стороны стола приложена именно в этой точке, она не может создать вращающий момент, поворачивающий йо-йо. Чтобы понять, в каком направлении йо-йо будет двигаться, нужно учитывать только вращающий момент, создаваемый силой натяжения нити. Если этот вращающий момент поворачивает катушку по часовой стрелке (см. рис. 1.33), центр йо-йо должен поворачиваться вокруг точки контакта также по часовой стрелке, то есть двигаться на вас. Если вращающий момент закручивает йо-йо против часовой стрелки, йо-йо будет двигаться в противоположном направлении.

Допустим, нить разматывается с нижней части втулки. Если вы тянете за нее горизонтально, вращающий момент относительно точки контакта создает вращение по часовой стрелке и йо-йо движется на вас (рис. 1.33а). Чтобы понять, что будет, если тянуть за нить не просто вперед, но и немного вверх, нужно мысленно продлить нить за точку приложения до касания со столом. Если эта точка касания расположена левее точки контакта, как это изображено на рис. 1.33б, вращающий момент все еще будет вращать йо-йо по часовой стрелке и она все еще будет двигаться к вам. Если продолжение вектора проходит через саму точку контакта (когда вы тянете под чуть большим углом), вращающий момент равен нулю и йо-йо будет крутиться на месте (рис. 1.33в). Если мысленно продленная нить соприкоснется со столом правее точки контакта (когда вы тянете под еще большим углом), вращающий момент будет поворачивать йо-йо против часовой стрелки и она покатится от вас (рис. 1.33г).



**Рис. 1.33 / Задача 1.85.** а)–г) Направление, в котором покатится йо-йо, определяется тем, в каком направлении вы тянете за нить.

Когда нить начинает разматываться с верхней части втулки, йо-йо всегда будет двигаться на вас при любом угле натяжения нити, поскольку мысленно продленная нить будет соприкасаться со столом всегда левее точки контакта.

Что касается велосипеда, то, если его тянуть за педаль назад, он покатится назад. Действительно, направленные вперед силы трения, приложенные к шинам, хотя и меньше силы, с которой вы тянете, но зато у них больше плечо, поэтому именно они определяют направление вращательного момента и поворота колес, поворачивая педали вперед и мешая вашим усилиям.

### 1.86 • НА АВТОМОБИЛЕ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

Рекорд скорости движения по земле был поставлен в 1997 году в пустыне Блэк-Рок в штате Невада на автомобиле с турбовентиляторными двигателями. Средняя скорость автомобиля составила 1222 км/ч в одном направлении и 1233 км/ч — в противоположном. Обе скорости превышали скорость звука в воздухе для этого места (1207 км/ч), от автомобиля к наблюдателям по твердой корке, которой покрыта поверхность пустыни, распространились ударные волны. Развивать такую скорость было опасно по многим очевидным причинам — в частности, был шанс, что давление воздуха могло задрать нос автомобиля и перевернуть его (и это на сверхзвуковой скорости!). Менее явная опасность была связана с колесами автомобиля. В чем же она заключалась?

**ОТВЕТ •** Когда автомобиль мчится со сверхзвуковой скоростью по твердой поверхности пустыни, каждое колесо вращается со скоростью 6800 об./мин, а центростремительное ускорение на ободе колеса при этом достигает 35 000 g. Хотя колеса у рассматриваемого автомобиля были сделаны из литого алюминия, при таком радиальном ускорении металл был близок к пределу прочности, так что едва мог противостоять разрыву. Было неизвестно, как этот материал поведет себя при таких скоростях движения. Если бы колесо наехало на любое, даже небольшое препятствие, от удара оно могло взорваться, а автомобиль — разбиться. И поскольку эту часть пустыни некогда использовали как полигон для артиллерийских стрельб, бригада специалистов, обслуживающих гонку, должна была тщательно осмотреть трек и убрать все осколки артиллерийских снарядов и прочий мусор.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 1.87 • ВЗРЫВ НА ЦЕНТРИФУГЕ

Прочность крупных деталей машин, предназначенных для длительной эксплуатации при высоких скоростях, вначале испытывается на центрифуге. Эта установка представляет собой цилиндрический контейнер, стенки которого выложены свинцовыми блоками. Контейнер заключен в стальную оболочку с массивной плотно прилегающей крышкой. Деталь помещают в контейнер и раскручивают ее до высоких скоростей. Считается, что, если в результате вращения деталь разрушится, осколки врежутся в мягкие свинцовые блоки, откуда их можно будет извлечь для дальнейшего изучения.

В начале 1985 года на подобной установке испытывали тяжелый стальной ротор (диск) массой 272 кг и радиусом 38 см. Когда скорость вращения достигла 14 000 об./мин, из комнаты с центрифугой, расположенной этажом ниже и наискосок от комнаты инженеров, донесся глухой удар. Сбежав по лестнице вниз, тестировщики обнаружили, что свинцовые блоки выброшены в коридор, а дверь в комнату, где стояла центрифуга, вынесло на примыкающую к зданию парковку. Еще один свинцовый блок вылетел из установки, пробил стену и оказался в соседнем помещении. Несущие балки здания были повреждены, бетонный пол под установкой просел на полсантиметра, 900-килограммовую крышку подкинуло вверх, она пробила потолок, а потом рухнула на центрифугу. Лишь по счастливой случайности осколки не угодили в комнату, где сидели инженеры.

### 1.88 • КАК ВЫБРАТЬСЯ ИЗ ПЕРЕВЕРНУТОГО КАЯКА

Вы проходите пороги на каяке по бурной реке и вдруг переворачиваетесь вместе с каяком. Понимая, что в таком положении продолжать сплав вряд ли возможно, вы попытаетесь перевернуться обратно, не вылезая из каяка, в котором чувствуете себя хоть как-то защищенным. Как можно поставить каяк на ровный киль, не покидая его?

**ОТВЕТ •** Один из способов такой. Чувствуя, что каяк начал опрокидываться, разверните верхнюю часть туловища в сторону крена и вытяните руки с веслом вдоль корпуса лодки. Оказавшись под водой, сделайте резкий гребок веслом вниз (ко дну), и тогда сопротивление воды, направленное вверх, создаст вращающий момент, который заставит каяк продолжить вращение и вытащит вас из воды. Либо вы можете повернуть лопасть весла так, чтобы при обычном гребке параллельно оси каяка возникал вращающий момент, который также заставит каяк продолжить вращение и встать на ровный киль. В этом случае приложенная к веслу и направленная вверх сила возникает из-за изменения направления потока воды, вызванного движением весла.

До тех пор, пока вы находитесь в воде, на вас действует выталкивающая сила, которая делает вас легче. Но когда вы оказываетесь на поверхности, реальный вес вашего тела может остановить вращение. Чтобы этого не случилось, оставайтесь в воде как можно дольше, прижавшись к оси вращения лодки и давая каяку

возможность принять исходное положение, а сами продолжайте давить на весло вниз или назад. И только когда каяк встанет на ровный киль, сядьте прямо.

Некоторые каякеры, если их перевернуло, делают так называемый *рывок бедрами*. Если сделать резкое движение бедрами в направлении, противоположном предполагаемому вращению, каяк будет вынужден повернуться и встать на ровный киль. Этот метод особенно эффективен, когда потеряно весло и вместо него можно использовать только вытянутые руки.

### 1.89 • КЁРЛИНГ

В кёрлинге вращающийся камень, пущенный игроком, скользит по ледяной площадке в направлении мишени — дома. Тяжелый гранитный камень для кёрлинга соприкасается со льдом полосой шириной всего 12,5 см. Траектория его движения сначала прямая, но постепенно начинает искривляться в одну сторону, причем в конце пути кривизна увеличивается. Например, если камень пущен с вращением по часовой стрелке (если смотреть сверху), траектория изгибается вправо. Опытные кёрлеры используют это отклонение, чтобы обойти камень противника, стоящий на пути к мишени. Но почему искривляется траектория камня?

В кёрлинг часто играют на шероховатом льду (специально для этого распыляют воду над площадкой, чтобы получились небольшие бугорки). Возможно, из-за этого траектория камня сильнее искривляется. Многие игроки считают, что если энергично тереть

лед перед скользящим камнем, то это удлинит его путь и увеличит отклонение. Чем можно объяснить эти явления?

**ОТВЕТ** • Отклонение в сторону при скольжении камня (искривление траектории) происходит из-за трения узкой полосы в нижней части камня, которой он касается льда. Но не сухого трения между этой полосой и льдом, а жидкого трения между ней и тонким слоем воды, которая образуется, когда камень трется о лед и тот тает. Величина силы трения вдоль скользящей полосы не одинакова, поскольку трение в каждой точке зависит от скорости этой точки. Если послать камень скользить без закрутки, каждая его точка будет иметь одну и ту же скорость, и величина силы трения будет везде одинаковой. Однако в игре камень обычно закручивают, и комбинация вращения и поступательного движения вперед приводит к тому, что разные точки на скользящей полосе движутся с разными скоростями, и, следовательно, испытывают воздействие разных по величине сил трения. В результате этого неравномерного распределения сил трения, действующих на скользящую полосу, возникает равнодействующая сил, направляющая камень в сторону и искривляющая траекторию. Если камень закручен по часовой стрелке, равнодействующая сил направлена вправо, туда же отклоняется и камень. Неравномерное распределение трения ответственно также и за поведение камня в конце пути: через некоторое время после того, как прекращается движение камня вперед, он начинает вращаться вокруг одной точки, как будто его в этом месте пришили.

Роль шероховатой поверхности льда не совсем ясна, а над традицией тереть лед щетками иногда издеваются, а зря. Неровность поверхности может усилить зависимость трения от скорости. Щетки убирают отколовшиеся куски льда, которые мешают движению камня, а также могут частично расплавить лед и тем самым смазать его поверхность на пути движения камня.

### 1.90 • КАНАТОХОДЦЫ

Каким образом длинный тяжелый шест помогает канатоходцу удерживать равновесие, особенно если представление идет под открытым небом при умеренно сильном порывистом ветре?

Некоторые номера канатоходцев выглядят по-настоящему рискованными. В 1981 году Стивен Макпик прошел по проволоке, натянутой между пиками горы

Цугшпице на границе Австрии и Германии. Часть пути канатоходец проделал на высоте одного километра над землей. В тот же день он прошел вверх по тросу подвесной канатной дороги. Каким-то чудом он смог подняться при уклоне больше  $30^\circ$ .

В 1974 году Филипп Пети прошел по проволоке, натянутой между двумя башнями Всемирного торгового центра в Нью-Йорке на высоте 400 м над землей. Натянул он эту проволоку, прикрепив ее к стреле и выстрелив ею из одной башни в сторону другой. Где-то после семи проходов он был арестован полицией за «переход улицы в неполюженном месте». Вероятно, блюстители порядка не смогли найти другой причины остановить его, поскольку законодатели не предусмотрели статьи за незаконное хождение по канату.

**ОТВЕТ** • Равновесие устанавливается, если центр масс канатоходца в среднем будет располагаться точно над канатом. Тяжелый шест помогает вот в чем: если канатоходец наклонится, скажем, влево, он может сдвинуть шест вправо, тогда общий центр масс канатоходца и шеста удержится точно над канатом. Эти движения должны выполняться быстро — пока канатоходец не наклонился слишком сильно. Легкий шест помогает мало — из-за его небольшой массы сдвигать его пришлось бы слишком далеко, а это опасно.

### 1.91 • КАК УДЕРЖАТЬСЯ НА СПИНЕ БЫКА

Почему во время родео\* удержаться на диком быке или взбрыкивающем мустанге так трудно? Есть ли какой-нибудь секрет, которым владеет опытный наездник и который позволяет усидеть на быке (кроме того, что бы просто крепко держаться за поводья)?

**ОТВЕТ** • Посадка наездника зависит от положения быка под ним, а тот может неожиданно рвануть в сторону, понестись, взбрыкнуть или остановиться. При каждом неожиданном движении быка импульс и вращающий момент, действующие на наездника, стремятся скинуть его со спины. Если он просто держится за поводья обеими руками, то может, чтобы не слететь с быка, использовать силу, потянув за поводья, и тем самым остановить движение верхней части своего тела.

\* Родео на быке — один из видов родео, в котором наездник должен удержаться на спине быка в течение восьми секунд, причем по правилам для управления быком можно использовать только одну веревку и нельзя пользоваться седлом. В родео на быках много лет участвовали женщины. *Прим. пер.*



Но лучше, если наездник будет держаться за поводья одной рукой, а другую вскинет вверх. При любом неожиданном повороте быка нужно резко махнуть свободной рукой в направлении, противоположном тому, которое навязывает бык. Свободную руку нужно держать высоко поднятой, а не опущенной, чтобы центр ее масс был дальше от центра, вокруг которого наездника может в любой момент закрутить. Только тогда движение свободной руки может по-настоящему помешать повороту более массивной верхней части тела. Если наездник держит в свободной руке большую шляпу, сопротивление воздуха при ее движении может еще больше помешать закручиванию верхней части тела.

Человек, впервые вставший на коньки или ролики, в принципе, делает то же самое, чтобы хоть как-то восстановить равновесие. Когда я впервые встал на роликовые коньки и они пытались уехать из-под меня вперед, я автоматически махал руками, описывая круги назад в вертикальной плоскости (изображая мельницу), чтобы центр масс остался над коньками. Таким образом я все-таки удержал равновесие и не совсем потерял лицо.

### 1.92 • ПРОБЛЕМЫ С ТУАЛЕТНОЙ БУМАГОЙ

Одна из частых, хотя и небольших неприятностей случается с нами, когда мы тянем за конец рулона перфорированной туалетной бумаги, надеясь оторвать достаточно большой кусок, а отрывает один лишь бесполезный квадратик. Это чаще происходит с новыми рулонами и реже — с почти израсходованными. Почему с новыми рулонами мы так мучаемся? Влияет ли на это угол, под которым мы вытягиваем бумагу? Что лучше — повесить рулон так, чтобы бумага разматывалась сверху, или наоборот, перевернуть его и тянуть снизу?

**ОТВЕТ •** Когда вы тянете ленту туалетной бумаги за свободный конец, то создаете вращающий момент, который стремится повернуть рулон. Противодействует этому другой вращающий момент, создаваемый силой трения картонной втулки внутри рулона о стержень держателя. Когда вы тянете несильно, трение тоже мало — как раз такое, чтобы не дать рулону повернуться. Когда вы потянете сильнее, трение тоже будет возрастать до тех пор, пока не достигнет какого-то верхнего предела. Если потянуть еще сильнее, рулон начнет поворачиваться, а поскольку возникнет проскальзывание, трение мгновенно уменьшится. Но если требуемое натяжение слишком велико, бумага рвется.

Когда рулон новый, его вес давит на стержень держателя и, значит, верхний предел для силы трения велик, а это значит, что если вы потянете с достаточной силой, чтобы повернуть рулон, то бумага сразу и оторвется. Когда бумага в рулоне подходит к концу, ее вес мал, верхний предел для силы трения меньше и вы можете его преодолеть, приложив небольшое усилие, и тогда, возможно, вы сможете отмотать бумагу, не порвав ее. Если вы тянете ленту слегка вверх, что бывает, когда свободный конец ленты находится снизу рулона, вы работаете против силы тяжести, и поэтому верхний предел для силы трения будет меньше. И вряд ли в этом случае вам удастся оторвать кусок бумаги от ленты. (В этом исследовании я не учитывал роль плеча в формировании вращательного момента. Вы, возможно, захотите перепроверить мои результаты, рассмотрев, как меняется плечо прикладываемой вами силы, когда рулон почти израсходован.)

Да, никуда от физики не деться, даже в туалете.

### 1.93 • СКАЧУЩИЕ КАМНИ И БОМБЫ

Как нужно бросить плоский камень, чтобы он скакал по поверхности воды и делал «блинчики»? Можно ли увеличить количество отскоков, придав камню большую скорость в момент броска или закрутив его? Как камень скачет по мокрому песку и почему его путь отмечен парами расположенных рядом углублений, причем эти пары находятся друг от друга далеко?

Во время Второй мировой войны скачущий по поверхности воды камень натолкнул инженеров на идею создания особого вида оружия для британских Королевских военно-воздушных сил (RAF). Летчикам было приказано уничтожить некоторые жизненно важные плотины в Германии, такие прочные, что взорвать их можно было, только устроив взрыв у самого дна. Бомбить верхнюю часть плотин было бы бессмысленно, а торпеды, сброшенные с самолетов в воду, попадали в сети, расставленные вокруг плотин. Задача усложнялась еще и тем, что плотины были построены в узких и глубоких долинах и это ограничивало возможность атак с воздуха. Воздушные налеты можно было проводить только в темное время суток, чтобы не вызвать на себя огонь артиллерии, охранявшей долины.

Для выполнения поставленной задачи была разработана цилиндрическая бомба высотой 1,5 м и чуть меньшего диаметра. Когда самолет приближался к плотине, мотор придавал бомбе нижнее вращение (верхняя часть бомбы закручивалась в направлении,

противоположном курсу самолета), а затем бомбу бросали вниз с высоты 20 м. (На самолете были установлены два ярких прожектора, причем их лучи направлялись под определенными углами так, чтобы они пересекались на расстоянии 20 м под самолетом. Пилот мог понять, что он на нужной высоте, когда световое пятно на воде становилось минимальным.)

Что происходило с бомбой, когда она достигала поверхности воды? Какова была роль вращения в дальнейшем воздействии бомбы на плотину?

**ОТВЕТ •** Чтобы камень хорошо скакал по воде, нужно его бросить так, чтобы его плоскость и траектория перед касанием поверхности воды были почти горизонтальными. Еще нужно по возможности максимально закрутить камень, поскольку вращение стабилизирует ориентацию камня — подобно тому, как вращение стабилизирует гироскоп. Если камень приводнился как надо, перед его передним краем возникнет небольшая волна, он отскочит и полетит вперед. Начальная скорость камня определяет расстояние между отскоками. Количество отскоков будет зависеть от потерь энергии при каждом отскоке, а она тратится не только на создание волны, но и на трение камня о воду во время коротких периодов скольжения по воде.

Пускать камни по воде — давнишнее увлечение, и успех во многом зависит от правильного выбора камня. Недавно начали выпускать искусственные камни из песка и гипса. Их нижняя часть делается выпуклой, чтобы уменьшить трение и, соответственно, потерю энергии. В то время как рекорд по количеству отскоков естественных камней составляет примерно 30 раз, искусственные камни всегда прыгают по 30–40 раз.

Чтобы объяснить следы на мокром песке, оставленные камнем, предположим, что сначала он ударяется хвостовой частью. В песке образуется небольшое углубление, от удара передний конец камня быстро поворачивается вниз и рядом выбивается еще одна ямка. Второе столкновение с песком поднимает камень в воздух и переориентирует его так, что следующая пара ямок образуется далеко от первой.

Когда бомба ударялась о воду, ее закручивание вынуждало ее подпрыгивать из-за быстрого движения нижней ее поверхности относительно воды. Постепенная потеря энергии при скачках уменьшала высоту каждого следующего подскока, но этой высоты хватало, чтобы перепрыгивать противоторпедные сети. Когда бомба ударялась о стену плотины, ниже

вращение заставляло цилиндр катиться по стене вниз. С помощью гидростатического взрывателя, выставленного на глубину 10 м, бомба взрывалась. В одном комментарии на эту тему говорилось: «Это была красивая в своей простоте идея, позволяющая с точностью до нескольких метров направить в цель бомбу весом свыше трех тонн».

Похожая бомба, но меньших размеров и сферической формы, была разработана для потопления судов. Две такие бомбы, вращающиеся со скоростью 1000 об./мин, планировалось сбросить с высоты 8 м на расстоянии 1,5 км от цели. Идея заключалась в том, что они будут двигаться к цели по водной поверхности прыжками, как летучие рыбы, и по пути перепрыгивать через противоторпедные сети и другие препятствия. Предполагалось, что, столкнувшись с корпусом корабля, они начнут катиться по нему вниз, пока на заранее выставленной глубине не взорвется 300-килограммовый заряд. Эта бомба была способна проникать и в длинные тоннели: если ее сбросить у входа, она могла бы ускакать вглубь тоннеля и там взорваться. По разным причинам эти маленькие бомбы так никогда и не были использованы. (Физика — наука невероятно интересная, но ее применение может быть очень страшным.)

#### 1.94 • ВРАЩЕНИЕ НА ЛЬДУ

Выполняющий вращение фигурист — типичный пример для иллюстрации закона сохранения углового момента. Поскольку на него не действуют никакие моменты внешних сил, никакие его действия не могут изменить его угловой момент. А скорость его вращения увеличивается, когда он прижимает руки, из-за того, что он изменил положение части своей массы (рук, а, возможно, и одной ноги) по отношению к оси, вокруг которой крутится. Все это, конечно, правильно, но остается вопрос, какая сила заставляет его крутиться быстрее и почему его кинетическая энергия возрастает?

**ОТВЕТ •** Если рассматривать движение в инерциальной системе отсчета, связанной со зрителями на трибунах, то изменение скорости вращения фигуриста вызывается внутренними силами взаимодействия различных частей его тела. Когда фигурист прижимает руки к туловищу, линейная скорость рук должна уменьшиться. Следовательно, на них со стороны туловища действуют силы. В свою очередь, руки действуют на туловище, благодаря чему скорость его вращения увеличивается.

### 1.95 • ВРАЩЕНИЕ КНИГИ

Стяните обложку тугой резинкой, чтобы книга не раскрылась. Подбросьте книгу в воздух и одновременно закрутите вокруг одной из трех основных осей, как это показано на рис. 1.34а. Вращение вокруг двух из трех осей устойчиво. Почему книга начинает заметно болтаться при вращении вокруг третьей оси? Такую же нестабильность можно заметить, если подбросить в воздух молоток, теннисную ракетку или любой другой предмет.

**ОТВЕТ •** Оси, проведенные через книгу, характеризуются разными связанными с ними моментами инерции, то есть разным распределением массы по отношению к соответствующим осям вращения. При вращении вокруг одной оси масса распределена далеко от оси (момент инерции наибольший), при вращении вокруг другой — масса сосредоточена вблизи этой оси (момент инерции наименьший) (см. рис. 1.34б). При вращении вокруг любой из этих осей вращение стабильно.

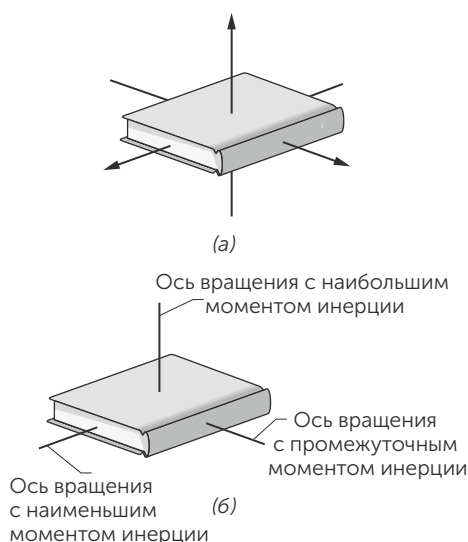


Рис. 1.34 / Задача 1.95. а) Три оси, проведенные через книгу.  
б) Моменты инерции, связанные с этими осями.

Проблемная ось — та, распределение масс вокруг которой, а следовательно, и момент инерции, имеет промежуточное значение. Если вы подкинете и раскрутите книгу в точности вокруг этой оси, она будет вращаться стабильно. Но проблема в том, что подбросить идеально невозможно — вы обязательно ошибетесь, и ошибка приведет к колебаниям, амплитуда которых будет нарастать. По одной из версий, ошибка

в начальном расположении приводит к появлению заметной центробежной силы (направленной наружу), которая вынудит книгу вращаться вокруг оси, относительно которой момент инерции максимален. Беспорядочное движение книги, которое вы видите вначале, — это комбинация вращения, которое вы намеревались придать книге, и дополнительного вращения, вызванного центробежной силой.

Проблемная ось с промежуточным моментом инерции существует у всех предметов. Однако если моменты инерции относительно каких-то двух осей равны, вращение вокруг любой из осей будет стабильным, и это вращение может представлять собой медленный поворот вокруг оси, а не заметные колебания. Кроме того, если сопротивление воздуха при вращении объекта значительно, становится нестабильным и вращение вокруг оси с максимальным моментом инерции. Чтобы проверить этот эффект, подкиньте игральную карту в воздух, закрутив ее вокруг оси с наибольшим моментом инерции. Есть вероятность, что в конце она будет вращаться вокруг оси с наименьшим моментом инерции.

### 1.96 • ПАДАЮЩАЯ КОШКА, КУВЫРКИ КОСМОНАВТОВ И АКРОБАТИЧЕСКИЕ ПРЫЖКИ В ВОДУ С ВЫШКИ

Если кошка будет падать спиной вниз с высоты более одного метра, она быстро переориентируется и приземлится на лапы. Может показаться, что такое действие нарушает железобетонное правило физики: если на тело не действует момент внешней силы, угловой момент тела измениться не может. Кошка как раз и есть такое тело. В начале падения у нее нет углового момента, нет и момента сил, заставляющего ее вращаться. Тем не менее она своим вращением как будто доказывает, что ее угловой момент не остается равным нулю. Кошка и правда нарушает закон физики?

Как может космонавт в движущемся по орбите космическом корабле поворачиваться влево или вправо (вращение вокруг вертикальной оси), не опираясь ни на что? Как может космонавт вращаться вокруг горизонтальной оси, идущей слева направо? Может ли он вращаться вокруг горизонтальной оси, идущей спереди назад? Во всех этих случаях тело изначально не вращается и нет также момента внешних сил, действующих на него, а тем не менее космонавт как-то ухитряется поворачиваться.

Прыжки в воду с вышки или трамплина — это другая история, поскольку прыгун в начале прыжка

обычно уже имеет угловой момент, который он приобретает, отталкиваясь от твердой поверхности. В простейшем прыжке спортсмен переворачивается в воздухе так, чтобы первыми в воду вошли руки. Быстрое вращение прыгуну нужно, если он хочет несколько раз перевернуться, прежде чем войти в воду. Почему скорость вращения спортсмена возрастает, если он сгруппируется, перед тем как, выпрямившись, войти в воду?

Как прыгун может еще и поворачиваться вокруг другой своей оси во время прыжка в воду? Например, спортсмен может включить три оборота вокруг своей оси в прыжок полтора сальто вперед. Нужно ли как-то по-особому отталкиваться от трамплина для того, чтобы сделать поворот, или прыгун толкается так же, как при обычном сальто, а поворот совершает уже в воздухе? Многие приемы, используемые прыгунами, взяты на вооружение другими спортсменами — фристайлерами (проделывающими фантастические трюки в воздухе), гимнастами, скейтбордистами.

Некоторые прыжки в воду и прыжки с трамплина напоминают падение кошки в том смысле, что и кошка, и спортсмен начинают свой полет с нулевым угловым моментом. Но каким-то чудом без закручивающего его толчка от поверхности прыгун в воду или фристайлер умудряется повернуться во время полета в воздухе.

**ОТВЕТ** • Объяснениям того, как кошка умудряется переворачиваться в воздухе, уже около ста лет, но до сих пор в них встречаются противоречия. Я приведу две теории падения (в поддержку каждой существуют фотодоказательства), но имейте в виду, что кошки не изучают физику, поэтому не все они прыгают одинаково.

**Теория 1.** Будем считать, что кошка состоит из двух половинок, соединенных посередине спины гибким шарниром. Оси проходят через каждую половинку и изначально составляют друг с другом некий угол, поскольку в начале падения тело кошки выгнуто вниз. Как только кошка начинает падать, обе половинки начинают вращаться каждая вокруг своей оси в *одном и том же* направлении, в то время как шарнир вращается вокруг горизонтальной оси в *противоположном* направлении. Например, если посмотреть со стороны хвоста, обе половинки вращаются по часовой стрелке, а шарнир — против часовой стрелки. Каждое вращение связано с угловым моментом, и знак углового момента при вращении по часовой стрелке отрицателен, а при вращении против часовой стрелки — положителен.

Таким образом, суммарный вращающий момент кошки при повороте остается равным нулю, то есть тем же, что и в начале падения. При этом лапы оказываются в итоге направленными вниз, и кошка на них встает, но туловище оказывается скрученным и кошка, уже стоящая на земле, его выпрямляет.

**Теория 2.** Снова рассмотрим вид со стороны хвоста. Кошка вытягивает передние лапы, вытягивает задние и крутит хвостом против часовой стрелки. При этом и голова, и тело кошки вынуждены вращаться по часовой стрелке, но так как передние лапы кошки поджаты, передняя половина кошки повернется на больший угол, чем задняя. (Заметим, что при этом объяснении туловище кошки оказывается скрученным.) Кошка продолжает крутить хвостом, но теперь вытягивает передние лапы и поджимает задние. Смена позы приводит к тому, что задняя половина поворачивается по часовой стрелке быстрее, чем передняя, так что скрученность туловища кошки уменьшается. В конечном итоге тело кошки выравнивается, и она приземляется на лапы. (Если у кошки нет хвоста, одна из задних лап берет на себя его функции и становится «хвостом».) Как и в первом варианте, суммарный угловой момент остается во время падения нулевым.

Представьте себе, что вы космонавт, находящийся в невесомости. Чтобы повернуться вокруг вертикальной оси, вытяните правую ногу вперед, а левую — назад. Потом сделайте круговое движение правой ногой направо и назад, а левой — налево и вперед, после чего сведите ноги вместе. В этом случае ноги будут двигаться по часовой стрелке, а следовательно, туловище должно повернуться против часовой стрелки, так, чтобы общий угловой момент остался нулевым.

Если вы поднимете руки в стороны и будете синхронно вращать ими по окружности в одном направлении, туловище закрутится в противоположном направлении, и опять общий угловой момент останется равным нулю. Вращение вокруг горизонтальной оси, идущей спереди назад, — это комбинация двух предыдущих вращений. (В какой позе вы окажетесь, если выполните последовательно левый поворот, кувырок вперед и правый поворот? А как насчет такой последовательности: кувырок вперед, поворот направо и кувырок назад? Удивительно, но после любой из двух серий поворотов вы окажетесь в одной и той же позе, хотя и будете напоминать одного из трех балбесов\*.

\* «Три балбеса» — американский сериал 2012 года о трех непутевых братьях, комедия. Прим. пер.



Когда во время сальто при прыжке с вышки вы группируетесь, скорость вашего вращения увеличивается, поскольку вы собираетесь поближе к оси, вокруг которой вращаетесь (как фигурист, который прижимает к себе руки и приставляет ногу, вращаясь на льду). При группировке ваш угловой момент, который равен произведению момента инерции (определяемого как раз распределением масс) на угловую скорость, остается постоянным.

Если во время выполнения сальто вы сделаете мах правой рукой вверх, а левой вниз (через стороны), это движение заставит ваше туловище повернуться, при этом голова повернется направо. Эти действия не изменят вашего углового момента, но переместят ось, вокруг которой вы крутите сальто, от направления углового момента. Результатом станет поворот вокруг вертикальной оси. Поэтому для выполнения поворота вам не нужно как-то специально отталкиваться от трамплина — вы можете повернуться прямо в воздухе.

### 1.97 • ЧЕТВЕРНОЕ САЛЬТО

1982 год, 10 июля, Тусон, штат Аризона. Во время циркового представления воздушный акробат Мигель Васкес отпустил перекладину трапеции, на которой висел, сгруппировался, четырежды перевернулся в воздухе и оказался в руках брата Хуана, висевшего на другой трапеции. Это было первое исполнение сальто в четыре оборота в цирке, хотя попытки делались с 1897 года — тогда было выполнено первое тройное сальто. Почему именно четверное сальто так трудно выполнить (и почему сальто в четыре с половиной оборота, скорее всего, вообще сделать невозможно)?

**ОТВЕТ •** Чтобы выполнить прыжок, и воздушный гимнаст, и его партнер должны раскатыться на трапециях. Когда воздушный гимнаст летит по направлению к партнеру, он отрывается от своей трапеции, немедленно группируется и делает несколько оборотов. Закончив четвертый оборот, он должен вытянуться, чтобы его партнер смог поймать его за руки. Таким образом, прыжок должен удовлетворять двум условиям: 1) гимнасту необходимо выполнять кувырки достаточно быстро, чтобы успеть сделать четыре оборота за то время, что он летит до партнера; 2) он должен разгруппироваться как раз в тот момент, когда окажется возле партнера, иначе его скорость будет слишком велика и поймать его будет невозможно.

Для выполнения первого требования гимнаст должен сгруппироваться, чтобы его масса перераспределилась и сосредоточилась вблизи центра масс, вокруг которого он крутится. Сгруппировавшись, он увеличит скорость вращения подобно фигуристу, который вращается быстрее, когда прижимает к себе руки и приставляет ногу. Однако большинство гимнастов не могут сгруппироваться настолько плотно, чтобы развить скорость, достаточную для четырех оборотов.

Для выполнения второго требования гимнаст должен считать количество оборотов. Тогда он сумеет вовремя разгруппироваться и его смогут поймать. Однако скорость в четверном (и тем более в четверном с половиной) сальто настолько велика, что у гимнаста все плывет перед глазами и ему трудно точно фиксировать обороты. Вот почему после таких кульбитов его практически невозможно поймать.

### 1.98 • ПАДАЮЩИЙ БУТЕРБРОД

Бутерброд лежит на кухонном столе стороной с маслом вверх. Вдруг кто-то ударяет по столу, и бутерброд падает на пол. Правда ли, что бутерброд всегда шлепается маслом вниз? (Проявление известного закона Мерфи, который утверждает, что, если неприятность может произойти, она обязательно произойдет.)

**ОТВЕТ •** Если бутерброд лишь слегка подтолкнули (а не ударили сильно) и он упал со стола, то можно угадать, какой стороной он приземлится на пол, зная три вещи: высоту стола, трение между бутербродом и поверхностью стола и начальный свес бутерброда с края стола (насколько бутерброд выступал за край стола в момент падения). Когда стол покачается, центр бутерброда переместится за край стола, и бутерброд начнет вращаться вокруг этого края. Кроме того, он станет скользить по этому краю. Сложение вращения и скольжения определит скорость, с которой бутерброд будет кувыркаться во время полета со стола на пол. Если эта скорость достаточна, чтобы за время падения повернуть бутерброд на угол от 90° до 270°, бутерброд упадет маслом вниз. При стандартной высоте стола и величине трения, а также если использовался обычный хлеб для тостов, падение бутерброда маслом вниз происходит как в области маленьких свесов, так и в области больших свесов, а при промежуточных значениях свесов бутерброды падают маслом вверх. А теперь, когда вы вооружены теорией, запаситесь бутербродами и экспериментируйте.

### 1.99 • БАЛЕТ

За красотой и грацией, присущими балету, скрываются физические законы, которые не всегда легко распознать. Если танцует профессионал, вы никогда не заметите в его исполнении физику — наоборот, его движения вам покажутся в чем-то странными, как будто нарушающими законы физики, а в чем именно, не сразу понятно. Вот два примера.

В прыжке *гранд жете* с поворотом и шпагатом в воздухе балерина прыгает, отталкиваясь от пола, без видимого вращения, и каким-то образом начинает вращаться уже в воздухе. (Она не использует тот же прием, что космонавт, про которого мы говорили ранее, иначе это не выглядело бы так красиво и, возможно, требовало бы слишком много времени.) Непосредственно перед тем как опуститься на пол, балерина прекращает вращение.

*Фуэте* — это непрерывная серия *пируэтов*, когда балерина крутится на одной ноге, периодически вытягивая и поджимая другую ногу. В одном из самых известных фуэте в третьем акте классического балета «Лебединое озеро» балерина, исполняющая партию Черного лебедя Одиллии, делает 32 оборота.

Как в этих двух случаях происходит вращение?

**ОТВЕТ •** В прыжке *гранд жете* ан турнан возникает иллюзия того, что вращение начинается и прекращается в воздухе, а возникает она из-за того, что балерина вытягивает и прижимает руки во время прыжка. Эти движения изменяют ее *момент инерции*, который зависит от распределения массы балерины относительно оси ее вращения. Ее *угловой момент* есть произведение момента инерции на угловую скорость, с которой она крутится. Во время прыжка изменить свой угловой момент балерина не может. Она начинает свой прыжок с вытянутыми руками и отставленной одной ногой и, соответственно, с маленькой скоростью вращения, незаметной зрителям. Уже в воздухе она грациозно прижимает руки и приставляет ногу, уменьшая таким образом момент инерции. Поскольку угловой момент измениться не может, скорость ее вращения увеличивается и становится заметной зрителям — им кажется, что балерина волшебным образом повернулась уже в воздухе. Когда она готовится опуститься на пол, то опять вытягивает руки и ногу и восстанавливает начальный момент инерции. Ее скорость вращения опять становится слишком маленькой, чтобы

публика заметила его, и кажется, что балерина в воздухе «выключила» вращение.

Во время фуэте балерина отталкивается от пола, чтобы начать вращение, и встает на пуанты на одной ноге. Затем она приставляет другую ногу к первой, чтобы увеличить скорость вращения. Когда балерина оказывается лицом к публике, она опять вытягивает свободную ногу, так что та постепенно подхватывает угловой момент всего тела, и какое-то мгновение нога еще вращается, а туловище — нет. Эта пауза позволяет балерине на мгновение опуститься с пуантов и оттолкнуться ногой, чтобы сделать следующий оборот.

### 1.100 • ПОВОРОТЫ НА ЛЫЖАХ

Есть множество способов повернуть при спуске по склону, но что именно заставляет вас повернуть? Если вы делаете «австрийский поворот», сначала вы приседаете, а потом резко выпрямляетесь, одновременно поворачивая верхнюю часть туловища в направлении, противоположном направлению намеченного поворота.

При другом способе мы ставим лыжи плоско на снег и при поворотах переносим вес своего тела вперед или назад. Куда именно переносить вес тела, зависит от того, под каким углом вы хотите спуститься со склона. Путь прямо вниз по склону называется линией спада. Если вы спускаетесь левее относительно линии спада и перенесете вес вперед, то вы повернете по часовой стрелке (см. рис. 1.35, вид сверху). Если же вы перенесете вес назад, поворот будет в противоположном направлении. Все произойдет с точностью до наоборот, если вы будете спускаться правее от линии спада.

Повороты можно также выполнить, *кантуя* лыжи — наклоняя их так, чтобы ближний к вершине кант врезался в снег. Например, при движении левее от линии спада, если вы встанете на канты и сдвинете вес вперед, вы повернете против часовой стрелки. Заметьте, что при кантовании перенос веса приведет к повороту в противоположном направлении по сравнению с поворотом, выполняемым на плоских лыжах.

Почему у лыж для слаломных соревнований внешний край искривляется спереди назад? Почему некоторые лыжники предпочитают коротким лыжам длинные? Почему, когда вы спускаетесь вдоль линии спада, вы должны наклониться вперед так, чтобы туловище было перпендикулярно склону? Почему если вы опрометчиво поедете вниз в вертикальной стойке, то, скорее всего, упадете?

Новый способ поворота при спуске по склону на лыжах описал в 1971 году Дерек Свинсон из Университета Нью-Мексико. Вместо лыжных палок Свинсон взял тяжелое вращающееся велосипедное колесо, насаженное на ось с ручками, за которые Свинсон и держал его. Плоскость колеса была вертикальной, и верхняя его часть вращалась от лыжника. Когда он хотел повернуть направо, он опускал правую руку и поднимал левую. Чтобы повернуть налево, проделывал все наоборот. Что заставляло Свинсона повернуть?

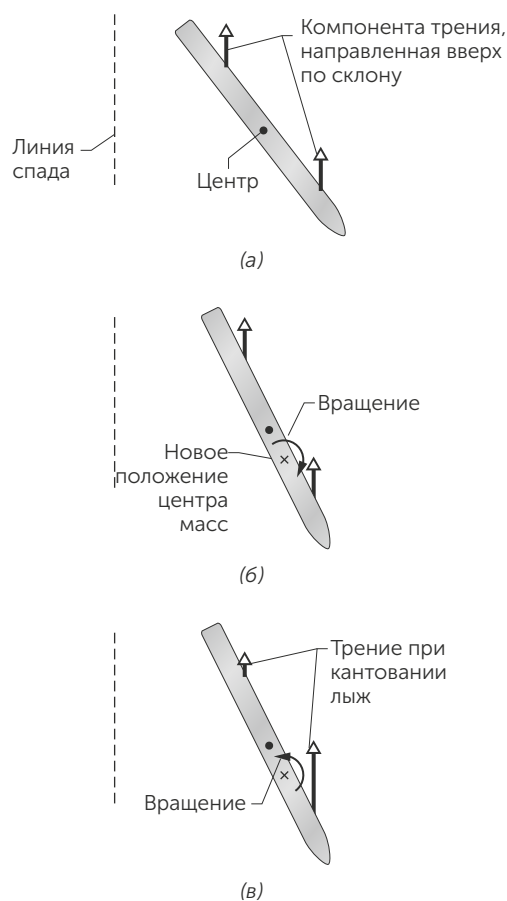
**ОТВЕТ** • «Австрийский поворот» похож на поворот, про который рассказывалось в предыдущих задачах (например, про падающую кошку). После того как вы быстро выпрямляетесь — почти выпрыгиваете вверх, — давление на лыжи падает, и на какую-то долю секунды трение между лыжами и снегом уменьшается или вообще исчезает. В это время ваш угловой момент равен нулю, и поскольку трения больше нет, оно не может создать момент внешних сил, а следовательно, и угловой момент измениться не может. Таким образом, если в этот момент вы поворачиваете верхнюю часть туловища влево, нижняя часть вместе с лыжами поворачивается вправо. Как только ваш вес опять начинает давить на лыжи, сразу появляется и трение, и оно дает возможность повернуть верхнюю часть туловища в новом направлении движения.

Чтобы понять, как работает метод поворота на плоских лыжах, предположим, что вы едете левее от линии спада в обычной стойке, когда вес приходится на центр лыж. Предположим также, что трение равномерно распределено по всей длине лыжи. Трение в передней части лыжи имеет составляющую (компоненту), направленную вверх по склону, и создает вращающий момент, стремящийся повернуть лыжи влево вокруг центра масс (рис. 1.35а). Трение в задней части лыжи создает вращающий момент, стремящийся развернуть лыжника вправо. В обоих случаях величина вращающего момента зависит от того, какова величина трения и как оно распределено по отношению к центру масс. Трение в точках, расположенных вдали от центра масс (у них большее плечо) создает больший вращающий момент, чем трение в близких точках. Если и величина, и распределение трения одинаковы в передней и задней частях лыжи, вращения не происходит.

Если же вы сдвинете свой центр масс вперед, вы измените баланс между вращательными моментами (рис. 1.35б). Теперь не половина, а больше половины

лыжи находится позади центра масс и меньше — впереди, следовательно, сила трения у задней части больше, чем у передней. К тому же трение во многих точках задней части лыжи приложено дальше, а в большинстве точек передней части — ближе к центру масс. Поэтому вращающий момент, приложенный к задней части лыжи, преобладает, и вы поворачиваете направо.

Если вы кантуете лыжи, наклоняя корпус вперед, они врезаются в снег, и трение в передней части лыжи увеличивается, а в задней — уменьшается (рис. 1.35в). В этом случае вращающий момент, действующий на переднюю часть лыжи, преобладает, и вы поворачиваете налево.



**Рис. 1.35 / Задача 1.100.** Силы, приложенные к лыже при: а) нормальной стойке лыжника, б) передней стойке и в) задней стойке.

Край (кант) лыж для слалома слегка искривлен, чтобы было легче поворачивать. Когда вы вдавливаете этот кант в снег и скользите по траектории,

являющейся продолжением искривленного края лыжи, трение будет минимальным.

На коротких лыжах так сильно подбрасывает на неровной поверхности, что можно легко потерять равновесие. Хотя длинными лыжами труднее управлять, на них подбрасывает меньше.

Чтобы понять, почему нужно наклоняться вперед при спуске по линии спада, представьте себе, что вес лыжника — это вектор, проведенный через центр его масс. Вектор можно разложить на две составляющие (*компоненты*). Одна компонента направлена вниз по склону (она ответственна за движение лыжника), а вторая перпендикулярна ему. Чтобы лыжник не потерял равновесия, этот перпендикуляр должен проходить через ступни спортсмена. А если лыжник решит на спуске не наклоняться, возникнет вращающий момент относительно ступней, который может опрокинуть лыжника назад.

Рассмотрим описанную демонстрацию Свинсона с крутящимся колесом и предположим, что трением в этом случае можно пренебречь, то есть будем считать, что участники (колесо — это тоже участник) изолированы от внешних сил, которые могли бы создать вращающий момент. Посмотрим на Свинсона сверху. Поскольку колесо вначале вращалось вокруг горизонтальной оси, вокруг линии, по которой вы смотрите, не может быть вращения, то есть ни колесо, ни Свинсон не имеют углового момента относительно вертикальной оси. Это следствие отсутствия внешних крутящих сил, и такое положение не может измениться. Если Свинсон опускает правую ручку и поднимает левую, сверху можно увидеть, что колесо вращается против часовой стрелки — это значит, что оно приобрело некоторый угловой момент относительно вертикальной оси. Чтобы общий угловой момент остался нулевым, каким он и был вначале, Свинсон должен будет повернуть по часовой стрелке (если смотреть сверху), то есть вправо.

### 1.101 • КАК ПРОПОЛЗТИ ПО СКОЛЬЗКОМУ ЛЬДУ

Вы просыпаетесь и обнаруживаете, что оказались посреди большого замерзшего пруда и лед такой скользкий, что по нему невозможно не только идти, но и ползти. Как же оттуда выбраться?

Предположим, вы лежите на льду лицом вниз и думаете, как выбраться. Чтобы не замерзнуть окончательно, вам для начала нужно перевернуться на спину. Как же это сделать?

**ОТВЕТ** • Бросьте ботинок или какой-то другой предмет в любом направлении, и вы сдвинетесь (к сожалению, ненамного) в противоположном. Поскольку трения между вами и льдом нет, общее количество движения — вашего и брошенного ботинка — останется равным нулю. Когда вы сообщаете импульс брошенному предмету, вы приобретаете точно такой же импульс в противоположном направлении.

Те же физические процессы происходят, когда кто-то пытается катнуть шар для боулинга, стоя на роликовых коньках, у которых трение качения мало. Я как-то раз попытался. Коньки подо мной поехали назад, корпус остался на месте, и от падения лицом вниз меня спасло лишь то, что я схватился за человека рядом.

Чтобы перевернуться на очень скользком льду, нужно вытянуть одну руку и аккуратно ударить ею по льду. Хотя между льдом и рукой нет трения, при ударе со стороны льда на руку действует сила, направленная вверх. Эта сила позволит вам перевернуться на спину.

### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

#### 1.102 • ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВРАЩЕНИЙ ИМЕЕТ ЗНАЧЕНИЕ

Если вы пройдете три метра на север, три метра на восток, три метра на запад и три метра на юг, вы вернетесь в ту же самую точку, независимо от того, в какой последовательности вы проделаете эти четыре коротких отрезка пути. (Чтобы иметь возможность проделать все эти эволюции, вы должны находиться не ближе трех метров к любому из полюсов.) С вращением все иначе. Опустите руку вниз ладонью к бедру. Не поворачивая запястье, 1) поднимите руку так, чтобы она была вытянута вперед, 2) в горизонтальной плоскости отведите ее так, чтобы она указывала вправо, и 3) опустите ее вниз так, чтобы она в результате была направлена вдоль туловища. Теперь ладонь направлена вперед. Проделайте все эти движения в обратном порядке — в сторону, вперед, вниз. Тогда рука вернется в исходное положение и будет прижата к бедру. Куда будет направлена ладонь в конце?

### 1.103 • ВОЛЧКИ ТОЖЕ БЫВАЮТ РАЗНЫЕ

Почему вращающийся волчок не падает, даже когда он довольно сильно отклоняется от вертикали? Почему некоторые волчки изначально «спят», то есть



крутятся, стоя прямо, а другие *прецессируют* (вершина центральной оси волчка обращается вокруг вертикальной оси, как это показано на рис. 1.36а)? Почему на прецессию часто накладывается *нута́ция* — дополнительное вращение оси волчка вокруг конуса с углом, существенно меньшим, чем при прецессии? Существуют ли различные типы нутаций? Почему некоторые вращающиеся волчки сразу опрокидываются, а другие крутятся и крутятся?

**ОТВЕТ** • Обычно когда на тело действует сила, оно движется в направлении этой силы. Но когда тело еще и вращается, приложенная сила может вызвать его движение в перпендикулярном этой силе направлении. Такое движение кажется невозможным, и поэтому волчки (и гироскопы вообще) так интересны. Даже если ребенок еще не знаком с физическими законами, он знает, что наклонившийся волчок должен сразу же упасть, а не прецессировать.

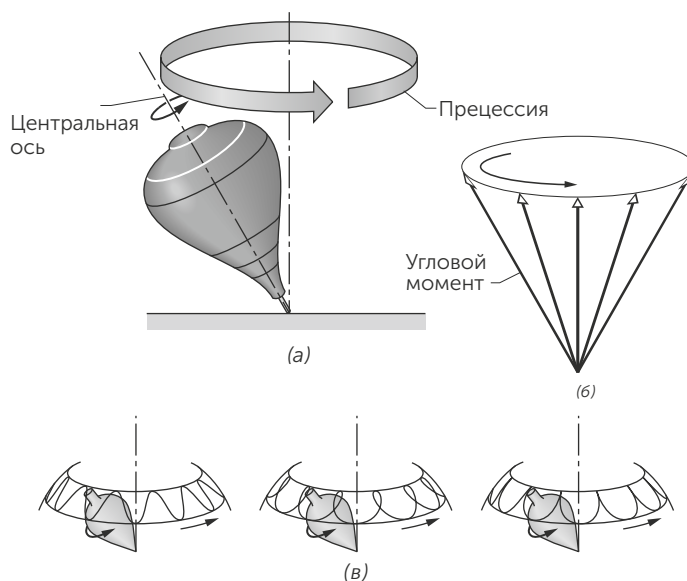
Традиционно прецессию объясняют угловым моментом волчка, который зависит от скорости его вращения вокруг длинной оси. Угловой момент — вектор, направленный вдоль этой оси. Представьте себе мгновенный снимок волчка, вращающегося с большой скоростью против часовой стрелки, если смотреть сверху, и наклонившегося под каким-то углом. На рис. 1.36б угловой момент волчка представлен вектором, направленным по центральной оси вверх.

Из-за того, что сила тяжести, действующая на волчок, направлена вниз, она создает вращающий момент, стремящийся повернуть волчок относительно точки соприкосновения его с полом, в результате чего волчок должен упасть. Однако поскольку волчок вращается и уже обладает угловым моментом, этот вращающий момент только меняет направление углового момента, поворачивая вектор вокруг точки опоры, при этом сам вектор движется по поверхности конуса. Поскольку угловой момент направлен вдоль центральной оси волчка, центральная ось движется по той же поверхности.

Как только волчок запустили, он начинает наклоняться, а его центр масс немного опускается. При этом должны выполняться два закона сохранения: угловой момент волчка относительно вертикальной оси и его полная энергия должны оставаться постоянными. Поскольку опускание центра масс приводит к отклонению оси вращения от вертикали, скорость прецессии должна быть достаточно высока, чтобы полный угловой момент оставался постоянным. Вследствие

опускания центра масс потенциальная энергия переходит в кинетическую.

Волчок не может продолжить падение, иначе не будут выполняться оба закона сохранения, поэтому центр масс не опускается ниже некоторой точки. Достигнув ее, он снова начинает подниматься, и прецессия замедляется. Такое качание между самой высокой и самой низкой точками, разрешенными законами сохранения, называется нутацией, которая накладывается на прецессию. Существует три типа нутации в зависимости от того, что делает в высшей точке центр масс волчка: волчок может на мгновение перестать прецессировать, продолжить прецессировать в том же направлении, что и в низшей точке, или ненадолго поменять направление прецессии на противоположное (рис. 1.36в). Какой из вариантов волчок выберет, зависит от начальной, то есть приданной волчку при запуске, прецессии — она может совпадать с направлением прецессии, вызванной моментом силы тяжести, быть направлена в противоположную сторону, а может и вообще отсутствовать.



**Рис. 1.36 / Задача 1.103.** а) Прецессия вращающегося волчка относительно вертикальной оси. б) Вращение вектора углового момента вокруг вертикали. в) Нута́ция при прецессии.

Если раскрутить волчок достаточно сильно и отпустить, он будет крутиться в вертикальном положении без прецессии и нутации. Но поскольку сопротивление воздуха и трение в точке касания пола постепенно «съедают» его энергию, она упадет до некоторой критической, после чего волчок начнет крениться, прецессировать и нутировать. Когда энергия волчка

уменьшится еще сильнее, волчок еще больше наклонится, скорость прецессии возрастет, нутация тоже усилится и волчок в конце концов упадет на пол.

Спящий волчок сконструирован так, что может вращаться со скоростью выше критической достаточно долго, так как трение в точке опоры поддерживает волчок в вертикальном положении и он не падает. Обычно такой волчок имеет большой радиус и закругленную опору, хотя и качество поверхности пола тоже важно. Трение возникает из-за того, что опора при вращении волчка проскальзывает на полу, а из-за прецессии она описывает на нем окружность.

### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

#### 1.104 • НЕПОСЛУШНЫЙ ЧЕМОДАН

Говорят, что известный физик Роберт Вуд из Университета Джонса Хопкинса как-то сыграл шутку с ничего не подозревавшим портье одного отеля. Якобы перед приходом портье Вуд раскрутил массивный маховик и вложил его в чемодан. Пока портье нес чемодан по прямому коридору, он чувствовал только вес чемодана. Но когда он попытался завернуть за угол, чемодан, словно заколдованный, отказался заворачивать. Свидетели говорили, что портье так испугался, что бросил «взбесившийся» чемодан и сбежал.

#### 1.105 • КИТАЙСКИЙ ВОЛЧОК

Необычный волчок, получивший название *китайского волчка*, или волчка Томсона, представляет собой шарик со срезанной верхушкой и ножкой, расположенной в центре среза. Чтобы запустить волчок, нужно раскрутить ножку между большим и указательным пальцами, а затем поставить волчок на пол так, чтобы его верхушка (наиболее тяжелая часть) находилась внизу. Если между волчком и полом трение достаточно, волчок, вращаясь, начнет заваливаться набок, затем перевернется и встанет на ножку, не прекращая вращения. По отношению к вам направление вращения волчка поменяется на противоположное, а если смотреть сверху, оно останется неизменным.

Тот же эффект вы будете наблюдать, если раскрутите футбольный мяч\* или крутое яйцо. Как может центр

\* Имеется в виду мяч для американского футбола, имеющий форму неправильного эллипсоида. *Прим. пер.*

масс каждого из этих предметов подниматься — ведь на него действует сила тяжести?

**ОТВЕТ** • Просто этот эффект не объяснить — только с помощью очень сложных математических выкладок. Но ключевой момент в этих объяснениях — сила трения, которая действует на часть волчка, соприкасающуюся с полом. Каким-то образом сила трения создает вращающий момент, который выравнивает волчок, но детали процесса объяснить трудно. Есть одна простая идея: сила трения может усилить прецессию (см. предыдущий пример), вызывающую поднятие центра масс, как это происходит и в других волчках.

#### 1.106 • ВРАЩЕНИЕ ЯЙЦА

Отличить вареное яйцо от сырого можно, не разбивая его, а раскрутив на одной из сторон. Сырое яйцо вращается тяжело, а крутое — прекрасно, и если его как следует раскрутить, оно встанет на один конец. Если сырое яйцо крутится на боку и вы притронетесь к его верхней стороне и остановите, а потом уберете руку, оно опять начнет крутиться. Крутое же яйцо после прикосновения перестает вращаться. Можете ли вы объяснить эти явления?

**ОТВЕТ** • Разница между сырым и крутым яйцами состоит в том, что внутри одного из них находится жидкость, а внутри другого — твердое содержимое. Колебания жидкости внутри яйца взаимодействуют с его вращением, и когда вы на мгновение остановите вращение сырого яйца, а потом уберете руку, вращение «перезапускается». Если достаточно быстро закрутить крутое яйцо, оно поведет себя как китайский волчок (см. предыдущую задачу) и встанет на попа.

#### 1.107 • ДИАБОЛО

Диаболо — старинная игрушка, которая состоит из двух конусов, обращенных вершинами друг к другу и соединенных узкой перемычкой (рис. 1.37). Эта катушка раскручивается при помощи веревки, которая проходит под перемычкой. К концам веревки приделаны ручки, за которые ее держат. Сначала вы ставите игрушку на пол, опускаете правую руку (если вы правша) вниз, а левую поднимаете вверх. Затем вы натягиваете веревку, стремительно поднимая вверх и правую руку и давая возможность левой руке следовать за веревкой вниз. Трение, возникшее между веревкой и перемычкой, закручивает диаболо.

Чтобы увеличить скорость вращения, нужно ослабить натяжение веревки, позволив диаволо опуститься, затем изменить положение рук и повторить процедуру. Если скорость достаточна, диаволо будет вращаться на веревке и не падать. Быстро подняв руки, вы можете даже подбросить диаволо в воздух и поймать его на веревку.

Почему вращение стабилизирует диаволо? (Без вращения игрушка просто слетит с веревки.) Если игрушка начнет наклоняться, как ее можно стабилизировать? Если дальний конец диаволо начнет заваливаться, как можно вернуть его в прежнее состояние? Как можно повернуть диаволо влево или вправо? (Если поискать в интернете сайты, посвященные диаволо, можно найти множество трюков с этой игрушкой.)

**ОТВЕТ •** Если поднять диаволо на веревке, но не закрутить его, оно вряд ли будет балансировать — скорее всего, слетит с веревки. Если, наоборот, раскрутить его до больших скоростей, у него появится большой угловой момент, который стабилизирует положение. Угловой момент — вектор, направленный вдоль центральной оси игрушки. Если раскрутить игрушку, как описано в начале задачи, этот вектор будет направлен по горизонтали на вас. Вращающееся диаволо находится в равновесии, потому что только вращающий момент может изменить направление его углового момента, а если диаволо находится на веревке в равновесии, значит, его центр масс находится над веревкой. В этом случае вектор силы тяжести, направленный вниз, проходит через веревку и не может создать момент, поворачивающий диаволо относительно веревки. Соответственно, сила тяжести не может изменить угловой момент.

Если диаволо находится в близком к равновесному состоянии, сила тяжести со стороны перевешивающей части создает небольшой вращающий момент, и это приводит к тому, что у вектора углового момента появится небольшая дополнительная составляющая, направленная влево или вправо. В результате под действием силы тяжести диаволо не опрокинется, а будет *прецессировать* влево или вправо — его центральная ось будет поворачиваться влево или вправо. (Трение со стороны веревки тоже создает момент сил, но если веревка находится по центру игрушки или близко от него, этот вращающий момент только немного замедлит вращение.)

Если дальний конец диаволо начнет заваливаться, вы можете с помощью веревки создать вращающий

момент, который вернет его в прежнее состояние. Потяните за конец веревки, находящийся в правой руке, к себе, притягивая правую часть игрушки. Давление на правую сторону диаволо приведет к появлению вращательного момента, направленного вниз, в результате чего вектор углового момента снова станет горизонтальным.

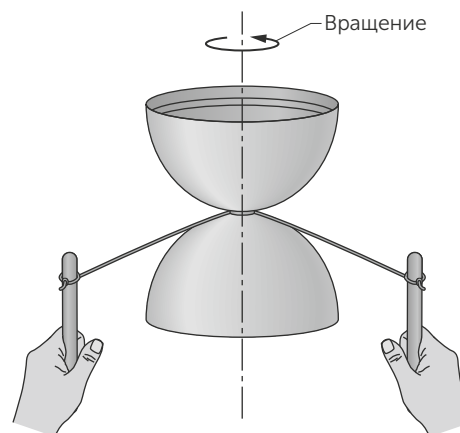


Рис. 1.37 / Задача 1.107. Вид сверху на вращающийся волчок.

Чтобы заставить диаволо повернуться направо, разведите руки, а потом потяните веревку на себя. Тогда она либо надавит на нижнюю часть игрушки, либо начнет проскальзывать в вашем направлении, и дальняя от вас часть игрушки перевесит ближнюю. Если проскальзывания не будет, давление на нижнюю часть игрушки создаст вращающий момент, и та повернется. А если возникнет проскальзывание, игрушку повернет момент силы тяжести, действующей на перевешивающую тяжелую часть.

### 1.108 • КЕЛЬТСКИЕ КАМНИ, ИЛИ «КЕЛЬТЫ»

*Кельтские камни (или «кельты»)* — забавные варианты волчков с нижней поверхностью в форме скошенного эллипсоида. Те камни, которые продаются в магазине игрушек, закручиваются только в одном направлении. Если вы попытаетесь закрутить их в другом направлении, они быстро остановятся, поднимутся, потом опустятся и начнут крутиться в том направлении, в каком им хочется. Некоторые отполированные водой камни ведут себя схожим образом, но попадаются редкие экземпляры, меняющие, пока у них не кончится энергия, направление своего вращения по несколько раз. Почему «кельты» меняют направление своего вращения?

**ОТВЕТ** • Поведение «кельтов» довольно трудно объяснить в деталях, но в общих чертах можно сказать, что изменение направления вращения происходит из-за того, что их нижняя поверхность представляет собой скошенный эллипсоид. Это значит, что оси эллипсоида не совпадают с главными осями камня, то есть с его длиной и шириной. Когда камень закручивается вокруг вертикальной оси в «неправильном» направлении, эта несоосность дестабилизирует вращение, и камень начинает раскачиваться. Из-за трения камня о стол энергия переходит из вращения в качание. Когда этот переход энергии почти заканчивается, сила трения изменяет направление и камень начинает вращаться в противоположную сторону. У некоторых «кельтов» вращение в «правильном» направлении тоже нестабильно: камень опять начинает раскачиваться, и направление вращения вновь меняется. В итоге, конечно, трение останавливает движение.

#### 1.109 • КРУТЯЩИЕСЯ МОНЕТКИ И БУТЫЛКИ

Установите монетку на ребро, закрутите ее, прислушайтесь и понаблюдайте за ней. Когда она начинает падать, издаваемый ею звук сначала понижается, а потом повышается. Вы думаете, это происходит потому, что она вращается быстрее? Совсем наоборот — медленнее. Если вы проследите за какой-нибудь стороной монетки, то увидите, что вначале она размыта из-за быстрого движения, но позже ее уже можно разглядеть.

Поставьте бутылку на кромку дна и сбалансируйте ее. Затем зажмите ее между ладонями и раскрутите. Когда бутылка раскрутится, она начнет постепенно выпрямляться, а издаваемый ею звук будет повышаться. Можно попытаться закрутить бутылку, находящуюся почти в горизонтальном положении, но запустить ее сложнее. Если вам все-таки удастся это сделать, при приближении к горизонтальной поверхности издаваемый ею звук понижается. Можете ли вы объяснить такое поведение монетки и бутылки?

**ОТВЕТ** • Монетка крутится вокруг своей центральной оси, но ось тоже вращается вокруг вертикали — это движение называется прецессией. Прецессия происходит из-за вращающего момента, создаваемого весом монетки. По мере того как из-за трения и сопротивления воздуха энергия монетки уменьшается, она начинает крениться и вращаться с меньшей скоростью, поэтому изображение на монетке становится легче рассмотреть. При небольших углах наклона скорость

прецессии уменьшается, но затем при дальнейшем опускании центра масс начинается перекачка потенциальной энергии в дополнительную кинетическую энергию прецессии. Звук, который вы слышите, издается в процессе прецессии, когда края монетки стучат по столу. Когда скорость прецессии повышается, повышается и высота звука.

Когда бутылка закручивается в почти вертикальном положении, она тоже прецессирует. По мере того как центральная ось приближается к вертикали, центр масс опускается, потенциальная энергия перекачивается в прецессию и тон звука повышается. Когда бутылка крутится в почти горизонтальном положении, скорость прецессии уменьшается, по мере того как бутылка наклоняется до тех пор, пока не достигнет некоторого малого значения. После этого бутылка ложится набок и продолжает крутиться лежа.

#### 1.110 • ДЗЮДО, АЙКИДО И ОЛИМПИЙСКАЯ БОРЬБА

В дзюдо, айкидо и борьбе, чтобы заставить соперника потерять равновесие и упасть, следует знать и применять технические приемы. Наиболее известный прием в дзюдо — бросок через бедро. Нужно ухитриться перекинуть противника через свое бедро и уложить на мат. Хотите верить, хотите нет, но без знания физики сделать это практически невозможно, особенно если ваш соперник крупнее и сильнее вас. Как правильно выполнять бросок через бедро?

Рассмотрим пример из айкидо. Соперник обхватил вас сзади руками, сильно сжав ваши запястья. Как вы сможете бросить его на мат?

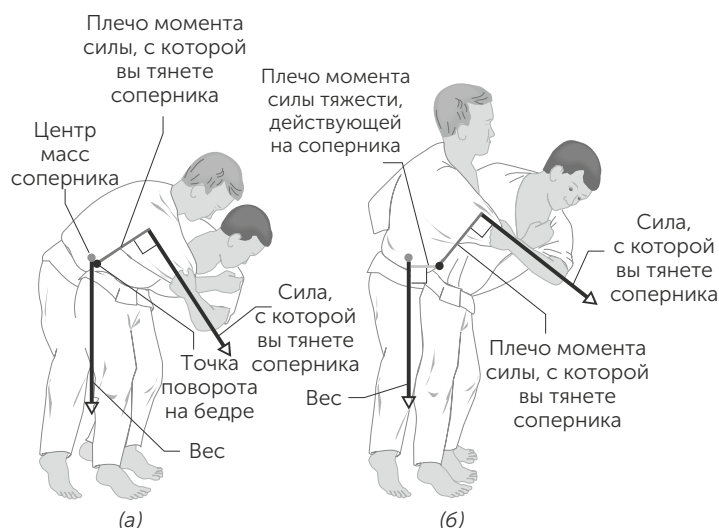
Иногда в айкидо используется деревянное оружие. Что делать, если соперник толкает вас концом длинной палки, но при этом стоит слишком близко, чтобы вы могли ухватиться за палку и дернуть? К тому же тогда сила столкнулась бы с другой силой. Есть ли более надежный способ уложить соперника на мат?

**ОТВЕТ** • Чтобы выполнить бросок через бедро, подождите, пока противник сделает шаг вперед правой ногой, и тоже сделайте шаг вперед правой ногой, поставив ее между ног соперника. Потяните его за одежду вниз и вправо, чтобы его корпус согнулся вперед, а центр масс переместился к пупку. При этом нужно развернуться влево и подставить свои бедра под него.

Теперь центр масс противника находится примерно на уровне вашего правого бедра (рис. 1.38a). Потянув



соперника за правый рукав кимоно, вы легко сможете перекинуть его через свое правое бедро и уложить на мат. Самое главное в этом броске — в первой фазе согнуть противника. Если этого не сделать, его центр масс будет от вас на большем расстоянии (рис. 1.38б), и когда вы попытаетесь перекинуть его через бедро, вам придется бороться с его весом, который создаст вращающий момент, направленный в противоположную сторону относительно момента, создаваемого вашими усилиями. Все это затруднит вращение, и от вас потребуется больше усилий, поскольку придется фактически поднимать соперника, а если он тяжелый, вам это, скорее всего, не удастся.



**Рис. 1.38 / Задача 1.110.** Бросок через бедро в дзюдо: а) в правильном и б) в неправильном исполнении.

Ответ на первый вопрос про айкидо: нужно быстро прижать свои руки к груди так, чтобы захватить руки соперника, одновременно выдвинуть правую ногу вперед, наклониться и развернуться вправо. Прделав это, вы заставите противника согнуться и сместите его центр масс. Тогда он не сможет помешать вам, когда вы перекинете его через себя и бросите на мат.

Техникой боев на палках сложно овладеть, поэтому мой ответ здесь будет очень кратким. Когда ваш соперник делает выпад вперед, вам нужно шагнуть вправо от палки, повернуться и левой рукой ухватиться за свободный конец палки, а правой — за конец между его руками. Затем быстро повернуть палку вверх и назад над его головой так, чтобы он опрокинулся назад. Важно, чтобы вы начали действовать, когда палка движется вперед, поскольку ваш противник в это время занят

этим движением и не может оказать сопротивления развороту палки вверх.

### 1.111 • ВРАЩЕНИЕ ПУЛИ И ДЛИННЫЕ ПАСЫ В АМЕРИКАНСКОМ ФУТБОЛЕ\*

Почему винтовки изготавливают с *нарезкой* (спиральными канавками на внутренней поверхности ствола), которая придает вылетевшей пуле вращение? Что заставляет пулю опускаться «носовую» часть и врезаться в мишень «лобовой» частью, когда пуля летит по длинной параболической траектории?

Почему в американском футболе квотербек\*\* должен сильно закрутить мяч, если хочет, чтобы он полетел по гладкой траектории и в последней фазе полета повернулся носом вниз? При этой технике мяч не только летит дальше, но и принимающему пас его легче поймать. Пантер\*\*\* бьет по мячу с небольшой подкруткой, чтобы мяч летел по такой же длинной плавной траектории, но зачем? Разве это не облегчает принятие мяча игрокам команды соперника?

**ОТВЕТ •** Если вылетевшая из винтовки пуля или брошенный мяч достаточно сильно закручены вокруг длинной оси, они ведут себя как гироскоп, который стремится сохранить положение своей оси. Поскольку на пулю действует сила тяжести, она летит по параболе. Однако воздействие сопротивления воздуха, зависящее от скорости объекта и от его вращения, приводит к тому, что ось вращения совпадает с касательной к траектории. А раз объект летит по параболе, нос его постепенно будет опускаться.

Некоторые квотербеки не умеют раскручивать мяч только вокруг длинной оси и посылают беспорядочно раскачивающийся мяч. К такому его поведению приводит дополнительное закручивание вокруг короткой оси. Это раскачивание является примером прецессии. Действительно, в этом случае длинная ось, вокруг которой вращается мяч, сама описывает окружность при своем вращении. И вращение мяча, и прецессия происходят в одном и том же направлении (например,

\* Американский футбол — игра, мало похожая на европейский футбол (который американцы называют соккером). В него играют руками, мяч имеет форму эллипсоида. Игра состоит из серии коротких схваток, правила игры сложные. *Прим. пер.*

\*\* Квотербек — основной игрок нападения, разыгрывающий мяч. *Прим. пер.*

\*\*\* Пантер — игрок, получающий мяч от центрального и бьющий по нему ногой. *Прим. пер.*

по часовой стрелке, если защитник — правша), и скорость прецессии составляет примерно  $3/5$  скорости вращения.

Если все же квотербек сумел правильно закрутить мяч при пасае, он не только полетит дальше, но его будет и намного легче принять, поскольку понятно, куда он прилетит. Когда пантер закручивает мяч, это тоже делается для того, чтобы мяч пролетел как можно дальше, но еще и для того, чтобы он как можно дольше находился в воздухе и команда успела подбежать в нужную часть поля, прежде чем он упадет. Время, которое мяч проводит в воздухе, — это так называемое *время зависания*. Если мяч отбит без закручивания или с неправильным закручиванием, сопротивление воздуха быстро отберет кинетическую энергию у мяча, и время зависания уменьшится.

Если стрелять прямо вверх, в зенит, то пули иногда возвращаются на землю вниз хвостовой частью. Возможно, они никого и не убьют, но ранить могут. Когда пули падают хвостовой частью вниз, они летят намного медленнее, чем если бы летели вниз носом, и вероятность кого-то поранить у них меньше. И все же, если кто-то рядом с вами начинает стрелять в воздух, лучше спрятаться, а не стоять, восхищенно застыв и глядя вверх.

### 1.112 • РАСКАЧИВАНИЕ ДЕТСКИХ КАЧЕЛЕЙ

Как нужно *раскачивать* качели, чтобы они взлетали выше? А если качели вначале были неподвижны, как можно заставить их качаться, если не отталкиваться от земли и не просить кого-нибудь подтолкнуть вас?

**ОТВЕТ** • Один способ состоит в том, чтобы встать на качели и раскачиваться, приседая в высшей точке траектории качелей и вставая в полный рост в низшей точке. Вставая, вы увеличиваете скорость, что можно объяснить с точки зрения энергии или углового момента.

При этом вы поднимаете свой центр масс и совершаете работу против ощущаемой вами центробежной силы. Эта работа переходит в кинетическую энергию, следовательно, скорость повышается. Еще вы, вставая, сдвигаете свой центр масс ближе к точке, вокруг которой происходит вращение. Эти действия похожи на то, что делает фигурист, когда прижимает к себе руки, чтобы раскрутиться на месте. Поскольку его угловой момент не может измениться, а момент инерции уменьшается, скорость вращения растет. На качелях ваша скорость вращения тоже увеличивается, а увеличение скорости в нижней точке, безусловно, приводит к тому, что качели взлетают выше. Ваш рост влияет на скорость подкачки энергии, а масса — нет.

Можно раскачивать качели и другим способом: с помощью веревок, на которых они висят: притягивая их к себе при движении качелей вперед и отталкивая от себя, когда они летят назад.

Можно раскачать качели и еще одним способом — встать или сесть на них прямо, согнутыми руками взяться за веревки и резко отклониться назад до тех пор, пока руки полностью не выпрямятся. Ваш центр масс переместится относительно сиденья качелей, а сиденье — относительно перекладины, на которой качели висят. Резкий наклон подпитывает движение качелей кинетической энергией и увеличивает угловой момент.

### 1.113 • ГИГАНТСКОЕ КАДИЛО

Собор в Сантьяго-де-Компостела — городе на северо-западе Испании — знаменит, в частности, тем, что последние 700 лет *фимиам* на богослужениях там курится из огромного кадила. Кадио весом 80 кг висит на веревке, конец которой перекинут через балку, находящуюся на двадцатиметровой высоте. Веревку держит группа служителей (рис. 1.39).

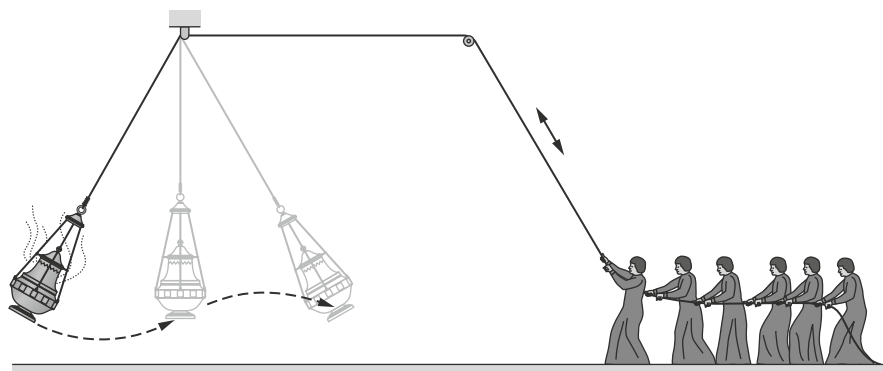


Рис. 1.39 / Задача 1.113. Раскачивание кадила.

Кто-то подталкивает кадило, чтобы оно начало качаться, а служители раскачивают его дальше. Для этого они с силой тянут за веревку в нижней точке траектории кадила и ослабляют усилие в верхней. Когда они натягивают веревку, кадило поднимается примерно на три метра, а когда отпускают — возвращается на место. Через 17 колебаний, которые занимают примерно две минуты, кадило начинает отклоняться почти на 90°, то есть практически касается потолка. Кадило так быстро пролетает нижнюю точку, что заложенные в него угли разгораются и фимиам начинает куриться. Как своими умелыми и согласованными действиями служители пополняют маятник энергией?

**ОТВЕТ** • Служители добавляют энергию в эти курящие фимиам качели примерно так же, как в предыдущей задаче вы добавляли энергию обычным качелям, чтобы их раскачать. Когда служители тянут за веревку и укорачивают длину маятника, кадило пролетает самую низкую точку траектории очень быстро и нужно тянуть очень сильно. В этот момент служители совершают большую работу, уменьшая длину веревки и поднимая кадило, и эта работа превращается в его кинетическую энергию. Когда веревка опять вытягивается до прежней длины в верхней точке траектории кадила, оно движется медленно или на мгновение совсем застывает на месте.

#### 1.114 • МАЯТНИК В КОЛОДЦЕ

В известном рассказе Эдгара Аллана По «Колодец и маятник» узник инквизиции очнулся связанным на полу темницы, а над ним на высоте 10–13 м висел маятник. Сначала он казался узнику неподвижным, но когда чуть позже тот взглянул опять, то увидел, что маятник раскачивается с амплитудой, равной примерно метру, и медленно опускается. Еще позже он с ужасом обнаружил, что «...его нижняя часть представляла блестящий стальной полумесяц, длиною около фута от одного рога до другого; рога были направлены кверху, лезвие казалось острым, как бритва...».

Шли часы, движение маятника становилось все более завораживающим — полумесяц постепенно опускался, а размах колебаний увеличивался, достигнув метров десяти. Замысел инквизиторов проявился — маятник раскачивался непосредственно над сердцем узника. «Вниз — он упорно скользил вниз! Я с каким-то безумным наслаждением сравнивал быстроту его размаха с медлительностью опускания. Направо, налево — далеко,

далеко убежал и потом опять возвращался с визгом дьявольским... Вниз — неизменно, неустанно вниз!»\*

Представьте себе, что полумесяц висит на веревке, которую постепенно отпускают. Почему, когда он опускается, размах его колебаний увеличивается?

**ОТВЕТ** • Размах колебаний увеличивается потому, что при опускании полумесяца его потенциальная энергия переходит в кинетическую. Однако из расчетов следует, что при указанной Эдгаром По начальной высоте маятника и размахе его колебаний в тот момент, когда полумесяц начал разрезать одежды узника, он вряд ли мог качаться с амплитудой больше трех метров и уж никак не десять метров, о которых говорится в рассказе. (То, что автор ошибся в математических расчетах, вряд ли утешило бы героя рассказа.)

#### 1.115 • ПЕРЕВЕРНУТЫЙ МАЯТНИК И ОДНОКОЛЕСНЫЙ ВЕЛОСИПЕД

Если перевернуть обычный маятник и попытаться поставить его на стержень, то, конечно, при малейшем толчке он потеряет устойчивость и упадет. Однако если его установить на подставку и заставить ее быстро колебаться вверх-вниз и если между маятником и подставкой создать хотя бы небольшое трение, он встанет вертикально. Почему? Причем он будет стоять столь устойчиво, что если вы слегка толкнете его вбок, он быстро вернется в исходное вертикальное положение.

Если же подставка будет быстро колебаться не в вертикальной, а в горизонтальной плоскости, маятник будет колебаться около вертикальной оси, стоя вверх ногами, как будто сила тяжести поменяла направление на противоположное. Тот же эффект использует велосипедист, удерживающий равновесие на одноколесном велосипеде. Когда он начинает падать, скажем, вперед, он сдвигает колесо чуть вперед и мгновенно восстанавливает равновесие. Если же он начинает падать назад, то сдвигает колесо назад.

Можно ли несколько стержней, поставленных друг на друга, заставить стоять вертикально, как несколько перевернутых маятников, если нижний из них колеблется в вертикальном направлении? Можно ли заставить длинный провод стоять вертикально? И самый главный вопрос: можно ли заставить стоять вертикально веревку — как в знаменитом индийском фокусе, где она стоит вертикально и ее верхний конец ничто не держит?

---

\* Цитируется в переводе М. А. Энгельгардта. *Прим. пер.*

**ОТВЕТ** • При колебаниях вверх-вниз маятник занимает почти вертикальную позицию, если ускорение, развиваемое при колебаниях, превышает ускорение свободного падения. В каком-то смысле маятник и не может упасть, поскольку его периодически быстро тянет вниз, и это заставляет его выравниваться. Если подставка достаточно быстро колеблется в горизонтальном направлении, маятник тоже не может упасть. Тут действует тот же принцип, что и у велосипедиста на одноколесном велосипеде: когда маятник начинает заваливаться набок, подставка под ним двигается в том же направлении, и падение останавливается.

Несколько стержней, поставленных друг на друга, можно заставить стоять вертикально, если нижний будет колебаться вверх-вниз достаточно быстро. Провод, если он слишком длинный, чтобы стоять вертикально самостоятельно (тогда он сгибается под действием своего веса), можно заставить стоять вертикально с помощью колебаний вверх-вниз. Но веревку к такому поведению принудить нельзя, поскольку она слишком гибкая, и индийский фокус — чистая иллюзия.

### 1.116 • НОШЕНИЕ ТЯЖЕСТЕЙ НА ГОЛОВЕ

В культуре некоторых народов, например африканских, люди (особенно женщины) могут носить на голове огромные тяжести. Возможно, у них накачаны мышцы шеи, развито чувство равновесия, но смотришь на них и понимаешь, что они это делают почти без усилия. Например, женщина может нести груз весом до 20% своего веса и даже не запыхаться, в то время как в Европе или Америке женщины, обладающие примерно таким же здоровьем и мускулатурой, считали бы этот вес неподъемным. В чем же секрет лучших в мире носильщиков тяжестей из Африки?

**ОТВЕТ** • При ходьбе центр масс человека движется вверх-вниз. Выше всего центр масс оказывается, когда вес переносится на одну ногу, а вторая нога проносится мимо нее вперед. А ниже всего центр масс оказывается, когда обе ноги находятся на земле и вес переносится с поставленной сзади ноги на поставленную впереди. Это периодическое движение центра масс в вертикальной плоскости и периодическое движение точки опоры, расположенной ниже центра масс, по горизонтали аналогично движению велосипедиста на одноколесном велосипеде, которому для восстановления равновесия нужно перемещаться то вперед, то назад. В том числе часть энергии периодически перекачивается

из потенциальной (связанной с высотой центра масс) в кинетическую (связанную со скоростью движения центра масс вперед). Обычно в течение 15 мс после того, как центр масс проходит наивысшую точку подъема, перекачка энергии происходит неэффективно. Это означает, что, когда центр масс начинает опускаться, не вся потенциальная энергия переходит в кинетическую, и чтобы двигаться дальше, человек должен использовать силу мускулов.

Лучшие носильщицы, например в Кении, когда они *не несут* груз, идут обычной — «неэффективной» — походкой. Однако когда у них на голове груз, периоды «неэффективности», наступающие сразу после прохождения центром масс наивысшей точки, сокращаются. На самом деле, чтобы нести умеренно тяжелый груз (20% от своего веса), от носильщицы требуется не больше усилий, чем когда она вообще ничего не несет. Видимо, это связано с тем, что тяжесть на голове заставляет женщину эффективнее, чем обычно, перекачивать потенциальную энергию в кинетическую. И только если вес груза превышает 20% ее веса, женщине приходится тратить больше энергии, чем когда она идет налегке, но даже в этом случае она тратит меньше энергии, чем европейка, которая ходит совершенно иначе.

### 1.117 • НОШЕНИЕ ТЯЖЕСТЕЙ НА ГИБКИХ ШЕСТАХ

В Азии некоторые народы носят не очень тяжелые грузы, привязывая их к противоположным концам гибких шестов, сделанных, например, из бамбука (рис. 1.40). Когда человек с этим грузом идет или бежит, груз вместе с шестом колеблется в вертикальном направлении. Помогает ли это нести груз?

**ОТВЕТ** • Вертикальные колебания туловища человека вызывают вертикальные колебания и в грузах, и в шесте. Предположим, грузы висят на жестком коромысле. Тогда при движении туловища вверх плечи должны развивать большие усилия, чтобы поднять грузы и коромысло. А когда туловище опускается, плечи испытывают меньшую нагрузку, так как коромысло с грузами опускается вместе с ними. Таким образом при ходьбе или беге с жестким коромыслом нагрузка на плечи изменяется в широких пределах.

Главная задача пружинящего шеста — сгладить колебания нагрузки на плечи. Фокус в том, что, когда колебания в шесте устанавливаются, привязанные к нему грузы колеблются в противофазе с центром



шеста: когда грузы поднимаются, центр шеста опускается, и наоборот. Кроме того, центр шеста колеблется в противофазе с движением плеч: когда плечи поднимаются, центр шеста опускается. Таким образом, плечи и грузы движутся в фазе, и поэтому нагрузка на плечи остается почти постоянной. Когда плечи движутся вверх, пружинящий шест посылает и грузы вверх. Когда плечи движутся вниз, движущийся вверх центр шеста поддерживает опускающиеся грузы.

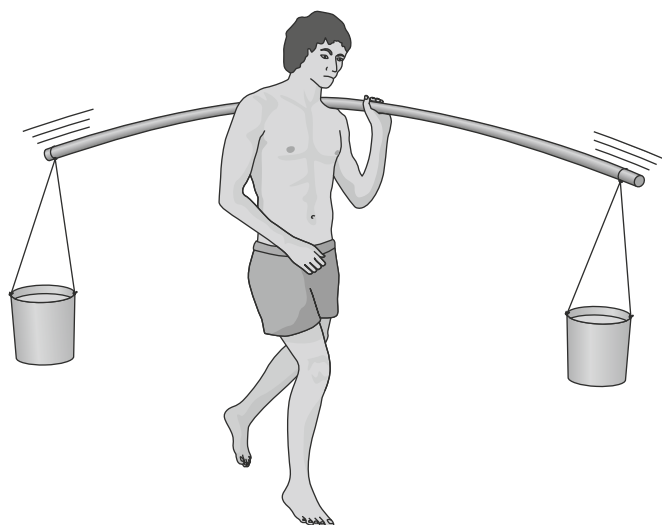


Рис. 1.40 / Задача 1.117. Переноска грузов на колеблющемся шесте.

### 1.118 • СВЯЗАННЫЕ МАЯТНИКИ

Сделаем систему из двух маятников, для чего прикрепим концы двух одинаковых отрезков нити к опоре и обернем каждую нить по одному разу вокруг горизонтально расположенного стержня примерно на расстоянии одной трети от точки крепления нитей (рис. 1.41). К нижним концам нитей привяжем по одинаковому грузику. Придержим один грузик, а второй отведем в сторону до тех пор, пока он не станет параллелен стержню, после чего отпустим оба грузика. Вы, верно, думаете, что будет раскачиваться только тот маятник, на конце которого висит смещенный нами груз. Но это не так: колебательные движения постепенно будут переходить ко второму маятнику. Когда передача движения закончится и первый маятник остановится, начнется передача в обратном направлении. Таким образом, движение все время как бы перетекает от одного маятника к другому.

Похожее поведение будут демонстрировать и другие системы, изображенные на рис. 1.41. На рис. 1.41б два маятника соединяются пружиной. В третьей системе (рис. 1.41в) маятники привязаны к узкой трубке, вращающейся вокруг горизонтальной струны, а сами маятники качаются в перпендикулярной по отношению к трубке плоскости. В четвертой системе (рис. 1.41г) они качаются перпендикулярно соединяющей их короткой струне.

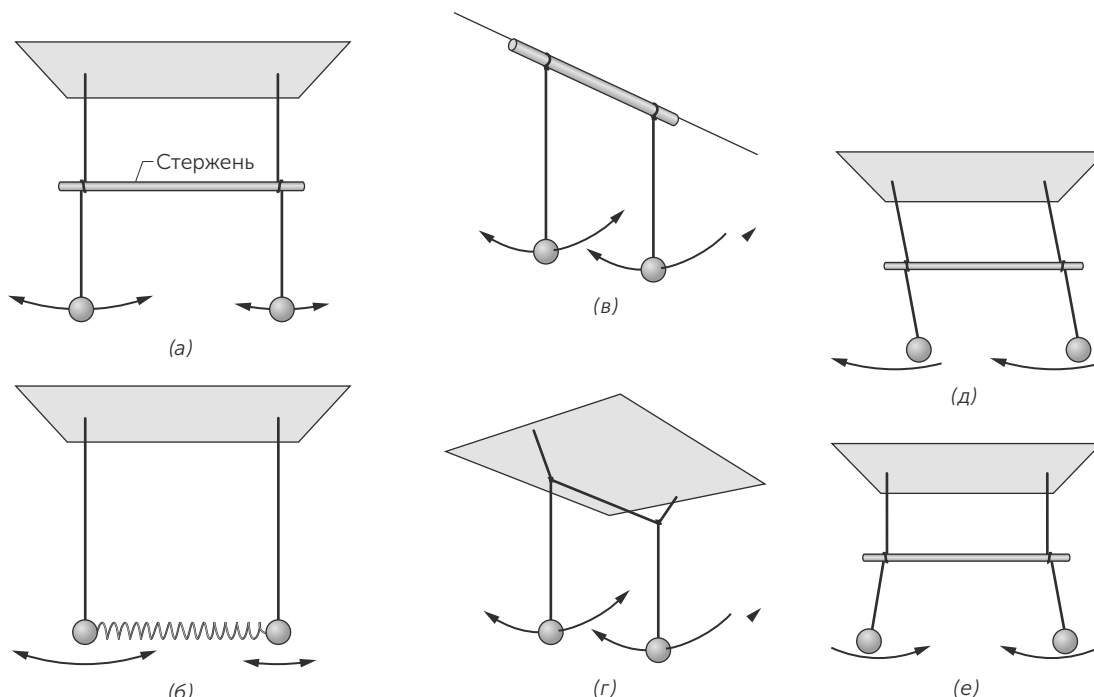


Рис. 1.41 / Задача 1.118. а)–г) Связанные маятники. д)–е) Нормальные моды.

Возможно, вы удивитесь, но обмен колебаниями можно увидеть и у двух одинаковых компасов. Положите один из них на стол, а другой сначала потрясите, чтобы стрелка начала колебаться, и положите рядом с первым. Колебания будут переходить от стрелки одного компаса к стрелке другого.

Как объяснить такое поведение маятников?

**ОТВЕТ** • Рассмотрим только первую систему связанных маятников. Передача движения возникает из-за передачи энергии, когда маятники тянут и толкают друг друга посредством стержня. Никакой передачи энергии не будет, только если вы раскачаете маятники одним из двух особых способов, при которых возникнут колебания, называемые *нормальными модами*. В одной такой моде маятники двигаются в фазе (рис. 1.41д); в движении участвует полная длина обеих нитей, и колебания имеют низкую частоту. Во второй нормальной моде маятники колеблются в точности в противофазе (рис. 1.41е). Движение в противоположных направлениях мешает участвовать в движении верхним — расположенным выше стержня — отрезкам нити, так что фактическая длина маятника меньше, чем в первой нормальной моде, и частота колебаний выше.

Если вы запускаете только один маятник, в системе возбуждаются обе моды и начинают конкурировать друг с другом. И тогда маятники колеблются с частотой, средней между частотами двух нормальных мод. Их амплитуда (размах каждого колебания) меняется с частотой, равной разности частот двух мод. Когда амплитуда одного маятника уменьшается, амплитуда другого увеличивается, и наоборот.

Аналогичный обмен движением происходит и в компасах, поскольку их стрелки колеблются относительно направления магнитного поля в точности так же, как маятники колеблются вокруг направления силы тяжести.

### 1.119 • ПРУЖИННЫЙ МАЯТНИК

Подвесьте достаточно жесткую пружину за один конец, а к другому прикрепите грузик такого веса, чтобы пружина растянулась на треть и ее длина составила  $4/3$  от первоначальной. Потяните грузик вниз, а потом отпустите его. Сначала он будет колебаться в вертикальном направлении (рис. 1.42а), но вскоре эти колебания начнут превращаться в маятниковые (рис. 1.42б). Как только вертикальные колебания совсем прекратятся, маятниковое движение начнет затухать и опять

появятся колебания грузика вдоль вертикали. Так и будет продолжаться: движение периодически будет меняться с одного вида (моды) на другой и обратно. Можно привести маятник в двухмодовый режим, если раскачать сначала не вертикальные колебания, а маятниковые.

Аналогичное чередование мод происходит в системе, изображенной на рис. 1.42в, в которой маятники соединены гибким стержнем. Стержень колеблется с частотой, удвоенной по сравнению с той, с которой колебался бы каждый из маятников, будь он свободным. В этом примере энергия переходит от колебаний маятников к колебаниям стержня.

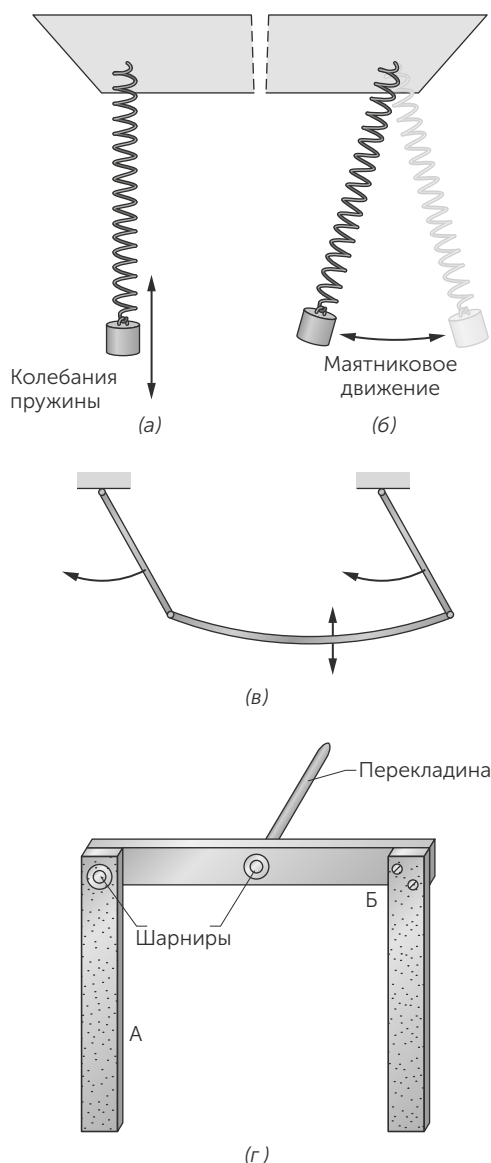
Пример столь же сложной системы изображен на рис. 1.42г. Горизонтальная планка может вращаться вокруг стержня, на котором держится вся конструкция. К одному концу этой планки жестко прикреплена вертикальная планка, а к другому — свободно вращающаяся на шарнире еще одна вертикальная планка. В этой конструкции имеется целых два маятника: маятник А — это вторая вертикальная планка, свободно висящая на горизонтальной планке, а маятник Б — система из горизонтальной планки и крепко к ней приделанной вертикальной планки. Если подогнать длины планок так, чтобы частота колебаний маятника А была равна удвоенной частоте колебаний маятника Б, и в начальный момент подтолкнуть маятник А, то возникнет периодическое чередование колебаний одного и другого маятников (рис. 1.41а).

Как в этих примерах объяснить чередование разных колебаний?

**ОТВЕТ** • Рассмотрим сначала первую систему. Если висящий на пружине груз сначала оттянуть, а потом отпустить, чтобы он отскочил строго по вертикали, пружина будет только сжиматься и разжиматься. Но так точно выдержать вертикальность невозможно — почти наверняка вы придадите ему некоторое движение вбок. Если подвесить грузик с параметрами, описанными в условии задачи, движение по вертикали будет происходить с частотой, удвоенной по сравнению с частотой чисто маятникового движения.

Предположим, что вначале грузик колеблется только в вертикальном направлении. Тогда начнется переход энергии от этой моды к маятниковой. Переход идет из-за того, что при вертикальных колебаниях меняется длина маятника. Ситуация та же, что и на детских качелях, на которых ребенок дважды встает и приседает

за время одного полного колебания качелей. Ребенок при этом меняет эффективную длину качелей и тем самым вкачивает энергию в движущиеся качели — в результате они взлетают выше и выше.



**Рис. 1.42 / Задача 1.119.** Чередование: а) вертикальных колебаний пружины и б) маятниковых колебаний. в) Чередование колебаний маятника и вертикальных колебаний соединяющего маятника упругого стержня. г) Чередование колебаний маятника А и Б.

Когда передача энергии к маятнику заканчивается, начинается обратный процесс, поскольку каждый раз, когда грузик проходит через точку максимальной высоты, он растягивает пружину. Это происходит дважды за полный цикл колебаний, так что его частота

соответствует частоте вертикальных колебаний, и грузик опять начинает колебаться по вертикали. Но когда эти колебания становятся доминирующими, начинается перекачка энергии обратно в маятниковое движение. И так далее.

### 1.120 • МОЛЧАЛИВЫЙ КОЛОКОЛ

Когда в Кельнском соборе установили колокол и начали раскачивать его язык, колокол не зазвонил. Оказалось, что язык колебался с той же частотой, что и колокол, причем в фазе с ним, и просто не мог встретиться с внутренней поверхностью колокола. Как, по-вашему, следовало решать проблему, кроме как сбросить колокол с колокольни?

**ОТВЕТ •** Когда два маятника подвешены рядом и один из них короче и легче другого, они могут колебаться синфазно. Сам кельнский колокол был более длинным и массивным маятником, а его язык — более коротким и легким маятником, причем слишком коротким. После того как язык ударил по колоколу, он отскочил от него, подстроился под движение колокола, и оба маятника закачались в фазе. Больше столкновений между ними не происходило. Чтобы убрать эту синфазность, язык удлиннили, при этом он стал массивнее и, ударя по колоколу, начал двигаться медленнее и уже не в фазе с самим колоколом. И теперь, когда колокол на соборе качается, раздается колокольный звон.

### 1.121 • ЭФФЕКТ СПАГЕТТИ

Почему соус, в который вы окунули спагетти, разбрызгивается во все стороны, когда вы вытягиваете длинную макаронину в рот? Это вызывает всеобщее веселье (а когда и неловкость) за столом, но оказывается, что *эффектом спагетти* интересуются и инженеры, проектирующие оборудование для производства бумаги. Этот эффект проявляется как при вытягивании листов бумаги, так и при извлечении этих листов (так называемый *обратный эффект спагетти*).

**ОТВЕТ •** Вот вам одно объяснение эффекта. Предположим, макаронина уже покинула тарелку и движется ко рту. В этот момент ее скорость может иметь и боковую составляющую. Если вы ее вытягиваете в себя с постоянной скоростью, длина свободной части уменьшается, а соответственно, кинетическая энергия, связанная с боковой скоростью, сосредотачивается теперь в этом отрезке малой массы. Так как количество

кинетической энергии не меняется, скорость бокового движения должна увеличиться. Когда свободный конец макаронины приближается к губам, скорость его становится настолько большой, что соус разбрызгивается во все стороны.

Другое объяснение основывается на понятии углового момента. Если свободный конец макаронины вращается вокруг точки ее касания губами, скорость вращения должна увеличиваться по мере втягивания ее в рот. Это напоминает фигуриста, который раскручивается с расставленными руками, а потом прижимает их к телу, чтобы крутиться быстрее.

Эффект спагетти проявляется и при нажатии на кнопку металлической рулетки, когда лента с делениями автоматически втягивается в корпус. Конец ленты при приближении к корпусу увеличивает амплитуду колебаний и может вас поранить. По инструкции рекомендуется последнюю часть ленты втягивать медленно. Аналогичный эффект может проявиться при втягивании шнура в бытовую технику, снабженную механизмом автоматического сматывания.

### 1.122 • ПАУК И МУХА

Как паук, сидящий в центре своей ловчей сети, узнает, в каком месте муха запуталась в паутине или прилипла к ней? Почему, когда муха налетает на паутину, та не рвется? Почему муха не может просто улететь после того, как ударится о паутину?

**ОТВЕТ •** Попад в паутину, муха начинает барахтаться, пытаясь высвободиться. При этом от нее по нитям, в том числе и по тем радиальным, которые тянутся к пауку, идут волны. Распространяющиеся по радиальным нитям волны можно разделить на три типа — по направлениям возбуждаемых в них колебаний. В двух типах перемещение нитей происходит в плоскости паутины и перпендикулярно к ней. В третьем типе перемещение участков нити происходит вдоль нее (нить натягивается и ослабляется), именно этот вид колебаний истораживает паука. Колебания могут возбуждаться в двух или трех соседних нитях, и именно нити, ведущие к мухе, колеблются сильнее всего. Даже если попавшая в сети жертва не очень долго борется за свободу, паук может отследить положение и уже успокоившейся мухи, потеряв свои лапки радиальные нити. Любая нить под тяжестью жертвы будет колебаться иначе, чем свободная, и это поможет пауку определить направление и даже, возможно,

расстояние до жертвы. Эксперименты показывают, что человек тоже вслепую — только по колебаниям веревки — может определить расстояние до груза, висящего на натянутой веревке.

Некоторые пауки плетут свою паутину так, что та позволяет регулировать натяжение нитей. Когда пауки голодны, они увеличивают натяжение нитей, чтобы трепыхание даже самой маленькой мошки возбуждало заметные волны в нитях. Если они не очень голодны, то уменьшают натяжение, чтобы заметные колебания в нитях возбуждала только крупная добыча.

В 1880 году Чарльз Вернон Бойз\* (автор замечательной популярной книги о мыльных пленках) описал, как он смог привлечь внимание садового паука, прикасаясь вибрирующим камертоном к краю паутины или к опоре, на которой она держалась. Если паук сидел в центре паутины, ему не составляло большого труда найти камертон. Однако если он прогуливался вдали от центра, ему приходилось сначала бежать в центр, и уже там он определял местонахождение камертона. Когда Бойз переносил камертон ближе к пауку, тот воспринимал сильные колебания камертона как сигнал опасности и быстро падал, уцепившись за страховочную нить.

В тропиках живет интересный вид пауков-клептопаразитов: его представители не плетут свою собственную сеть, а воруют добычу у других пауков, которые ткнут свою паутину очень прилежно. Чтобы мониторить состояние чужой паутины, такой паук-пират протягивает нити длиной 20–30 см от места, где он сидит в засаде, к центру чужой паутины и к ее радиальным нитям. Как только в паутину попадет муха, через мониторинговые нити пойдут волны. По их картине паук-клептопаразит может даже понять, как собирается распорядиться своей добычей паук-хозяин. Если он собирается муху завернуть и съесть позже, клептопаразит вскоре незаметно подкрадется к паутине и стащит завернутую еду.

Для паука паутинa служит фильтром, позволяющим ловить только мошек размером с паука или немного меньше. Паутинa поглощает их кинетическую энергию и импульс. Конструкция паутины такова, что если жертва больше паука, нити рвутся, и это хорошо, иначе уже сам паук может оказаться жертвой.

Когда мошка ударяется о паутину, нити растягиваются, большая часть энергии от соударения остается

\* Чарльз Вернон Бойз (1855–1944) — английский физик-экспериментатор. *Прим. ред.*



в паутине. Поэтому мошка не может просто отскочить от растянутой сети. Вдобавок вдоль некоторых нитей (нитей-ловушек) размещаются клейкие капельки, помогающие поймать добычу. Они расположены на расстоянии друг от друга, чтобы сам паук мог пройти по нити, не прилипнув к ним. Жертва, прилипшая к капельке, может потрепыхаться, но поскольку нить легко растягивается, у нее нет опоры, от которой можно было бы оттолкнуться, чтобы освободиться от клейкой капли.

### 1.123 • КОЛЕБАНИЯ ПЕШЕХОДНОГО МОСТА И ПОЛА ТАНЦЗАЛА

В 1831 году в Англии недалеко от Манчестера войска переходили подвесной мост. Видимо, они маршировали в ногу и в фазе с колебаниями моста. Амплитуда колебаний последнего увеличилась, один из болтов, удерживающих мост, сломался, мост рухнул, и большинство солдат упали в воду. С тех самых пор войскам приказано переходить по любому легкому мосту не в ногу. Почему, если маршировать в ногу, можно разрушить мост?

В 2001 году в Лондоне в ознаменование прихода нового тысячелетия был открыт легкий подвесной мост через Темзу, соединяющий галерею современного искусства Тейт-Модерн и набережную у собора Святого Павла. Однако, когда по мосту пошли первые пешеходы, мост «Миллениум», или мост Тысячелетия, как его стали называть, начал так сильно раскачиваться, что некоторые из гуляющих смогли удержаться на ногах, только схватившись за перила. Чем были вызваны эти колебания?

Почему возникают похожие колебания на полу в танцевальном зале или в зале на рок-концерте?

**ОТВЕТ** • Опасность заключается в том, что, если солдаты маршируют в ногу и частота их шагов совпадает с частотой собственных колебаний моста, эти колебания могут раскачать мост до такой степени, что он разрушится. (Я не утверждаю, что именно это произошло в Манчестере.) А если солдаты шагают вразнобой, частота их шагов уже не синхронизована с частотой колебаний моста, и амплитуда последних не может вырасти.

Когда пешеходы пошли по мосту «Миллениум», каждый из них воздействовал на мост не только силой своего веса, направленной вниз, но и силой, направленной вправо и влево, так как человек при ходьбе слегка покачивается из стороны в сторону. Эти силы малы, но их частота может совпасть с частотой колебаний

моста вправо-влево (примерно 0,5 Гц, то есть одно колебание в две секунды). Про такое совпадение частот говорят, что частоты попали в *резонанс*, а амплитуда колебаний в условиях резонанса стремится возрасти. Это похоже на то, как ребенок на качелях будет раскачиваться все выше и выше, если его толкать в такт с частотой качелей.

Вначале пешеходы на мосту шли вразнобой, моменты их давления на мост были не синхронизованы, и мост лишь слегка покачивался. Но вскоре колебания увеличились настолько, что некоторые пешеходы смогли сохранять равновесие, только подстраиваясь под колебания моста. По мере того, как все больше пешеходов двигалось в такт с мостом, он раскачивался все сильнее, все труднее становилось идти по нему, все больше людей старалось попасть в такт с его колебаниями. В конце концов около 40% пешеходов пошли в ногу, колебания вправо-влево стали значительными и даже возникли колебания моста вверх-вниз. Чтобы избавиться от этого эффекта, инженеры установили устройство, позволяющее поглощать энергию колебаний моста и тем самым уменьшать их амплитуду, и пешеходы перестали по нему ходить в ногу.

Похожие колебания могут возбудиться в полу офиса, школы и танцзала, но главным образом — от вертикальных ударов. Это особенно заметно, когда танцующие прыгают в унисон. Колебания могут возникнуть даже в полу концертного зала, если слушатели отбивают ритм ногами. Эти удары обычно имеют частоту 1–3 Гц. Если эта частота приблизится к нижней собственной частоте пола танцевального или концертного зала, они войдут в резонанс, и тогда амплитуда колебаний сидящих в креслах слушателей и ускорение, возникающее при их перемещении, станут не только заметными, но и пугающими. Чтобы не допустить резонанса, который может привести к поломкам или даже разрушениям помещений, строительные регламенты обычно устанавливают нижнюю резонансную частоту помещений не менее 5 Гц.

### 1.124 • БАЛАНСИРУЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ И КАМНИ

Иногда при толчках во время землетрясений стабильные на первый взгляд конструкции падали, в то время как казавшиеся неустойчивыми структуры, поддерживаемые колоннами, продолжали стоять. Даже такие постройки, как водонапорные резервуары, имеющие форму шара, балансирующего на палочке, переживали

толчки, а цилиндрические цистерны разрушались. Как объяснить устойчивость на первый взгляд неустойчивых структур? Этот вопрос крайне важен при проектировании современных сооружений в сейсмически активных районах. Он очень важен и для сохранения там памятников древности, например статуй и колонн.

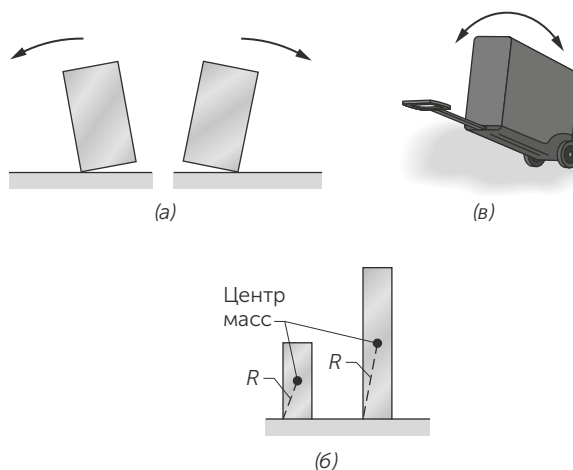
В скалистой местности, где под действием погодных условий обнажились глубинные горные породы, по ним можно определить, случались ли в этой местности землетрясения. Например, в некоторых районах Калифорнии даже поблизости от известного разлома Сан-Андреас (в радиусе 30 км от него) по скальным породам незаметно, чтобы там происходили сколь угодно заметные землетрясения по крайней мере в течение последних нескольких тысяч лет. Какие простые признаки отсутствия сейсмической активности можно разглядеть на камнях?

**ОТВЕТ** • Землетрясение (единичный толчок, серия толчков или продолжительные колебания) может вызвать раскачивание незакрепленных сооружений на их опорах (рис. 1.43а). Если проекция центра масс сооружения выйдет за край опоры, оно опрокинется. Если мы можем реально наклонить объект, то конструкция тем неустойчивее, чем она выше (представьте, что вы хотите свалить стоящую на меньшей грани костяшку domino, щелкнув по верхней ее части). Однако эффекты, вызванные подземными толчками, носят совершенно иной характер, поскольку толчок приходится на нижнюю часть конструкции. В этом случае устойчивость конструкции зависит от расстояния  $R$  от центра масс до ребра основания (рис. 1.43б) — в большинстве случаев чем больше  $R$ , тем больше устойчивость, поскольку увеличивается момент инерции. Хотя воздействие землетрясения зависит от огромного числа факторов, когда две колонны раскачиваются под действием подземных толчков, высокая колонна с большим  $R$  может оказаться более устойчивой, чем низкая с маленьким  $R$ .

Вы можете наблюдать похожее раскачивание, когда везете чемодан на двух колесиках (рис. 1.44в). Если вы идете медленно и тянете чемодан за ручку плавно, он не падает (стоит вертикально). Если же вы бежите с чемоданом и периодически дергаете его за ручку, он сильно раскачивается влево-вправо и может опрокинуться, даже если вы постараетесь остановить падение, вывернув ручку в противоположном направлении.

В некоторых местностях воздействие погоды на скалы привело к тому, что отдельные камни оказались

стоящими на узком основании. Такие *висячие камни* (их так и называют) обычно можно опрокинуть рукой, и они свалятся при толчках во время землетрясения. Таким образом, то, что эти камни не упали в течение нескольких тысячелетий, означает, что за это время существенной сейсмической активности в этом месте не было.



**Рис. 1.43 / Задача 1.124.** а) Блочная конструкция, раскачиваемая подземными толчками. б) Вероятность опрокинуться зависит от расстояния  $R$ . в) Чемодан на двух колесиках может раскачаться, а потом и опрокинуться.

### 1.125 • КАК ЗАТОНУЛА ЯДЕРНАЯ ПОДВОДНАЯ ЛОДКА «КУРСК»

В августе 2000 года во время проведения учений российского Северного флота в Баренцевом море затонула ядерная подводная лодка «Курск». В тот день приборы сейсмологических станций Северного полушария зарегистрировали необычные сейсмические волны, исходившие из района Баренцева моря. Проанализировав данные, сейсмологи установили причину, по которой подлодка затонула, и глубину, на которой в тот момент она находилась. Как можно с помощью измерений, проводимых далеко от места событий, определить глубину, на которой произошел взрыв?

**ОТВЕТ** • Сейсмические волны распространяются либо через горные породы, либо вдоль поверхности земли. Сейсмические станции устанавливаются в основном для того, чтобы регистрировать сейсмические волны, возникающие во время землетрясений, но не только. Они записывают еще и сейсмические волны, испускаемые при любом событии, когда много энергии

высвобождается где-то вблизи поверхности земли, например при взрывах. Когда сейсмическая волна проходит через станцию, она заставляет колебаться перо самописца, и оно рисует кривую. Кривая, записавшая трагические события с «Курском», показывала серию колебаний малой амплитуды и начавшиеся через 134 с колебания с намного большей амплитудой.

По виду кривой специалисты заключили, что первые колебания, возможно, были вызваны взрывом на борту. Этот взрыв, вероятно, разрушил корпус, подлодка затонула, на ней начался пожар. Позже, уже после того, как подлодка легла на грунт, на борту одновременно взорвались несколько (возможно, пять) мощных ракет, от чего пошли гораздо более мощные сейсмические волны. Они достигли сейсмических станций в виде импульсов, разделенных временными интервалами примерно в 0,11 с.

Зная эти временные интервалы, сейсмологи смогли определить глубину, на которой затонула подлодка. Более сильные взрывы произошли, когда лодка уже лежала на дне моря. От них волны распространились внутрь земли и вверх через толщу воды. Последние отразились несколько раз от поверхности воды и от морского дна. Каждый раз, когда отраженный импульс достигал дна, он порождал еще один импульс, направленный вглубь земли, и сейсмологи регистрировали эти импульсы один за другим. Поэтому интервал 0,11 с между двумя последовательными импульсами — это время пробега импульса туда-обратно, то есть вверх до поверхности воды и обратно до дна. Используя это значение времени распространения импульса, специалисты подсчитали, что подлодка затонула на глубине примерно 80 м. Позже выяснилось, что в действительности она затонула на глубине 115 м, то есть расчет оказался достаточно точным.

Сейсмологи зарегистрировали и много других мощных взрывов, таких как взрыв в 1998 году грузовика, начиненного взрывчаткой, во время террористической атаки на консульство США в столице Кении — Найроби. В 1989 году они зарегистрировали сейсмические волны, возбужденные ударными акустическими волнами, образовавшимися, когда космический челнок «Колумбия», возвращаясь на базу военно-воздушных сил «Эдвардс», пролетал над Лос-Анджелесом. А также колебания почвы, возникшие 11 сентября 2001 года, когда угнанные террористами самолеты врезались в башни-близнецы Всемирного торгового центра и позже, когда башни рухнули.

## 1.126 • КАК ПЕСЧАНЫЙ СКОРПИОН ОБНАРУЖИВАЕТ ЖЕРТВУ

Когда жук пробегает по песку в нескольких десятках сантиметров от песчаного скорпиона, тот мгновенно разворачивается в сторону жука (которым намеревается закусить) и набрасывается на него. Скорпион может сделать это и не видя жука (он ночной охотник), и не слыша его. Как песчаный скорпион может точно определить местонахождение своей жертвы?

**ОТВЕТ** • Песчаный скорпион определяет направление и расстояние до жертвы по волнам, которые создает жук, двигаясь по поверхности песка. При одном типе волн — поперечных волнах (их еще называют волнами Рэлея) — песок на поверхности движется в вертикальном направлении, то есть перпендикулярно направлению движения волн. В продольных волнах песок движется вдоль направления распространения волн. Продольные волны распространяются в три раза быстрее поперечных. Скорпион, у которого целых восемь ног, расставленных на песке по окружности диаметром около 5 см, сначала воспринимает быстрые продольные волны и определяет направление на жертву. Это то направление, на которое указывает нога скорпиона, первой почувствовавшая приход волн (рис. 1.44). Затем скорпион фиксирует временной интервал между приходом продольной волны и приходом медленной поперечной волны и использует этот интервал для определения расстояния до жука. Например, интервал в 0,004 с между приходом двух типов волн означает, что волны от жука приходят с расстояния 30 см. Таким образом скорпион мгновенно определяет и направление на жертву, и расстояние до нее.

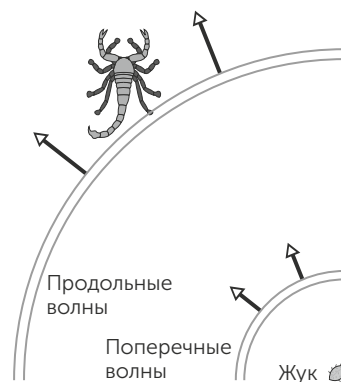


Рис. 1.44 / Задача 1.126. Волны оповещают скорпиона о движении жука.

### 1.127 • СНЕЖНЫЕ ВОЛНЫ

Почему в редких случаях, когда человек ступает по снежной целине, может начаться *снеготрясение*, распространяющееся от следов в стороны, и при этом раздается низкочастотный звук, похожий на хлопок?

**ОТВЕТ** • Снеготрясение — это, скорее всего, постепенное обрушение корочки снега, возникающее из-за разрушения структурно непрочного слоя рыхлого снега, скрытого под корочкой. Когда человек наступает на снег, этот рыхлый слой снега разрушается под тяжестью ноги, а потом он тянет и сотрясает соседние области, которые тоже разрушаются. Когда рыхлый снег обрушивается, раздается хлопок, напоминающий звук от падения снега с веток дерева на снежный наст.

### 1.128 • ВОЛНА НА ФУТБОЛЬНОМ СТАДИОНЕ

Волна на футбольном стадионе — это импульс, который создают болельщики и который распространяется по большому переполненному стадиону во время спортивных матчей. Этот эффект стал известен всему миру после чемпионата мира по футболу 1986 года в Мехико, и поэтому его называют *мексиканской волной*, или *ла-ола*. Группы болельщиков поочередно встают, поднимают руки, а потом садятся на место, и это напоминает волну, которая расходится по всем трибунам. Как волна начинается (ведь никакого сигнала ни от кого не поступает) и как быстро она распространяется?

**ОТВЕТ** • Волна не сможет начаться, если один или небольшая группа болельщиков встанет и опять сядет, поскольку это движение потонет в общем беспорядочном движении. Для того чтобы волна пошла, нужно, чтобы заметное число болельщиков вставали и садились одновременно. Волна возникнет, только если организаторы скоординируют действия первой группы, скажем, из 10–30 болельщиков. Они могут повернуться лицом к такой группе и, например, развернуть флаг, чтобы привлечь внимание. Согласованные действия этой группы заметит соседняя группа, болельщики, составляющие ее, одновременно встанут, а потом сядут, и так дальше по секторам. Исследования показали, что волна обычно распространяется по трибунам стадиона по часовой стрелке (если смотреть сверху), но почему это так, я объяснить не могу. Скорость распространения волны примерно 12 м/с, и эта скорость согласуется со временем, необходимым людям, чтобы встать, заметить, что встала группа болельщиков рядом.

### 1.129 • БРОНЕЖИЛЕТ

Как тканевый бронежилет задерживает мелкие поражающие элементы — ружейные пули, осколки снарядов или гранат? Почему он не спасает от ножа?

**ОТВЕТ** • Когда снаряд на большой скорости ударяется в бронежилет, материал жилета останавливает снаряд и препятствует его дальнейшему движению, быстро распределяя энергию снаряда по большой площади. Эту энергию уносят продольный и поперечный импульсы, быстро распространяющиеся от точки удара, где снаряд в материале жилета образует вмятину конической формы. Продольный импульс, распространяющийся вдоль волокна материала впереди вмятины, вызывает утончение и растяжение волокон, и материал «втягивается» во вмятину. Одно такое радиальное волокно показано на рис. 1.45. Часть энергии снаряда уходит на это движение и растяжение волокон. Поперечный импульс, движущийся медленнее, возникает из-за проминания ткани. По мере того как снаряд вминается в ткань все глубже, радиус вмятины возрастает, вынуждая материал волокна двигаться в том же направлении, что и снаряд (перпендикулярном направлению распространения поперечного импульса). Часть энергии снаряда расходуется на это движение. Некоторое количество энергии рассеивается из-за трения волокон в тех местах, где они касаются друг друга, или, если бронежилет состоит из многих слоев ткани, из-за растягивания и обрыва волокон.

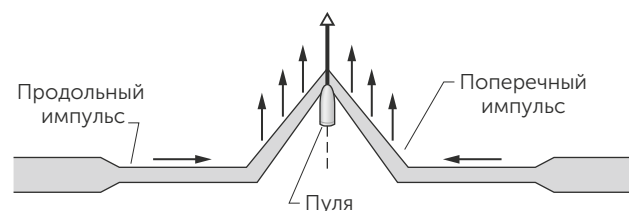


Рис. 1.45 / Задача 1.129. Вмятина в бронежилете, образованная снарядом.

Тканевый бронежилет не спасает от острого ножа, поскольку кончик ножа легко проникает между волокнами, а лезвие может перерезать волокна и освободить ножу дальнейшее прохождение. Можно было бы предположить, что кольчуга — гибкая броня — защитила бы от ножа лучше тканевого бронежилета. Но на самом деле это не так: кольчуга была сконструирована так, чтобы предохранять от широких косых ударов меча, а не от точечного удара узкого ножа или стилета.



### 1.130 • ПАРАДОКС ЛУЧНИКА

Как бы хорошо ни прицелился лучник, когда он спускает тетиву и стрела пролетает, не касаясь рукояти лука, то в полете она может отклониться от линии прицела на угол до  $7^\circ$ . Парадокс лучника заключается в том, что стрела все же попадет в цель. Отклонение стрелы выглядит еще более странным, если посмотреть замедленную съемку выстрела. При наведении на цель стрела опирается на рукоять, но после того, как тетиву отпустили, стрела и лук больше не соприкоснутся. Чем объяснить такое поведение и как стрела все-таки попадает в цель?

Когда длинный лук использовался в боях, к кончику стрелы прикрепляли шарик с пчелиным воском. Зачем?

**ОТВЕТ •** Когда спускают тетиву, стрела получает от нее и лука боковой импульс. Из-за возникающих колебаний стрела огибает лук, не касаясь его. Чтобы стрела могла пролететь, не задев рукоять оперенным концом, она должна совершить одно полное колебание вправо-влево за то время, что она вылетает из лука. Это требование накладывает ограничения на гибкость стрелы. Если она слишком гибкая, колебания будут слишком медленные и оперенный конец стукнется о рукоять. Если она слишком жесткая, колебания будут слишком быстрые либо боковое движение окажется недостаточным и оторвавшаяся от тетивы стрела будет иметь меньшую энергию, поскольку израсходует часть энергии на трение или соударение оперенного конца с рукоятью. И в том и в другом случае точность стрельбы ухудшается.

На кончик стрелы насаживали шарик пчелиного воска, чтобы стрела легче пронзала доспехи вражеских солдат. Считалось, что при соударении шарика с кольчугой было меньше шансов, что стрела соскользнет с нее, и больше — что проникнет сквозь отверстия в кольчуге.

### 1.131 • КОЛЕБЛЮЩИЕСЯ РАСТЕНИЯ

Порыв ураганного ветра может сломать дерево или вырвать его с корнем. А если ветер существенно слабее, может ли произойти что-то подобное?

**ОТВЕТ •** Каждое дерево будет раскачиваться с частотой (называемой *собственной частотой*), при которой основание неподвижно, верхушка раскачивается с максимальной амплитудой, а промежуточные точки колеблются с амплитудой промежуточной. Значение

собственной частоты зависит от высоты дерева, его породы (способности сгибаться) и от сопротивления движению веток и листьев со стороны воздуха. Единичный порыв ветра может заставить дерево раскачиваться, но эти колебания быстро затухнут. Маловероятно, что от этого дерево сломается или его вырвет с корнем. Это может произойти, если несколько порывов ветра будут раскачивать дерево с частотой, близкой к собственной частоте дерева, то есть наступят условия так называемого *резонанса*. Это напоминает раскачивание детских качелей, когда вы не очень сильно подталкиваете их с собственной частотой качелей и размах качаний постепенно увеличивается. Так и порывы ветра тоже способны раскачать деревья.

Безусловно, порывы ветра не налетают с постоянной частотой, но, если их средняя частота близка к резонансной частоте дерева, оно может раскачаться до такой степени, что сломается или его вырвет с корнем. Однако если дерево стоит в окружении других деревьев, то они не только защищают его от порывов ветра. Их ветки трутся о ветки нашего дерева, и энергия колебаний постепенно гасится. И наконец, любое дерево — и отдельно стоящее, и окруженное другими деревьями — будет терять энергию за счет торможения листвы о воздух и деформации древесины при качании.

Травянистые растения тоже входят в резонанс с порывами ветра, если те повторяются на их собственной частоте, и тоже могут раскачаться так сильно, что их стебли сломаются или их вырвет с корнем. У травянистых это происходит на частоте 1–2 Гц — чуть выше, чем у деревьев.

### 1.132 • КОЛЕБАНИЯ ВЫСОКИХ ЗДАНИЙ

Высокие здания под действием ветра могут колебаться, что раздражает и даже пугает находящихся внутри людей. Строить более жесткие здания, чтобы уменьшить раскачку, нецелесообразно и неэкономично. Как еще можно снизить амплитуду колебаний до приемлемого уровня?

**ОТВЕТ •** Один из способов минимизировать колебания — смонтировать на крыше пружинный механизм, причем уложить пружины нужно по господствующему направлению ветра. Один конец пружины прикрепляется к крыше, а другой — к грузу, который двигается параллельно пружине. Резонансную частоту груза, с которой он будет колебаться на конце пружины, подстраивают под собственную частоту колебаний здания.

И когда здание начинает раскачиваться, пружина растягивается и вынуждает груз колебаться на той же частоте. Однако колебания груза отстают от колебаний здания, в результате объекты колеблются в противофазе: когда здание качается влево, груз движется вправо, а сила, действующая со стороны пружины на здание, оказывается направленной навстречу колебаниям здания, амплитуда которых уменьшается.

Некоторые здания снабжаются двойным пружинным механизмом: меньший механизм прикрепляется к грузу большего механизма. Частота колебаний меньшего механизма с помощью электронной схемы, следящей за частотой колебаний здания, точно настраивается на эту частоту. На некоторых зданиях устанавливаются демпферы с колеблющейся жидкостью, в которых вода плещется в противофазе с колебаниями здания. А в башне Тайбэй-101 (Тайвань) высотой в 101 этаж (508 м) на уровне 92-го этажа установили шар-маятник весом 680 000 кг.

### 1.133 • ПРЫЖКИ В ВОДУ С ПРУЖИНЯЩЕГО ТРАМПЛИНА

Опытный спортсмен знает, как нужно разбежаться при выполнении прыжка с трамплина, который представляет собой пружинящую доску, закрепленную одним концом. Сначала нужно быстро сделать три шага по доске, чтобы она начала колебаться, а потом прыгнуть на самый конец трамплина так, чтобы он подбросил спортсмена высоко в воздух. А новичок, подражая опытному спортсмену, может сделать вроде все то же самое, но доска почему-то его не подбросит. Более того, его может даже скинуть с доски. В чем заключается «секрет» высокого прыжка опытных спортсменов?

**ОТВЕТ •** На расстоянии примерно одной трети от закрепленного конца трамплина находится его центр вращения. При разбеге спортсмен делает три быстрых шага по доске и заступает за центр вращения так, чтобы свободный конец доски прогнулся вниз. Когда доска качнется вверх и пройдет горизонтальное положение, спортсмена подкинет вверх и в сторону свободного конца доски. Опытный спортсмен вымеряет шаги так, чтобы оказаться на свободном конце доски в тот момент, когда она совершит 2,5 колебания, то есть когда она движется вниз с максимальной скоростью. Опустившийся на нее в эту секунду спортсмен еще больше прогибает вниз ее свободный конец, и при возвратном движении она катапультирует его высоко в воздух.

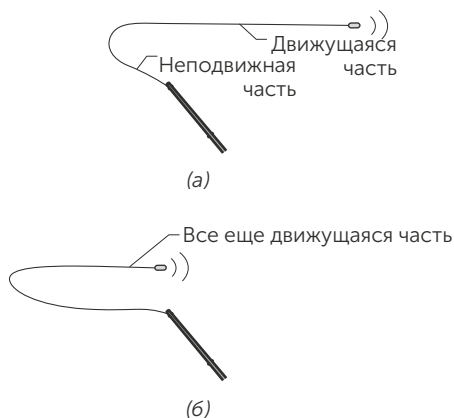
### 1.134 • МЕТАНИЕ БЛЕСНЫ

Если попытаться забросить блесну рукой как можно дальше, она далеко не улетит — ей мешает сопротивление воздуха. Как же тогда забросить ее спиннингом на большое расстояние? Ведь леска тоже тормозится воздухом, и тем не менее блесна в этом случае летит гораздо быстрее и дальше.

**ОТВЕТ •** Для того чтобы забросить блесну, нужно поднять удилище вверх и назад, завести блесну с леской назад, а потом резко махнуть удилищем вперед. Усилие рыболова при этом фактически прикладывается к концу удилища. Если бы вы с той же силой закидывали блесну руками, вы бы проделали небольшую работу и, соответственно, передали бы блесне малую кинетическую энергию — ведь расстояние, которое прошла при замахе рука, мало. Конец же удочки проходит большое расстояние, соответственно, больше и проделанная рыболовом работа, и кинетическая энергия, передаваемая блесне и леске.

Когда вы переместили конец удилища вперед и оно уже неподвижно (рис. 1.46а), то есть вы перестали совершать работу, кинетическая энергия и скорость блесны, тем не менее, возрастают. Чтобы убедиться в этом, посмотрите на положение лески в этот момент (рис. 1.46б): она идет от конца удилища вперед, изгибается и идет назад, к блесне. Первый ее отрезок неподвижен, поскольку неподвижен конец удилища, а последний вместе с блесной движется горизонтально вперед. По мере того как блесна движется вперед, все большая часть лески переходит в состояние покоя, поэтому все больше энергии сосредотачивается в блесне и той части лески, которая еще движется. Когда блесна долетит до самой дальней точки, в ней будет сосредоточена вся кинетическая энергия и она будет двигаться быстро — намного быстрее, чем если бы ее бросали рукой. Если вы слегка придержите в этот момент леску, блесна может вырваться из рук и улететь дальше, чем вы рассчитывали.

Сопротивление воздуха ограничивает дальность полета лески. По этой причине рыболовы стараются делать петлю на леске поуже, чтобы она меньше тормозилась воздухом. А еще они пытаются сделать ее асимметричной, как показано на рисунке. Сопротивление воздуха, действующее на опускающуюся часть такой петли, создает силу, приложенную к леске и направленную вверх, и она позволяет блесне улететь дальше. Эта техника используется рыболовами в соревнованиях по забрасыванию блесны.



**Рис. 1.46 / Задача 1.134.** Забрасывание лески вперед.  
а) Большая часть лески находится в движении.  
б) Маленькая часть лески движется.

Некоторые рыболовы считают, что для придания блесне наибольшей энергии нужно как можно сильнее согнуть удилище при забрасывании лески назад. Однако более глубокое изучение этого вопроса показывает, что толку от этого немного. Чему гибкость удилища действительно способствует, так это точности броска. Также она важна при вытаскивании рыбы из воды. Жесткость удилища измеряется нагрузкой, подвешенной на конец удилища и сгибающей его на определенную величину. При ловле крупной рыбы рыболовы стараются выбирать более жесткое и прочное удилище, которое не сломается. Собственная частота колебаний удилища измеряется так: рукоять удилища зажимают в руке, а его конец слегка отгибают и отпускают. В результате возникают колебания, частота которых и будет собственной частотой удилища. Про «высокочастотные» удилища говорят, что они «живые», и их чаще используют, когда нужно забросить блесну подальше. А «низкочастотные» позволяют лучше контролировать движение лески, и их используют, когда нужно забросить блесну точнее.

### 1.135 • БИТВА ЗА ФОЛКЛЕНДСКИЕ ОСТРОВА И БОЛЬШАЯ БЕРТА

Во время Первой мировой войны у Фолклендских островов, в районе 50-го градуса южной широты, между британскими и немецкими кораблями произошло сражение. Загадочным образом при стрельбе из пушек снаряды англичан падали примерно в ста метрах левее цели, хотя артиллеристы тщательно наводили орудия. Что было тому виной — сбитые прицелы? Маловероятно, поскольку прицелы калибровали еще в Англии. Тогда что же пошло не так?

Для обстрела Парижа в той же войне немцы привезли огромную пушку, названную ими Большой Бертой. Она стреляла по городу с расстояния 110 км. Если бы немцы не учли физические законы, их снаряды отклонялись бы от цели почти на 2 км.

Когда немцы приступили к испытаниям дальнбойной артиллерии, они с удивлением обнаружили, что, если выпускать снаряд под большим углом (больше  $45^\circ$ ), он полетит значительно дальше, может быть, даже вдвое дальше снаряда, выпущенного под углом  $45^\circ$ . Известно, что в большинстве случаев максимальная дальность выстрела достигается как раз при стрельбе под углом около  $45^\circ$ . Тогда почему на испытаниях дальнбойных пушек снаряды летели дальше при существенно больших углах?

**ОТВЕТ •** Обычно для объяснения отклонения снарядов, выпущенных из дальнбойных орудий, используется понятие *кориолисовой силы*, которая возникает из-за вращения Земли и действует на летящий снаряд. В Северном полушарии снаряды отклоняются вправо, а в Южном — влево. На экваторе это отклонение нулевое — оно увеличивается с широтой.

Когда летит дальнбойный снаряд, его скорость определяется не только энергией, полученной при запуске. Эта скорость также имеет составляющую, задаваемую вращением Земли в точке стрельбы. Во время полета снаряда из-за вращения Земли цель продолжает двигаться по круговой траектории вокруг земной оси. Если это движение цели не принять во внимание, снаряд пролетит мимо. Давайте предположим, что выстрел производится в Северном полушарии и цель находится севернее места стрельбы. И пушка, и цель двигаются на восток вокруг земной оси, но цель находится на большей широте и, следовательно, описывает меньшую окружность, чем пушка. Поскольку и цель, и пушка должны за сутки описать полную окружность, цель будет двигаться медленнее, чем пушка. Когда снаряд летит на север, он имеет ту же составляющую скорости, направленную на восток, что и пушка. Во время полета его скорость оказывается больше, чем у цели, так что он падает восточнее цели. С точки зрения стреляющего снаряд отклонится на восток, то есть вправо от цели.

Артиллеристы определяли это отклонение методом проб и ошибок и делали поправку на него (данные заносили в таблицы). Но поправки для орудийных прицелов зависят от широты и противоположно направлены в разных полушариях. Прицелы для британских орудий

были настроены на широту Англии (как известно, расположенной в Северном полушарии) и приводили к большой ошибке при стрельбе в Южном полушарии, где расположены Фолклендские острова.

Когда немцы стреляли на большое расстояние из Большой Берты, они знали, что за время полета снаряда Париж сдвинется, и делали поправку на кориолисову силу. Когда немцы запускали дальнобойные снаряды под углом больше  $45^\circ$ , те пролетали через верхние слои атмосферы, в которых воздух разреженнее. Соответственно, воздух меньше тормозил их, поэтому снаряды летели существенно дальше.

### 1.136 • ДЖЕК И БОБОВЫЙ СТЕБЕЛЬ\*, ДОТЯНУВШИЙСЯ ДО КОСМОСА

Можно ли придумать какой-либо способ запустить в космос спутник, свесить с него трос и поднимать на этом тросе грузы прямо с земли? Есть ли возможность потом убрать спутник, но так, чтобы трос остался на месте? (То есть получить «бобовый стебель», но без великана-людоеда.)

**ОТВЕТ** • Если запустить спутник на экваториальную орбиту на нужной высоте, так чтобы он вращался вокруг Земли с той же угловой скоростью, что и Земля вокруг своей оси (геостационарная орбита), тогда, в принципе, с него можно было бы сбросить трос на землю и смонтировать на нем лифтовую систему. Если же спутник находится выше, действующая на него центробежная сила будет тянуть трос, и он сам сможет превратиться в космический лифт, на котором можно будет поднимать грузы, так что соорудать специальный лифт не потребуется. Прочный и легкий трос действительно мог бы остаться стоять, как сказочный бобовый стебель, если бы центробежная сила компенсировала его вес. Однако расчеты показывают, что трос для этого должен иметь длину 143 000 000 м, а это, согласитесь, многовато!

Если спутник находится на такой орбите, что нижний конец троса скользит по земле и если трос эластичный, то груз, в принципе, можно поднять без всяких приспособлений и получить фактически бесплатное средство передвижения. Для этого к нижнему концу троса нужно прикрепить пассажирскую кабину. Трос натянется вслед за движущимся спутником, кабинка

\* «Джек и бобовый стебель» — английская народная сказка о смелом пареньке Джеке, победившем великана-людоеда. *Прим. пер.*

подпрыгнет высоко в атмосферу, а потом опустится на землю, преодолев значительное расстояние. Хотя во время подъема кабину тянет спутник и его энергия при этом уменьшается, большая часть этой энергии вернется при спуске кабины, когда уже она будет ускорять спутник. Чтобы скомпенсировать неизбежные потери энергии, спутник можно снабдить небольшим ракетным двигателем.

### 1.137 • ВЕСЕННЯЯ ЛИХОРАДКА И ЯЙЦА, СТОЯЩИЕ ВЕРТИКАЛЬНО

Попробуйте поставить сырое яйцо вертикально. Скорее всего, оно тут же опрокинется. Хотя некоторые считают, что в день весеннего равноденствия яйцо не упадет. Так ли это?

**ОТВЕТ** • Чтобы понять, что такое весеннее равноденствие, мысленно проведем плоскость через экватор Земли. Если бы ось вращения Земли вокруг самой себя была перпендикулярна направлению на Солнце, то оно всегда лежало бы в этой плоскости, а так оно оказывается в этой плоскости лишь два раза в год — в дни весеннего и осеннего равноденствия. Есть поверье, что в эти дни сила тяжести со стороны Солнца действует на земные объекты, в частности на яйца, как-то по-особенному. На самом деле все это выдумки чистой воды.

Почему же этот миф оказался настолько живучим? Одна из причин, возможно, кроется в том, что на свете сыщется не так много людей, которые проводят эксперименты с яйцом именно в день весеннего равноденствия (эти бедняги, видимо, с ума сходят от скуки). И если им удастся хоть немного преуспеть в своем занятии, они заявляют, что в этот день с гравитацией что-то происходит.

Если вы все же найдете яйцо, которое можно будет поставить, на его конце, скорее всего, окажется плоский участок небольшой площади. А хотите узнать верный способ поставить яйцо вертикально? Насыпьте на стол небольшую горку соли, слегка надавите на нее тупым концом яйца, установите его вертикально, а затем аккуратно сдуйте соль со стола. Между столом и яйцом останутся несколько кристалликов соли, они послужат яйцу опорой, и яйцо сохранит вертикальное положение. Если кто-то, кто не знает ничего про соль, увидит это стоящее яйцо, он может и не заметить кристаллики. Тогда объясните ему, что яйцо стоит из-за возросшего потока космических лучей. (А почему бы и нет? В выдумке про влияние весеннего



равноденствия не больше смысла, чем в подобном объяснении.) А еще можно пойти на такую хитрость: потереть конец яйца наждачной бумагой, сделав его тем самым более плоским.

Есть и еще один способ. Потрясите яйцо посильнее, чтобы прорвалась мембрана, окружающая желток. Подержите это яйцо несколько минут на столе вертикально, чтобы желток опустился на дно и, соответственно, опустился центр массы яйца. Яйцо с утяжеленной нижней частью сохранит вертикальное положение после того, как вы его отпустите.

Обычай ставить яйца вертикально в первый день весны появился в Китае несколько тысяч лет назад. С тех пор несметное число яиц было поставлено вертикально именно в этот день. Может ли это служить доказательством его влияния на гравитацию? Напротив, здесь нет никакой связи: весна по китайскому календарю приходит гораздо раньше — за 30–60 дней до дня весеннего равноденствия.

### 1.138 • ЛУННОЕ БЕЗУМИЕ

Многие верят в то, что количество рождений, дорожно-транспортных происшествий, вызовов скорой помощи, актов агрессии и тому подобного возрастает во время полнолуния. В чем причина такого эффекта? В притяжении Луны, в психологии людей или все это вообще выдумки?

**ОТВЕТ •** Могут ли быть причиной такого роста гравитационные силы? Нет, притяжение Луны пренебрежимо мало. Будь оно более заметным, возможно, вы бы чувствовали его при каждом появлении Луны на небе, то есть когда она становится ближе, в результате чего притяжение к ней становится больше. Чувствуете ли вы, что становитесь легче, когда на небе появляется Луна? Нет, конечно же, нет.

Может ли приливный эффект, возникший из-за гравитации, влиять на поведение людей? Конечно, Луна оказывает значительное и легко наблюдаемое влияние на океан, вызывая приливы и отливы. Реагируют ли люди как-нибудь на это воздействие? Нет, приливы возникают из-за разницы сил притяжения со стороны Луны (и Солнца) на противоположных концах поверхности Земли. Повышение уровня воды под Луной сопровождается повышением уровня моря и на противоположной стороне. Этот факт тоже объясняется законом Ньютона. Два или несколько объектов, расположенные на разных расстояниях от одного

и того же источника тяготения и подвергающиеся, следовательно, ускорению силы тяжести разной величины, перемещаются относительно друг друга, поскольку ближайший к центру тяготения объект сильнее всего притягивается к нему. Вода в подлунной точке испытывает более сильное притяжение к Луне, чем Земля под ней, но Земля, в свою очередь, сильнее притягивается к Луне, чем вода, на противоположной стороне планеты. Таким образом, возникает приливная волна, которая на обращенной к Луне стороне Земли называется прямой, а на противоположной — обратной. Когда Земля поворачивается, некоторые области океана проходят через точки, в которых приливные волны максимальны, и испытывают большие приливы. Разница в силах притяжения со стороны Луны на разных сторонах человеческого тела слишком мала, чтобы вызвать похожий эффект. Так что и это ничего не объясняет.

Но почему мы рассматриваем только гравитационное воздействие? Термин «полная луна» означает, что весь диск — лицо Луны, обращенное к нам, — освещается Солнцем. Степень освещения никоим образом не сказывается на силе тяжести, действующей на нас со стороны Луны. Таким образом, можно было бы предположить, что «лунный эффект» — явление чисто физиологическое: люди становятся неадекватными из-за избыточного света по ночам, даже если живут в больших освещенных городах или не выходят ночью на улицу.

Увы, но если вы построите график зависимости количества рождений, дорожных происшествий, госпитализаций, актов агрессии и тому подобного от фаз Луны, вы не увидите на нем пика в точках полнолуния. «Лунный эффект» — это просто миф, хотя и очень популярный даже среди профессиональных медиков.

### 1.139 • ПРИТЯГИВАЮЩИЙ ХОЛМ

На земном шаре существуют места, где машину словно бы тащит вверх в гору. Одно из таких мест находится в Огайо, в окрестностях города Ментора. Однажды, будучи в тех краях, я ехал с холма вниз на нейтральной передаче и в какой-то момент машина замедлилась до полной остановки, а потом двинулась назад к вершине холма. Действительно ли сила тяжести в таких местах направлена вверх? (Если вы окажетесь на одном из таких холмов, будьте предельно осторожны и постарайтесь, чтобы идущая за вами машина не врезалась в вас, ведь ее водитель не ожидает, что передняя машина остановится или замедлит ход.)

**ОТВЕТ •** Этот эффект — иллюзия, но она бывает столь убедительной, что может испугать. Когда я впервые испытал это близ Ментора, со мной в машине сидела одна из моих дочерей. Хотя тогда она была маленькой и мало что знала о гравитации, когда машина покати-лась вверх, она расплакалась.

Если вы посмотрите вдоль дорожного полотна, иллюзия исчезнет и вы увидите реальный уклон дороги. Хотя вы все время едете вниз с холма, на участке, где вы спускаетесь не так быстро (по сравнению с другими участками дороги), вам может показаться, что машина начала взбираться вверх. (Внимательно следите за другими машинами, которые спускаются на скорости по этой же дороге.)

Ровная дорога также может показаться наклонной: например, представьте себе, что горизонтальная дорога перед холмом, закрывающим настоящий горизонт, поворачивает налево. У вас возникнет ощущение, что по мере того, как дорога приближается к холму, она идет вниз, поскольку вы будете воспринимать вершину холма как горизонт.

#### 1.140 • ПАДЕНИЕ ЧЕРЕЗ ЦЕНТР ЗЕМЛИ

Представьте себе дыру в Земле, идущую вдоль земной оси от одного полюса к другому. Случись вам упасть в эту дыру, сколько времени потребовалось бы, чтобы долететь до противоположного полюса, и что произошло бы с вами, если бы вы не смогли из нее выбраться? А что изменится, если пробуровать Землю насквозь в любом другом месте?

Выдвигалась идея укороченной версии похожего тоннеля для транспортировки грузов между городами с плотным движением — например, между Нью-Йорком и Вашингтоном. По проекту нужно было выкопать прямой тоннель между двумя городами и по нему проложить пути. Поезду, выехавшему из одного города, почти не требовалось бы энергии, чтобы доехать до другого. За счет чего поезд двигался бы по тоннелю и сколько времени заняло бы это путешествие?\*

В раннем научно-фантастическом романе Джорджа Гриффита «От полюса к полюсу» описывается, как трое друзей отправляются в путешествие через толщу

\* Похожая идея выдвигалась в научно-фантастическом романе Н. Трублаини «Глубинный путь» (тоннель между Москвой и Тихоокеанском — вымышленным городом, хотя где он мог бы находиться, примерно понятно). Рассматривали эту тему и другие авторы. Сейчас этим проектом занимается Илон Маск (тоннель Нью-Йорк — Вашингтон). *Прим. ред.*

Земли по образованному естественным путем тоннелю (конечно, выдуманному), который соединяет Северный полюс с Южным. Они стартуют с Южного полюса в капсуле, к которой привязаны шары с гелием и водородом для торможения. Сначала капсула падает к центру Земли, и по мере приближения к нему сила тяжести становится, по мнению Гриффита, пугающе большой, а в центре на мгновение исчезает.

Последующий их подъем к Северному полюсу происходит медленнее, чем они ожидали, и шары здесь используются для создания подъемной силы. Среди этих троих есть ученый, и по его расчетам капсула сможет подняться лишь на определенную высоту, а потом она затормозится и остановится, а пассажиры окажутся в ловушке. Герои выбрасывают тяжелые механизмы, но этого недостаточно, чтобы облегчить капсулу. В отчаянии ученый выбирается из капсулы через люк в ее дне, некоторое время висит на руках, а потом срывается вниз. Такая потеря массы оказывается достаточной, чтобы капсула долетела до верха тоннеля, где остальные два пассажира успевают благополучно выскочить наружу. (Ученые часто готовы жертвовать собой ради счастья других!) Насколько правдоподобна эта история?

**ОТВЕТ •** Представим, что вы упали в вертикальный тоннель, соединяющий два полюса. Остановим ваш полет на мгновение в момент, когда вы находитесь на определенном расстоянии от центра Земли. Вообразим себе сферу с этим радиусом и с центром в центре Земли. Масса внутри этой сферы притягивает вас, а масса вне этой сферы — нет, поскольку сила притяжения от любого участка этой внешней части, направленная наружу с вашей стороны Земли, уравнивается силой притяжения симметричного участка на противоположной стороне Земли, направленной внутрь.

Продолжим полет. По мере того как вы приближаетесь к центру, радиус и, соответственно, объем внутренней сферы и содержащаяся в ней масса уменьшаются, уменьшается и сила притяжения со стороны этой сферы. В момент, когда вы пролетите центр Земли, сила притяжения будет равна нулю, а подъем по второй половине тоннеля будет зеркальным отображением спуска. Предположим, условия полета идеальны: нет сопротивления воздуха, пролетаемые при падении и подъеме пути равны, вы чудесным образом выжили в смертоносных условиях раскаленного ядра Земли. Тогда в конце концов вы достигнете противоположного выхода из тоннеля.

Вы проведете в этом путешествии 42 минуты. (Здесь мы предположили, что плотность Земли везде одинакова. Если ядро имеет большую плотность, чем остальная масса Земли, это время несколько уменьшится.) Если вы не успеете вовремя выскочить из своей капсулы, она утащит вас обратно, и вы до бесконечности будете болтаться в тоннеле между полюсами.

Если тоннель прорыт не по оси Земли, то, чтобы не врезаться в его стенки, тоннель нужно искривить. Проблема в том, что вы начинаете падать, имея ненулевую скорость вращения, равную скорости Земли в точке входа в тоннель. Когда вы падаете к центру, вы пролетаете области, где скорость вращения меньше, поэтому в неискривленном тоннеле вы неминуемо врежетесь в стенку.

В воображаемых прямолинейных тоннелях между городами ближе всего к центру Земли находится точка посередине тоннеля. Фактически первую половину пути поезд будет падать, а вторую половину — подниматься. Дополнительная энергия нужна только для того, чтобы преодолеть сопротивление воздуха. Время в пути составит те же 42 минуты, что и путешествие от одного полюса к другому.

Детали этой научно-фантастической истории оставляю вам для разбора.

#### 1.141 • РАСТЯЖЕНИЕ ПЛАСТИКОВЫХ ПАКЕТОВ

Почему, когда вы кладете в пластиковый пакет тяжелые продукты, а потом несете его за ручки, первое время они выдерживают груз, но через некоторое время растягиваются, а иногда и рвутся?

**ОТВЕТ** • Если вы прикрепите груз к нижнему концу пружины, подвешенной за верхний конец, пружина растянется на некую величину и в таком положении останется. Пластмасса, основой которой является полимер, ведет себя иначе. Если подвесить груз к нижнему концу пластиковой ленты, она сначала растянется, как пружина, но потом, в отличие от пружины, продолжит растягиваться — возникнет так называемая *вязкоупругая деформация*. Механизм деформации в разных полимерах может быть разный, но суть этого явления одинакова. Полимер состоит из множества длинных переплетающихся между собой молекул, напоминающих горю спагетти на тарелке. Когда полимер оказывается под нагрузкой, молекулы растягиваются и понемногу распутываются. Постепенная переориентация молекул приводит к тому, что пластик понемногу

растягивается. Если пластиковая лента достаточно вытянулась под действием нагрузки, она может сузиться, то есть образуется так называемая *шейка*.

#### 1.142 • МОСТОВАЯ ГИГАНТОВ И КОЛОННЫ ИЗ КРАХМАЛА

Мостовая гигантов в Северной Ирландии — застывший древний лавовый поток, который дошел до нас в виде базальтовых колонн разной высоты. Колонны удивительные, поскольку их сечения являются многоугольниками, в большинстве своем — шестиугольниками. Как могла застывшая лава расколоться так, чтобы образовались вертикальные колонны с поперечными сечениями в виде многоугольников? Попробуйте соорудить похожие колонны, смешав кукурузный крахмал с водой и подсушив раствор лампой.

**ОТВЕТ** • Когда лава медленно остывает, на ее поверхности образуются трещины, которые затем уходят все глубже в толщу лавы. Образуются они из-за того, что при охлаждении лава сжимается и в ней возникают *напряжения*, стремящиеся разорвать ее на части. Когда напряжение возрастает настолько, что превышает прочность лавы, она раскалывается, появляются трещины и напряжение уменьшается. Новая трещина не может подойти к старой под малым углом, поскольку узкий участок между ними не будет сопротивляться деформации, поэтому трещины могут пересекаться только под прямыми или тупыми углами. В этом случае поверхность должна покрываться трещинами, образующими прямоугольные, пятиугольные или шестиугольные ячейки.

После первого этапа образования трещин в лаве начинает развиваться система вторичных трещин. Эти трещины сначала могут идти по прямой, но по мере распространения в толщу лавы они начинают раздваиваться. Возможно, поведение трещин связано со скоростью охлаждения лавы, и поэтому при пересечении вторичных трещин с первичными могут образовываться колонны, у которых поперечные сечения представляют собой пятиугольники или шестиугольники.

Похозие первичные и вторичные трещины можно увидеть и в других ситуациях, например при высыхании слоев грязи. А еще вы можете наблюдать образование трещин и пятиугольных или шестиугольных колонн на примере смеси кукурузного крахмала и воды. Когда вода испаряется, смесь стремится к сжатию — в ней развиваются напряжения и появляются

трещины. Возможно, что и в этом случае поведение трещин связано со скоростью процесса, но здесь — испарения воды.

#### 1.143 • ЛОМАЮЩИЕСЯ НОГТИ

Если ломается ноготь, почему надлом идет влево или вправо, а не к лунке — через весь ноготь?

**ОТВЕТ** • Когда ломается отросший ноготь, надлом стремится распространиться в том направлении, в котором требуется меньше энергии для отделения одних клеток от других. Ноготь состоит из трех слоев: нижний слой образован умеренно твердым кератином, более толстый средний слой — самым твердым кератином, а верхний слой — самым мягким. Прочность ногтя в основном определяется средним слоем, который состоит из длинных узких клеток, которые расположены поперек ногтя — их ряды тянутся справа налево. Для того чтобы отделить ряды этих клеток один от другого, нужно затратить меньше энергии (примерно вдвое), чем разорвать множество рядов поперек. Поэтому надломы идут вдоль рядов, а не поперек ногтя к лунке.

#### 1.144 • СМЯТАЯ В ШАРИК БУМАГА

Возьмите лист бумаги, сомните между ладонями и скатайте из него шарик. Очень быстро наступит момент, когда вы не сможете сжимать его дальше, хотя в этом шарике все еще 75% воздуха. Что мешает вам сжать шарик еще больше?

**ОТВЕТ** • Когда вы сминаете бумагу, в ней образуются *искривленные ребра* (складки) и *конические точки* (пики). Для того чтобы переориентировать бумажные волокна в эту новую конфигурацию, требуется затратить энергию, а для преодоления трения между отдельными волокнами и между фрагментами листа требуется приложить силу. Можно сказать это и по-другому: энергия запасается в тех местах, где в бумаге возникают напряжения. Если вы расправите лист бумаги, вы увидите линии сгибов и помятости, где возникали напряжения.

Чтобы еще больше сжать бумажный шарик, нужно разрушить уже образованные складки и создать новые, а для этого придется затратить дополнительную энергию. Но перестроить волокна теперь еще труднее. В конечном итоге наступает момент, когда у вас уже не хватает сил — энергии — для того, чтобы сжать шарик еще больше. И тем не менее, если положить шарик под тяжелый пресс, он продолжит сжиматься в течение

нескольких недель или даже лет. Волокна постепенно будут смещаться, как если бы они представляли собой расплавленную вязкую массу, похожую на жидкость. Это так называемое *пластическое течение*.

#### 1.145 • ПРИМЕРЫ РАСШИРЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ

Однажды профессор Джонс из Абердинского университета\* вышел на улицу и увидел стакан воды. В руке у него случайно оказался пистолет, и ради развлечения он выстрелил в стакан, ожидая, что тот разлетится на множество осколков, как случается с пустым стаканом, когда в него попадает пуля. Вместо этого стакан с водой исчез. Позже он объяснял на своих лекциях, почему это случилось.

Через несколько лет инженеры из Королевского инженерного корпуса в Абердине решили снести высокую заводскую трубу, воспользовавшись для этого лекциями профессора Джонса, объяснявшими физику этого процесса. Они заложили взрывчатку на дно кирпичной трубы, затем заполнили трубу на два метра водой, рассчитывая, что взрыв разрушит фундамент и труба упадет на землю. Они оказались правы лишь наполовину. Нижние два метра трубы смело взрывом, да так аккуратно, что верхняя часть трубы осела и прочно встала прямо на обломки старого основания. И инженеры оказались перед еще более трудной задачей.

Почему и стакан, и нижние два метра трубы полностью уничтожило взрывом?

Серия потрясающих стробоскопических (последовательно снятых с короткими выдержками) фотографий доктора Эджертона из Массачусетского технологического института запечатлела то, что происходит с обычной лампочкой, когда в нее попадает пуля. Когда пуля проникает в колбу лампы, стекло в пулевом отверстии превращается в пыль, а потом небольшая часть этой пыли летит обратно в сторону пистолета, из которого был произведен выстрел. Разве из рассмотрения сил и импульсов не следует вывод о том, что пыль должна лететь исключительно туда же, куда и пуля?

**ОТВЕТ** • Когда пуля попадает в пустой стакан, стекло вокруг входного и выходного отверстий рассыпается в пыль, вдоль стенок стакана бегут трещины, и остальное стекло разлетается на осколки. Если стакан

---

\* Реджинальд Виктор Джонс (1911–1997) — английский физик, во время Второй мировой войны был советником Уинстона Черчилля по вопросам научно-технической разведки.



наполнен водой, жидкость не может освободить место для летящей пули и сопровождающей ее ударной волны. Поэтому вода расширяется и толкает стенки стакана, разбивая их в пыль, так что мельчайшие частички летят во всех направлениях. То же происходит и с кирпичами, расположенными в нижней части трубы на высоте до двух метров, когда веществам, образовавшимся при взрыве, внезапно требуется дополнительное пространство.

Распыленное стекло, летящее назад в демонстрациях Эджертон, тоже уносилось расширившимся газом, небольшое количество которого содержалось в колбе лампы.

### 1.146 • ПОЧЕМУ ВИСЯЩАЯ НА СТЕНЕ КАРТИНА ПЕРЕКАШИВАЕТСЯ?

Если вы повесите картину на короткой веревке на гвоздь, есть вероятность, что она со временем перекосится. Из-за чего ее положение неустойчиво? Можно ли ее как-нибудь уравновесить, не привязывая к гвоздю и не вешая на два вбитых на некотором расстоянии друг от друга гвоздя?

**ОТВЕТ •** Если веревка короткая, картина находится в неравновесном состоянии и любое случайное возмущение приведет к тому, что она перекосится — ведь в таком положении центр ее масс опустится. Можно уменьшить эту неустойчивость, подвесив картину на более длинной веревке. Минимальная длина веревки определяется соотношением между углом, образованным двумя отрезками веревки с гвоздем в качестве вершины, и боковым углом между диагоналями самой картины (рис. 1.47). Когда угол между диагоналями меньше, чем угол между отрезками веревки на гвозде, картина висит нестабильно. Когда вы заменяете веревку на более длинную, вы уменьшаете угол между отрезками веревки. Когда он становится меньше угла между диагоналями, при перекашивании центр масс картины не может опуститься, так что она останется висеть в прежнем положении.



Рис. 1.47 / Задача 1.146. Углы, определяющие положение повешенной на стену картины.

### 1.147 • ФОКУС С ДВУМЯ ПРУЖИНАМИ

Найдите две пружины с примерно одинаковой длиной и упругостью и с помощью их и трех кусков веревки подвесьте груз, как показано на рис. 1.48. Один из кусков веревки связывает концы пружин и поэтому натянут. Два других куска имеют одинаковую длину, но она больше, чем нужно, чтобы поддерживать блок, поэтому веревки висят свободно и образуют петли.

Куда устремится груз — вверх или вниз, — если перерезать короткий кусок веревки, соединяющий пружины, и блок повиснет на длинных веревках?

**ОТВЕТ •** Когда вы перережете короткую веревку, новое положение груза будет определяться двумя противоположными тенденциями. Одна связана с тем, что он теперь может держаться на двух более длинных веревках, которые раньше свисали петлями, а теперь натянулись под его воздействием, так что он должен был бы опуститься. Вторая связана с тем, что в начальной конструкции каждая пружина выдерживала полный вес груза, а в новой конфигурации на каждую из них должна прийти лишь половина этого веса. Поэтому в новой конфигурации пружины меньше растянуты и, следовательно, груз будет стремиться подняться. При условии, что длинные веревки не слишком длинные, вторая тенденция возобладает, и груз в результате поднимется, а не опустится.

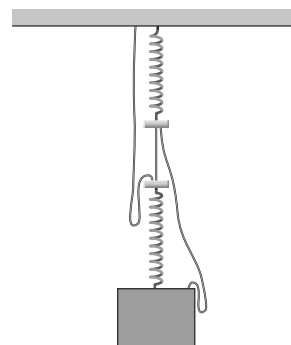


Рис. 1.48 / Задача 1.147. Груз, висющий на двух пружинах и трех веревках, две из которых свободно свисают.

### 1.148 • УСТОЙЧИВОСТЬ БАНКИ С ЛИМОНАДОМ

Устойчивость стоящей на столе жестяной банки с лимонадом или другим напитком зависит от количества энергии, которую нужно затратить на то, чтобы перевести ее из нормального — вертикального — состояния в такое, когда центр ее масс поднимется и окажется в точности над кромкой доньшка на столе. Какая

банка более устойчива — полная или пустая? Существует ли определенный уровень жидкости в банке, при котором она наиболее устойчива? Этот вопрос может оказаться важным, если банка стоит на столике в самолете, попавшем в зону турбулентности, или если ее подтолкнуть так, чтобы она скользила по столу.

**ОТВЕТ** • Полная банка устойчивее пустой. Хотя центр масс в обоих случаях находится почти на середине ее высоты, бóльшая масса наполненной банки означает, что для того, чтобы наклонить банку на такой угол, когда она опрокинется, требуется большая энергия.

Если вы станете медленно сливать жидкость из банки, на ее устойчивость повлияют три фактора. Центр масс будет опускаться до тех пор, пока уровень жидкости не опустится до середины, а потом начнет опять подниматься. Масса жидкости будет уменьшаться по мере ее выливания. Из наклоненной банки жидкость вытекает так, что ее верхняя поверхность остается горизонтальной. Учитывая все эти факторы, получаем, что обычная банка с жидкостью устойчивее всего, когда высота ее содержимого чуть больше радиуса банки.

### 1.149 • МАЯТНИК УИЛБЕРФОРСА

Странный маятник, изображенный на рис. 1.49, назван в честь Лайонела Уилберфорса — британского физика, который в 1894 году исследовал и зарегистрировал его поведение. Маятник Уилберфорса состоит из пружины, к которой приделан маленький груз с регулируемым плечом. Когда пружина оттягивается вниз, а потом отпускается, грузик сначала качается вверх-вниз, но вскоре это движение сменяется крутильными колебаниями. Затем эти виды движения периодически чередуются — движение вверх-вниз сменяется вращением, и наоборот. Длина плеча грузика важна, поскольку для того чтобы увидеть чередование движений, частота колебаний пружины и частота крутильных колебаний должны совпадать. Чтобы эти частоты подогнать друг к другу, нужно подобрать длину плеча маятника. Почему маятник Уилберфорса ведет себя так странно?

**ОТВЕТ** • Маятник Уилберфорса похож на связанные маятники, рассмотренные ранее (см. задачу 1.119). В этом случае нормальные моды (типы) колебаний — это колебания пружины и крутильные колебания грузика. Моды являются связанными, поскольку при колебаниях пружины вверх-вниз меняется ее длина и происходит скручивание, то есть при этом она

заставляет грузик вращаться: сначала он поворачивается на небольшой угол, но постепенно вся энергия переходит в эти крутильные колебания. Когда грузик вращается, он закручивает и раскручивает пружину, при этом меняется ее длина. Изменения эти сначала малы, но постепенно в колебания пружины переходит вся энергия. А потом процесс повторяется вновь.

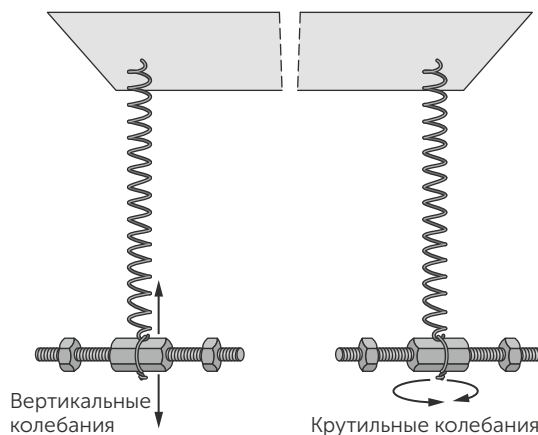


Рис. 1.49 / Задача 1.149. Чередование вертикальных и крутильных колебаний в маятнике Уилберфорса.

### 1.150 • ПОДГОТОВКА К ГОНКАМ ДРАГ-РЕЙСИНГ

В гонках драг-рейсинг (по прямой на максимальное ускорение), которые проводятся на дистанции 402 м (четверть мили), соревнуются по двум показателям — по скорости на финише и по времени прохождения дистанции. Почему при подготовке к старту водители заводят автомобиль и максимально выжимают газ, оставаясь на месте, чтобы задние колеса прокручивались? Почему эта процедура уменьшает время пробега, но не влияет заметно на скорость на финише?

**ОТВЕТ** • Когда задние колеса крутятся, резина на шинах разогревается и, возможно, расплавляется. Остывая в течение нескольких секунд, она становится липкой, и сцепление с дорогой увеличивается. Это увеличение сцепления позволяет возрасти начальному ускорению и приводит к уменьшению времени пробега по дистанции. А скорость на финише определяется в основном не коэффициентом трения, а максимальной мощностью двигателя.

### 1.151 • ПОВЕРНУТЬ ИЛИ ОСТАНОВИТЬСЯ

Трудно представить себе обстоятельства, при которых было бы еще важнее знать физику, чем когда от этого зависит ваша жизнь. Например, представьте себе, что

вы на полной скорости приближаетесь к кирпичной стене, находящейся в конце Т-образного перекрестка. Нужно ли вам тормозить изо всех сил, либо на полной скорости повернуть налево или направо, либо поворачивать и при этом тормозить?

Или рассмотрим другую ситуацию: впереди на трассе лежит ящик. Что нужно сделать, чтобы на него не наехать: изо всех сил нажать на тормоза или попытаться его объехать?

Если вы едете к перекрестку и одновременно по перпендикулярной улице к нему приближается другой автомобиль с той же скоростью, должны ли и вы, и другой водитель продолжить движение в прежних направлениях и изо всех сил давить на педаль тормоза или лучше съехать с дороги, чтобы избежать столкновения?

**ОТВЕТ** • Для начала отбросим всякие практические соображения вроде нежелания стереть тормозные колодки, разной скорости реакции водителей и дорожных условий. Тогда, как показывает исследование, лучшим решением будет ехать прямо, не сворачивая, и тормозить из всех сил. Рассмотрим ситуацию, когда сила торможения, действующая на шины, максимальна и вам хватает времени, чтобы остановиться перед стеной. Поворот на перпендикулярную улицу потребовал бы приложения вдвое большей силы, поскольку для поворота машины на  $90^\circ$  по отношению к первоначальному направлению движения нужно приложить дополнительную силу. Так что если бы вы выбрали поворот, сила инерции преодолела бы силу трения, машину бы занесло и закрутило и в конце концов она все равно бы влетела в стену. Даже если при повороте вы тормозили бы, машина все равно врезалась бы в стену.

Сможете ли вы объехать ящик, зависит от отношения его ширины к расстоянию между вашей машиной и ящиком в момент, когда вы начали действовать. Предельный случай — когда ширина ящика примерно равна половине этого расстояния. Как показывают исследования, если ящик широкий, вы должны продолжать ехать прямо и тормозить изо всех сил. Меньшие ящики можно объехать.

Когда две машины движутся к перекрестку и вот-вот столкнутся, возможно, водителям лучше свернуть с дороги. Однако опасность все равно останется: ведь тогда придется съехать на обочину, а там тоже могут быть препятствия.

### 1.152 • ПРОСКОЧИТЬ МИМО АВТОБУСА

Автобус едет по соседней с вами полосе, притормаживает на перекрестке и собирается повернуть, но на вашей полосе вроде бы достаточно места, и вы решаете проскользнуть мимо (рис. 1.50). Разумный ли это поступок?

**ОТВЕТ** • Когда автобус поворачивает, его задняя часть поворачивается вокруг задних колес, и ее заносит в противоположном повороту направлении. Если поворот достаточно крут, заднюю часть автобуса может занести на вашу полосу (примерно на метр или около того), и если вы в этот момент проезжаете мимо, он стукнет вашу машину. Чем резче поворачивает автобус, тем на большее расстояние может занести его хвост.

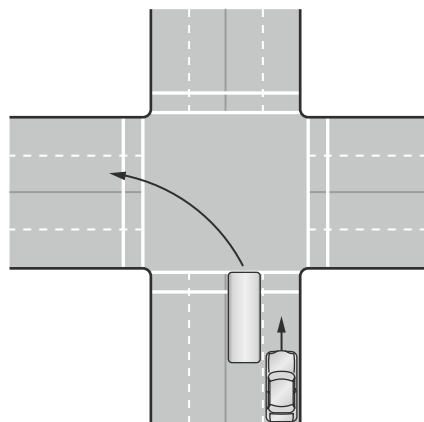


Рис. 1.50 / Задача 1.152. Машина пытается проскочить мимо поворачивающего автобуса.

### 1.153 • ДАВЛЕНИЕ В ЛИПКОЙ ЛЕНТЕ

Когда вы отматываете липкую ленту, непосредственно перед тем местом, где лента отделяется от рулона, формируется короткая область сжатия. Вы можете лучше увидеть эту область, если склеите две ленты вместе, а потом медленно начнете их разделять. Почему возникает линия сжатия?

**ОТВЕТ** • Когда лента отматывается с рулона, уже отклеенная ее часть поворачивается вокруг линии, по которой она касается остальной ленты, еще намотанной на катушку. Лента достаточно жестка, и это вращение отделенной части ленты приводит к вращению и той части ленты, которая уже вот-вот отделится, что приводит к давлению на рулон клейкого слоя с нижней стороны ленты. Когда вы перестаете отматывать ленту с катушки, прекращается и вращение, и область сжатия исчезает.

### 1.154 • БОБСЛЕЙНАЯ ТРАССА С ПОВОРОТАМИ

Задача бобслеиста — за кратчайшее время пройти трассу от вершины до самого низа. Часто победителя от проигравшего отделяют тысячные доли секунды. На прямых участках сани (боб) должны скользить как можно более плавно, а вот какой стратегии придерживаться на поворотах? Когда спортсмен входит в поворот, должен ли он направлять сани выше по склону или наоборот как можно ниже? Есть ли в обоих случаях опасность того, что сани выбросит с трека?

**ОТВЕТ •** Представьте, что вы входите в поворот на круговой плоской трассе. Для того чтобы вы смогли это сделать, на вас должна действовать центростремительная сила, направленная к центру поворота, причем чем быстрее вы едете, тем больше должна быть эта сила. Этой силой является сила трения, действующая на сани и противостоящая силе, отбрасывающей вас от центра поворота. (Это та сила трения, которая перпендикулярна движению саней, а не та, что параллельна полозьям и замедляет это движение.) Если вы входите в поворот на слишком большой скорости, трение оказывается недостаточным, сани отбрасывает в сторону, и вы вылетаете с трассы.

Повороты на бобслейном треке устроены так, что вы можете поворачивать и на большой скорости. Поверхность трека в местах поворотов наклонена к центру, и на сани действует реакция опоры со стороны наклонной ледяной поверхности, что увеличивает центростремительную силу. Так что теперь вы можете повернуть на большой скорости, не опасаясь, что вас унесет в сторону (при условии, что вы едете по наружной наклонной траектории).

Но ваша траектория не должна лежать выше, чем это необходимо, по трем причинам. 1. Чем выше вы забираетесь, тем длиннее будет путь до выхода из поворота, что увеличит зачетное время. 2. Если вы проходите поворот по высокой дуге, трение, которое испытывают сани на этом отрезке пути, а также сопротивление воздуха будут дольше тормозить их, чем при более коротком отрезке пути ниже по склону, соответственно, скорость на выходе из высокого поворота окажется меньше. 3. Поворот по высокой дуге на слишком маленькой скорости может привести к тому, что вы соскользнете со склона вниз.

### 1.155 • КОЛЬЦО НА КОЛЕБЛЮЩЕМСЯ СТЕРЖНЕ

Необычное устройство, состоящее из стержня, по которому свободно скользит кольцо, изображено на рис. 1.51. Верхний конец стержня совершает горизонтальные колебания небольшой амплитуды. Если колебания медленные, кольцо соскользнет со стержня. Но если колебания быстрые, кольцо останется на стержне, хотя вес кольца и тянет его вниз. Что удерживает кольцо на стержне?

**ОТВЕТ •** Если бы стержень находился в состоянии покоя или колебался медленно, кольцо, естественно, упало бы с него. Но если он колеблется быстро, поведение кольца определяется не только гравитацией. Верхушка стержня медленнее всего движется в точках максимального отклонения, а быстрее всего — когда проходит через центр. Таким образом, большую часть времени стержень пребывает в наклонном состоянии. Допустим, стержень наклонен влево, то есть его верхушка находится в самом левом положении. Кольцо стремится соскользнуть по стержню вниз и вправо, но прежде чем оно сдвинется, верхушка уже пойдет вправо, и стержень наклонится вправо. А как только под действием гравитации кольцо попытается соскользнуть вниз и влево, стержень уже вновь изменит наклон.

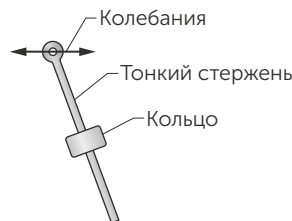


Рис. 1.51 / Задача 1.155. Колебания стержня удерживают кольцо от соскальзывания.

### 1.156 • ДОМ МАЛЕНЬКОГО ПРИНЦА

В замечательной сказочной повести Антуана де Сент-Экзюпери «Маленький принц» говорится, что главный герой прибыл с планеты размером с дом. На что была бы похожа жизнь на этой планете, существуй она на самом деле? (В частности, мог бы по ней разгуливать Маленький принц?)

**ОТВЕТ •** Автор этой причудливой задачи Дж. Стренд рассматривает планету чуть больше той, что описана в знаменитой книге, и приходит к выводу, что даже прогуляться по такой планете будет весьма затруднительно из-за очень маленького притяжения. Если бы



Маленький принц шел со скоростью больше 11 см/с, его унесло бы в космическое пространство, откуда он никогда не смог бы вернуться, а если бы он шел медленнее (но все же быстрее 8 см/с), то оказался бы на околопланетной орбите и вечно вращался бы вокруг нее. Когда-нибудь астронавтам, которые будут изучать подобные астероиды, придется научиться решать эту проблему.

### 1.157 • НА ПАРАШЮТЕ С ТЫКВОЙ

В 1987 году во время Хэллоуина двое парашютистов, находясь в свободном полете в небе западнее Чикаго, перекидывали друг другу тыкву. Все было очень весело до тех пор, пока у парашютиста, который держал в руках тыкву, не раскрылся парашют. В ту же секунду тыква вырвалась у него из рук, пролетела полкилометра, пробила крышу дома, шлепнулась на пол кухни, раскололась и забрызгала всю новую кухонную мебель. Почему парашютист не смог удержать тыкву?

**ОТВЕТ •** Когда парашют раскрылся, он, уменьшая скорость падения, то есть придавая ускорение, направленное вверх, подействовал на парашютиста с большой силой. Сила, с которой парашютист был способен удерживать тыкву, оказалась недостаточной, чтобы затормозить с таким же ускорением тыкву. А парашюта у нее не было. И бедная тыква вдребезги разбилась в домике к западу от Чикаго.

### 1.158 • КАК ВЫТАЩИТЬ БЬЮЩУЮСЯ РЫБУ

Если вам на крючок попала маленькая рыбка, вытащить ее из воды нетрудно — просто крутите ручку на катушке спиннинга и сматывайте леску. Но что делать, если на крючок попала крупная рыба, решившая побороться за свою жизнь?

**ОТВЕТ •** Когда вытаскивается крупная рыба, происходит борьба вращающих моментов. Конец спиннинга неподвижен и направлен на крупную сопротивляющуюся рыбу. Чтобы ее вытащить, нужно крутить ручку на катушке с силой, необходимой для создания достаточно большого вращающего момента. Проблема в том, что плечо рычага — в данном случае это расстояние от конца ручки до центра катушки, вокруг которого она крутится, — мало. Проще тащить рыбу, взяв одной рукой спиннинг выше катушки и вращая его вокруг нижнего конца. Если рыба очень сильная, можно нижний конец спиннинга укрепить на земле

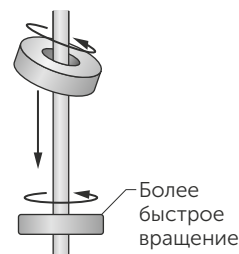
и вытягивать леску обеими руками. В любом варианте плечо рычага окажется больше, а следовательно, необходимая сила будет меньше. Поднятый сначала конец спиннинга по мере сматывания лески нужно постепенно опускать.

Если хотите измотать рыбу и при этом контролировать ее, лучше использовать гибкое удилище, поскольку при его сгибании уменьшается расстояние от руки до его кончика и, соответственно, уменьшается вращательный момент, развиваемый рыбой. И тогда, чтобы удержать удилище, вам придется прикладывать меньший момент сил.

### 1.159 • ВРАЩАЮЩЕЕСЯ КОЛЬЦО

Вам встречалась игрушка в виде пластмассового кольца, вращающегося вокруг деревянной палочки? Если раскрутить и отпустить кольцо, когда оно находится наверху, оно будет постепенно опускаться, вращаясь. Почему оно опускается медленно и угловая скорость вращения при этом увеличивается? Если вы быстро перевернете палочку, когда кольцо достигнет низа, процесс повторится — до бесконечности.

**ОТВЕТ •** Если бы кольцо просто скатывалось по наклонной плоскости, то потенциальная энергия преобразовывалась бы в кинетическую и скорость скатывания росла бы. Кольцо на палочке ведет себя аналогично, но касается плоскости не наружной, а внутренней поверхностью. Оно все время наклонено и касается палочки только частью своей поверхности, а точка соприкосновения движется по спирали вокруг палочки. Скорость снижения кольца зависит от шага этой спирали, который, в свою очередь, зависит от наклона кольца. По мере того как кольцо раскручивается, угол его наклона, шаг спирали и скорость снижения уменьшаются. Если запустить два кольца, то верхнее может догнать нижнее и отскочить от него вверх — тоже по спирали.



**Рис. 1.52 / Задача 1.159.** В верхнем исходном положении кольцо наклонено сильнее и вращается медленно.

В нижнем — оно наклонено меньше и вращается быстрее.

### 1.160 • ПРОПЕЛЛЕР НА ПАЛОЧКЕ С ВЫРЕЗАМИ

Простенькая игрушка, но то, как она работает, всегда вызывает жаркие споры. По всей длине палочки делаются небольшие поперечные вырезы, а на одном из ее торцов с помощью гвоздика закрепляется свободно вращающийся деревянный пропеллер. Второй палочкой проводят по вырезам (рис. 1.53). Взяв палочку с вырезами левой рукой так, что указательный палец окажется на одной стороне палочки с вырезами, а большой палец на противоположной стороне, начинайте водить другой палочкой взад-вперед по вырезам, как бы поглаживая. С силой прижмите к палочке с вырезами указательный палец. Пропеллер начнет крутиться. Ослабьте нажим указательного пальца и прижмите к палочке большой палец, продолжая при этом водить другой палочкой по вырезам. Пропеллер закрутится в другую сторону.



Рис. 1.53 / Задача 1.160. Пропеллер закручивается на гвоздике после того, как в палочке установятся колебания.

Показывая этот фокус тем, кто видит его первый раз, незаметно нажимайте на палочку то большим, то указательным пальцами: все будут поражены неожиданными сменами направления вращения пропеллера. Вы же можете объяснять это явление самым фантастическим образом, например, что изменение направления вращения пропеллера связано с флуктуациями интенсивности космического излучения.

Как же на самом деле это работает?

**ОТВЕТ** • Если на обе стороны палочки не оказывается никакого давления, то гвоздик будет смещаться только вертикально и пропеллер из-за вибраций будет только подрагивать. Но когда вы надавливаете на одну сторону палочки, из-за этого давления в моменты перемещения по вертикали палочка начнет смещаться и в горизонтальной плоскости. Сложение этих двух движений вызовет перемещение гвоздика по эллиптической траектории, а из-за трения между гвоздиком и пропеллером в том же направлении будет крутиться и пропеллер. Когда вы надавливаете на противоположную

сторону палочки, гвоздик, а следом за ним и пропеллер крутятся в противоположном направлении.

### 1.161 • ТОЛКАНИЕ ЯДРА И БРОСАНИЕ МОЛОТА

Под каким углом нужно толкнуть ядро, чтобы оно полетело как можно дальше? Правда ли, что этот угол равен  $45^\circ$ , как утверждают некоторые учебники? Если нет, не вызвана ли разница сопротивлением воздуха, которое встречает ядро на своем пути? Под каким углом нужно запускать молот при броске? Зачем атлет, прежде чем метнуть молот, раскручивается сам и двигается вперед? Почему непосредственно перед тем, как отпустить молот, он прижимает его к себе?

**ОТВЕТ** • Если ядро бросает машина, находящаяся на уровне земли, то учебники правы: при угле  $45^\circ$  ядро полетит дальше всего. Но если оно вылетело из пушки на обычной для пушки высоте, теория утверждает, что оптимальный угол равен примерно  $42^\circ$ . Однако большинство толкателей ядра любят бросать ядро под меньшими углами, обычно не больше  $29^\circ$ , поскольку под таким углом его физически легче толкать и ядро вылетит с большей скоростью. И хотя дальность при таких углах должна была бы уменьшиться, увеличение скорости с лихвой компенсирует это уменьшение. Влияние сопротивления воздуха при метании ядра мало.

Чтобы нарастить кинетическую энергию молота перед тем, как запустить его в воздух, атлет прокручивает его несколько раз, стоя на месте, потом он прокручивается несколько раз вместе с молотом, перемещаясь в это же время внутри круга для запуска так, чтобы еще больше увеличить скорость молота при запуске. Молот в руках атлета движется не по горизонтали — он поднимается выше всего, когда ориентирован в направлении предполагаемого запуска, и проходит нижнюю точку, когда направлен в противоположную сторону. Во время опускания молота атлет на мгновение прекращает переступать ногами, вытягивается в направлении движения молота, что еще больше увеличивает кинетическую энергию молота при запуске.

Когда атлет заканчивает свой последний оборот и подходит к краю круга для запуска, он на мгновение притягивает молот к туловищу, чтобы увеличить скорость при запуске. (Это напоминает то, как фигурист, вращаясь на месте, прижимает к туловищу руки, чтобы быстрее вращаться.) Выполняется бросок примерно с высоты плеч, поэтому угол, под которым метают молот, должен быть меньше  $45^\circ$ .

### 1.162 • ПРЫЖКИ ПРИ СПУСКЕ С ГОРЫ НА ЛЫЖАХ

Когда опытный лыжник при спуске с горы видит, что впереди склон становится отвесным, он приседает, а потом подпрыгивает и подтягивает ноги вверх, так что пролетает по воздуху какое-то расстояние, прежде чем опять приземлиться на склон. Почему лыжник не доезжает до края обрыва и не использует его как трамплин, чтобы отправиться в полет?

**ОТВЕТ** • Если лыжник не подпрыгнет заранее, а докатится до места, где начинается отвесный склон, и лишь тогда оторвется от земли, он пролетит дальше и опустится на склоне ниже. Чем больше он пролетит по воздуху, тем сильнее будет удар при приземлении и тем больше шансов опрокинуться. Если лыжник подпрыгивает вверх, то при возвращении на продолжение основной траектории движения он будет иметь вертикальную компоненту скорости, направленную вниз, что укоротит его полет.

### 1.163 • КАК ВЫТАЩИТЬ СКАТЕРТЬ ИЗ-ПОД ТАРЕЛОК

Вытягивание скатерти из-под стопки тарелок — классический образец эксперимента для аудитории. Когда я знакомился с девушками, на первом свидании, чтобы завязать разговор, я часто использовал этот фокус, только ставил на скатерть не тарелки, а наполовину полные лабораторные стаканы и колбы с вином. Обычно после выполнения этого трюка разговор завязывался. Однако если вы попытаетесь продемонстрировать этот трюк на одном из свиданий, имейте в виду, что недостаточно только показать его. Чтобы разговор продолжился, нужно и объяснить, в чем тут фокус. Так как же это работает?

**ОТВЕТ** • Если вы быстро и без рывков потянете скатерть на себя, вы на мгновение уменьшите трение между ней и тарелками. Это обычное явление: когда две поверхности уже начали скользить одна по другой, трение между ними обычно меньше, чем когда скольжение вот-вот начнется. В случае скатерти это уменьшение или, по крайней мере, его часть происходит еще и потому, что тарелки начинают слегка подпрыгивать. Это значит, что они не все время касаются скатерти, трение между ними и скатертью еще уменьшается, и скатерть может выскользнуть из-под них. Однако и маленькое трение заставит тарелки двигаться за скатертью. Чем дольше вы тянете, тем больше тарелки сдвинутся, то есть вам надо тянуть скатерть быстро, чтобы тарелки не успели свалиться со стола.

### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

#### 1.164 • ПЕРЕТАСКИВАНИЕ ВАГОНОВ ЗУБАМИ

4 апреля 1974 года бельгиец Джон Массис сумел протолкнуть по рельсам два пассажирских вагона. Он зажал зубами мундштук, прикрепленный к веревке, которая была привязана к вагонам. Затем отклонился назад и уперся ногами в шпалы. Вагоны имели массу примерно 80 т, то есть весили 785 000 Н. Поскольку Массис не поднимал, а передвигал их, важен был не вес, а масса и сила трения. Каким-то чудом он передвинул эту огромную массу на приличное расстояние. (На уроках физики понятие работы как произведения силы на расстояние, на которое переместили предмет, иногда воспринимается как абстракция. Благодаря Массису это понятие обрело реальный смысл, хотя и довольно странный.)

### 1.165 • ПОДПРЫГИВАЮЩИЙ СТУЛ

Если вы сидите на стуле, а он стоит на обычном гладком полу, вы можете передвинуться вместе со стулом, не касаясь пола ногами, а заставив стул совершать короткие резкие скачки. Но согласно законам физики первоначально неподвижные предметы (вы и стул) без воздействия на них извне (без внешней силы) не могут двигаться. Какая же сила вынуждает всю систему, состоящую из вас и стула, скакать?

**ОТВЕТ** • Чтобы сдвинуться со стулом, нужно сначала резко и сильно надавить руками вниз и назад (под углом) на заднюю часть стула. Сила, направленная вниз, увеличит давление стула на пол, а значит, и силу трения, которая не позволит стулу проскользнуть назад. Эта сила еще и бросит ваше туловище вперед, и в это время вам нужно резко потянуть стул вверх и вперед. Сила, направленная вверх, уменьшит давление стула на пол, а следовательно, трение между стулом и полом, и это позволит стулу скакать вперед. Так что внешняя сила, заставляющая вас двигаться, на самом деле есть — это сила трения, появляющаяся вначале.

### 1.166 • КАК ПОДНЯТЬ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПОМОЩИ ПАЛЬЦЕВ

Возможно, вы видели такой трюк на представлениях: фокусник выбирает трех человек из зрителей себе в помощники, и они вместе поднимают четвертого

зрителя — довольно тяжелого. Трюк состоит в том, что фокусник и три его помощника должны поднять четвертого со стула, используя лишь один свой указательный палец. Фокусник засовывает свой указательный палец под мышку правой руки сидящего на стуле, первый помощник засовывает свой палец под мышку левой руки, второй — под левую коленку, третий — под правую. С огромным усилием фокусник и три его помощника пытаются поднять сидящего человека, но все их усилия напрасны — он слишком тяжел.

Чтобы добавить немного магии, фокусник и три его ассистента возлагают руки на голову сидящего и слегка надавливают на нее. Потом все опять помещают пальцы в прежние позиции, по сигналу фокусника опять делают попытку поднять сидящего, и — о чудо! — на этот раз они легко поднимают его. Создается впечатление, что давление уменьшает вес сидящего!

Что же произошло? Если бы небольшое давление сверху на мою голову могло уменьшить мой вес, я бы перестал наконец беспокоиться о лишних килограммах.

**ОТВЕТ** • Во время первой попытки фокусник и три его помощника пытались поднять сидящего, не координируясь, — кто-то прилагал усилие раньше, кто-то позже. Приложенные не одновременно силы просто опрокидывают сидящего в ту или другую сторону, поскольку каждая создает свой вращающий момент. Так что шансов поднять человека практически нет (да и фокусник может подталкивать сидящего, чтобы усилить эффект).

Во время второй попытки силы прикладываются одновременно по сигналу фокусника. Никаких крутящих моментов не возникает, и вес сидящего теперь равномерно распределяется между четырьмя людьми, так что сидящего человека при не очень больших усилиях поднять можно.

### 1.167 • РАКЕТЫ И САНКИ

Предположим, что у изначально неподвижной ракеты в космосе включились двигатели. Может ли она развить скорость, большую, чем та, с которой вылетает топливо? Зависит ли конечная скорость от того, сжигалось топливо быстро или медленно? Почему ракеты, запущенные с Земли, делаются многоступенчатыми? (Идея эта зародилась в Китае примерно в 1000 году нашей эры.) Есть ли оптимальное количество ступеней? Может ли ракета с одной ступенью иметь такие параметры, чтобы вывести на околоземную орбиту спутник

или доставить человека на Луну? Насколько осуществима идея, описанная в романе Жюль Верна «Путешествие на Луну», когда корабль с людьми запускался, как ядро, из большой пушки, вкопанной в землю?

Вы оказались в маленьких санях, а вокруг вас ледяное и очень скользкое пространство, которое вам нужно пересечь. На кромке льда у берега разбросаны камни, и вы решаете погрузить в сани несколько, чтобы, кидая их в направлении берега, заставить сани двигаться в противоположном направлении. Но сани могут вместить только некую определенную общую массу камней. Чтобы они смогли двигаться с максимальной скоростью, лучше загрузить сани большим количеством маленьких камней или небольшим количеством больших? То есть большую или маленькую порцию массы камней вы должны кидать при каждом броске? Для простоты примем, что камни — и большие, и маленькие — бросаются с одинаковой скоростью относительно саней.

**ОТВЕТ** • Ракета может лететь быстрее, чем из нее вылетает топливо, при условии, что отношение ее исходной массы к конечной будет равно 2,72 (то есть равно числу  $e$ ). Скорость, с которой топливо сжигается, не влияет на конечную скорость ракеты. Ракета с одной ступенью не может вывести груз с Земли на орбиту и тем более доставить его на Луну, поскольку при разумных технических ограничениях (скорость истечения продуктов сгорания топлива и доли топлива в общей массе) она не сможет развить даже первой космической скорости, необходимой для выхода на орбиту. Поэтому ракету делают с несколькими ступенями. Когда первая ступень израсходовала свое топливо, она сбрасывается, поскольку ее массу тащить дальше бессмысленно, и запускается двигатель следующей ступени. Из-за дороговизны каждой следующей ступени существует их оптимальное количество — четыре или пять.

Люди в космическом корабле, запущенном из пушки, погибнут: они просто не вынесут перегрузки из-за огромного ускорения, которое будет необходимо кораблю, чтобы преодолеть земное тяготение.

Конечная скорость саней будет больше, если выбрасывать маленькое количество больших камней, а не большое количество маленьких. Во втором случае при бросании каждого камня половинной массы скорость саней увеличивается, однако сумма этих двух увеличений оказывается меньшей, чем при бросании одного большого камня.



## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 1.168 • С ЗЕМЛИ НА ВЕНЕРУ

Первая попытка послать человека на Венеру была предпринята в Балтиморе в 1928 году. Роберт Кондит и два его ассистента построили ракету из железных уголков и обтянули ее парусиной. В качестве топлива Кондит использовал бензин, который испарялся и распылялся в стальных трубках, а затем поджигался с помощью свечи зажигания.

Кондит собирался совершить путешествие в одиночку, взяв с собой воду, еду, два фонаря и аптечку первой помощи. О том, как сориентироваться и найти Венеру в космосе, он не беспокоился. Он решил, что нацелит на нее свой аппарат, когда оторвется от Земли. Добравшись до Венеры, он планировал раскрыть восьмиметровый парашют, который должен был замедлить его спуск на планету. Как именно он собирался возвращаться, не вполне ясно, но если бы на Венере не оказалось пищи и воды, он не стал бы там задерживаться.

В день тестовых испытаний Кондит забрался в свой аппарат и включил двигатель: он думал подняться примерно на 400 м, просто чтобы проверить аппарат. Огромные языки пламени и клубы дыма вырвались из стальных трубок, но аппарат не тронулся с места. Кондит прибавил газа, пламя стало таким огромным, что все движение на улице остановилось — зеваки с интересом наблюдали за происходящим. Но аппарат так и не поднялся. Кондит не сдался и продолжал попытки взлететь, пока не кончилось топливо.

Он так и не добрался до Венеры, иначе вы бы уже знали эту историю.

### 1.169 • ВЫБОР МОЛОТКА

Когда вырезаешь стамеской узор на дереве или мягком камне, какую колотушку выбрать — деревянную или стальную? А если нужно вытесать что-то из более твердого камня, например гранита? Почему забивать гвоздь в дерево лучше стальным молотком, а не деревянным?

**ОТВЕТ** • Если материал мягкий и требуется лишь небольшое усилие, чтобы стамеска вошла в него, желательно передать ей как можно больше энергии. В этом случае деревянная колотушка подходит лучше (удар колотушкой — неупругий). Хотя она воздействует на стамеску, а следовательно, и на материал, со сравнительно небольшой силой, зато передает большую часть энергии. Если же материал более твердый, прорубить его труднее, и для этого потребуется большая сила. Стальной молоток для этой цели подойдет лучше — он воздействует на стамеску с большей силой, так как его масса больше и он отскакивает от стамески. Удар стального молотка по стамеске упругий, что означает, что ей от него передается мало энергии — большая часть остается в молотке.

И для забивания гвоздей, конечно, выбирают стальной молоток. Если ударить по гвоздю деревянной колотушкой, то, когда она коснется шляпки гвоздя, ее поверхность деформируется, на что уйдет часть ее же энергии.

### 1.170 • КЛАПАН СКОРОВАРКИ

Обычная скороварка представляет собой кастрюлю с герметично закрывающейся крышкой. В крышке имеется рабочий клапан — трубка со свободно закрепленным цилиндром, на боку у которого три отверстия разного диаметра. Чтобы установить в скороварке требуемое давление, выбираем на цилиндре соответствующее отверстие. Как все это работает — ведь вес цилиндра не меняется от того, какое отверстие мы выбираем?

**ОТВЕТ** • Пар, образовавшийся в кастрюле, с силой давит вверх — в противоположном весу цилиндра направлении. Давление, которое поддерживается в скороварке, примерно равно давлению, необходимому для открытия клапана. Когда давление в скороварке слишком велико, оно поднимает цилиндр и лишний пар выходит через отверстие, так что давление в скороварке возвращается к желаемому уровню. Если вы выбрали отверстие большего диаметра, вес цилиндра распределяется по большей площади сечения, поэтому давление, необходимое для того, чтобы цилиндр поднялся и началось стравливание пара, меньше. Отверстие небольшого диаметра обеспечивает большее давление в скороварке.

### 1.171 • СКОЛЬЖЕНИЕ ЛИНЕЙКИ ПО ПАЛЬЦАМ

Поместите концы линейки на свои указательные пальцы, положенные на край стола. Начните одновременно сдвигать пальцы друг к другу. Равномерно ли движутся

пальцы? Нет, под линейкой скользит то один палец, то другой, и пока пальцы не сойдутся в ее середине, они будут чередоваться несколько раз. Почему?

**ОТВЕТ** • Исходные условия на концах линейки кажутся одинаковыми, хотя на самом деле это не так. Неизбежно вы двигаете одним, скажем правым, пальцем сильнее, преодолевая трение покоя между ним и линейкой, так что он первым начинает скользить под линейкой. Теперь уже трение, сопротивление которого ему приходится преодолевать, — *трение скольжения*, и оно меньше, чем *трение покоя* между линейкой и левым пальцем. Но по мере того, как правый палец движется к середине, вес той части линейки, которая остается за ним, увеличивается, следовательно, растут давление на палец и сила трения скольжения, пока она не начнет превосходить силу трения покоя, действующую на левый палец. Тогда правый палец останавливается, и начинает скользить левый палец. Но вскоре за левым пальцем остается такой большой вес, что он останавливается, и опять начинает двигаться правый палец. Эти циклы повторяются до тех пор, пока пальцы не встретятся где-то на середине линейки\*.

#### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

##### 1.172 • НЕУДАВШИЙСЯ РЕКОРД ПО ПЕРЕТЯГИВАНИЮ КАНАТА

Харрисбург, Пенсильвания, 13 июня 1978 года. Школьники и преподаватели решили установить мировой рекорд по перетягиванию каната. Участвовали около 2200 человек. Тянули плетеный нейлоновый канат длиной 600 м, способный выдержать нагрузку 57000 Н (5800 кг). Однако вскоре после начала соревнования веревка лопнула. Стоявшие впереди, ближе к середине каната, ослабили хватку, но стоявшие сзади продолжали тянуть, и канат быстро проскользнул через руки некоторых ребят. Четверо из них получили серьезные травмы пальцев.

##### 1.173 • СТРЕЛЬБА ВДОЛЬ СКЛОНА

Предположим, вы настроили прицел снайперской винтовки на определенное расстояние в пределах дальности стрельбы. Допустим, вы находитесь на склоне

\* А теперь проделайте эксперимент в обратном порядке — раздвигая пальцы от середины. Вы увидите, что линейка ведет себя иначе. *Прим. ред.*

и цель расположена выше или ниже именно на таком расстоянии от вас. Когда вы выстрелите по цели, не меняя настроек прицела, поразит ли пуля цель, пролетит ли она выше или ниже цели?

**ОТВЕТ** • Вас, наверное, это удивит, но пули пролетят выше цели и если мишень находится выше по склону, и если ниже. Чтобы скорректировать прицел, нужно умножить расстояние до цели на косинус угла наклона склона по отношению к горизонтали. Чтобы убедиться в правильности ответа, представьте, что вы стреляете вертикально вверх или вертикально вниз. В этом случае ошибка прицеливания будет равна нулю.

##### 1.174 • КАК ТРОГАТЬСЯ С МЕСТА НА СКОЛЬЗКОЙ ДОРОГЕ

Если автомобиль с механической коробкой передач стоит на скользкой дороге, на какой скорости ему лучше трогаться с места — на первой или на второй?

**ОТВЕТ** • Поскольку дорога скользкая, трение шин мало и шины начнут проскальзывать уже при небольших усилиях. Чтобы избежать проскальзывания, вначале нужно к колесам приложить лишь небольшой момент внешних сил. Вы можете включить первую передачу и плавно и осторожно отпускать сцепление. Либо включить вторую передачу, чтобы уменьшить крутящий момент.

##### 1.175 • БАЛАНСИРОВКА КОЛЕС

Когда вы надеваете на колеса новые шины, они должны пройти *балансировку* (процедуру, при которой маленький свинцовый грузик прикрепляется к ободу). Неотбалансированное колесо будет крутиться неровно, будет вибрировать и «бить» по опоре. Эти проблемы возникают из-за того, что масса колеса распределена неравномерно относительно центра и оно ведет себя так, как будто где-то внутри него находится дополнительная масса. Подвешенный при балансировке грузик уравнивает эту дополнительную массу, и оно начинает крутиться более равномерно.

Один из способов балансировки — уложить колесо на стенд (наклоняющийся столик с пузырьковым уровнем). Систему «колесо — стенд» можно сравнить с детскими качелями, представляющими собой доску с опорой в центре. Столик, как и качели, будет наклоняться в ту сторону, где находится большая масса. Дополнительный балансировочный грузик (обычно

свинцовый) надо прикрепить на противоположной, то есть более легкой стороне колеса и уменьшать его (например, обрезать) до тех пор, пока стенд не выровняется. Увидеть это можно по уровню — пузырек переместится в центр шкалы. Этот способ называется *статической балансировкой*.

При *динамической балансировке* колесо закручивается в горизонтальной плоскости вокруг центра. Лишняя масса с одной стороны колеса заставляет колесо «бить», но, если прикрепить грузик на обод и правильно его подобрать, биения колеса прекращаются.

Эквивалентны ли эти способы балансировки? То есть прекращают ли оба способа и вибрацию, и биения?

**ОТВЕТ •** Способы балансировки не эквивалентны. Статическая балансировка убирает биения, а динамическая — вибрацию. Хотя балансировочные грузики могут быть подвешены в одном и том же месте, подбирать их нужно по-разному.

Чтобы понять разницу, рассмотрим сначала статическую балансировку. Лишний вес с одной стороны создает вращательный момент, который стремится повернуть колесо вокруг центра в некотором направлении. Величина момента зависит от величины лишней массы и от ее расстояния (по горизонтали) от центра. Балансировочный грузик создает противоположно направленный момент. Поскольку он должен крепиться на ободе, его расстояние до центра фиксировано. Чтобы сбалансировать оба момента, нужно начать с большого веса грузика, а потом уменьшать его до тех пор, пока моменты не уравновесятся. Когда колесо поставят на автомобиль, оно уже не будет «бить» по оси.

Вибрация зависит от того, насколько глубоко внутри колеса находится место, где сосредоточена лишняя масса. Опять будем считать, что колесо расположено горизонтально. Вращаясь равномерно, оно должно вращаться вокруг вертикальной оси, проходящей через центр колеса. Однако лишняя масса, находящаяся где-то в глубине колеса, приводит к тому, что колесо начинает крутиться вокруг оси, отклоненной от вертикали, вибрируя при этом. Чтобы выправить положение оси, балансировочный грузик, как и в первом случае, нужно поместить на ободе, но он будет уже другого размера и, вообще говоря, может помещаться и в другом месте обода. Хотя эта процедура убирает вибрацию, она может не убрать дисбаланс крутящих моментов, и кое-какие биения могут продолжаться, но обычно они уже малы. Поэтому

считается, что второй метод — динамическая балансировка — более предпочтительный.

### 1.176 • ИГРА «ПОПАДИ В БУТЫЛОЧКУ»

На ярмарке можно наткнуться на аттракцион, где предлагается сбить бутылку гирькой, висящей на уровне бутылки и качающейся как маятник. Владелец объясняет правила игры: вы не имеете права сбить бутылку, направив гирьку прямо на нее, а должны использовать обратное движение гирьки. Кажется, не очень трудная задача, и чуть-чуть потренировавшись, вы справитесь с ней, не так ли?

**ОТВЕТ •** Эта игра — обычное жульничество, поскольку если гирька обогнет бутылку при первом движении вперед, она и дальше всегда будет промахиваться. Для того чтобы сбить бутылку на пути назад, гирька должна изменить свой угловой момент, а момента сил, который мог бы вызвать это изменение, нет. Однако можно схитрить и закрутить нитку, на которой висит гирька, перед тем как ее отпустить. Тогда летящая гирька будет крутиться вокруг своего центра и на нее будет действовать сила сопротивления воздуха, подобная той, которая возникает при полете закрученного мяча в бейсболе. Эта сила может изменить траекторию движения гирьки назад, и тогда есть шансы сбить бутылку. (Но если хозяин аттракциона заметит это, он рассердится так, что мало не покажется.)

### 1.177 • РАЗОБЬЕТСЯ ИЛИ НЕ РАЗОБЬЕТСЯ БОКАЛ?

С помощью метровой веревки свяжите стеклянный бокал или какой-нибудь другой тяжелый предмет с маленьким и легким, например с ластиком. Возьмите карандаш, держа его горизонтально, перекиньте через него веревку и тяните легкий предмет вправо или влево относительно себя до тех пор, пока бокал не окажется под карандашом, а легкий предмет — в той же горизонтальной плоскости, что и карандаш. Что будет, если вы отпустите легкий предмет? Я знаю, глупый вопрос. Тяжелый бокал потянет веревку (а та за собой потянет и легкий предмет), веревка заскользит по карандашу, и в конце концов бокал упадет на пол и разобьется. Правильно?

**ОТВЕТ •** Когда вы отпустите легкий предмет, он начнет падать, но одновременно его потянет к карандашу перекинутая через него веревка, поскольку она другим концом привязана к тяжелому бокалу, а он тоже начнет падать. Это совместное действие двух сил приведет

к тому, что легкий предмет начнет вращаться вокруг карандаша по орбите с уменьшающимся радиусом. Эта ситуация напоминает фигуриста, при вращении прижимающего руки к телу, в результате чего его угловая скорость возрастает, поскольку момент импульса должен сохраняться. И здесь тоже момент импульса должен сохраниться, так как нет внешних сил, которые могли бы его изменить. Поэтому при вращении по кругу с уменьшающимся радиусом угловая скорость легкого предмета возрастает, а это увеличивает натяжение веревки и замедляет падение бокала. Когда легкий предмет сделает несколько оборотов вокруг карандаша, сила трения веревки о карандаш окажется достаточной для того, чтобы удержать бокал от падения.

### 1.178 • ПОЧЕМУ СЛОМАЕТСЯ СВЕРЛО?

Если опустить быстро крутящееся сверло на рабочую поверхность, оно сломается. Почему?

**ОТВЕТ** • Кончик сверла не вполне симметричен, и поэтому силы, действующие на него, стремятся слегка изогнуть сверло. Если скорость вращения больше некоторой критической, небольшое искривление быстро увеличится до такой степени, что сверло сломается.

### 1.179 • КАЧАЮЩИЕСЯ ЧАСЫ

Карманные часы с крышкой были когда-то очень популярны, но они показывали правильное время, только когда их носили в кармане. Когда же они просто висели на цепочке, то могли убежать вперед или отстать минут на десять за день и, кроме того, раскачивались из стороны в сторону, как маятник. Один исследователь описал, как странно выглядела стена, на которой висело множество часов, весело раскачивающихся на своих цепочках. Как объяснить такое легкомысленное поведение карманных часов?

**ОТВЕТ** • Если частота колебаний балансирующего колеса (балансир — часть часового механизма) близка к собственной частоте маятниковых колебаний часов на цепочке, колебания маятника подстраиваются под колебания балансира. Однако сдвиг фазы между колебаниями балансира и колебаниями маятника часов на цепочке зависит от того, выше или ниже частота колебаний балансира, чем частота собственных колебаний часов. Когда частота колебаний балансира слегка ниже частоты собственных колебаний, то часы спешат. При обратном соотношении они отстают.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 1.180 • МОСТ «ЗОЛОТЫЕ ВОРОТА»\*: ИСПЫТАНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ

В 1987 году в Сан-Франциско праздновали 50-летний юбилей моста «Золотые Ворота». Движение перекрыли, и на мост хлынул поток пешеходов. Никто и представить себе не мог, что такое количество людей решит прогуляться в этот день по мосту: в какой-то момент по нему шло 250 000 человек. Под тяжестью толпы центральный пролет моста, в обычное время имеющий вид арки, стал более плоским. Некоторые его тросы ослабли, а сам мост начал раскачиваться из стороны в сторону (как мост «Миллениум» в 2001 году). Этот праздник стал незапланированной проверкой конструкции знаменитого моста на прочность. К счастью, мост это испытание выдержал.

### 1.181 • РЫСКАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ

Традиционно внешняя часть железнодорожных колес имеет форму конуса, а для того, чтобы они не соскакивали с рельсов, с внутренней стороны у них имеются выступы — реборды. Правое и левое колесо соединены осью и образуют вагонную пару. У рельсов скругленная верхняя часть, и они обычно слегка наклонены внутрь. Почему, когда поезд катится по ровному пути, вагоны качаются из стороны в сторону, или *рыскают*?

Рыскание не только уменьшает скорость поезда, но и создает усилия, стремящиеся искривить рельсы и шпалы, а также действующие на колеса. Поскольку результирующий износ колес неодинаков с левой и правой стороны, вагоны, которые тащит локомотив, время от времени переворачивают, чтобы сделать износ с обеих сторон более равномерным.

**ОТВЕТ** • Если вагон случайно сдвинется, скажем, вправо, то из-за скошенного профиля каждого колеса правое колесо поднимается, начиная двигаться по большему радиусу, а левое, соответственно, опускается, двигаясь по меньшему радиусу. Поскольку колеса

\* Знаменитый висячий мост над проливом Золотые Ворота строили с 1933 по 1937 год. Его торжественное открытие состоялось 27 мая 1937 года в Сан-Франциско. Это выдающееся инженерное сооружение и одна из достопримечательностей Калифорнии. *Прим. ред.*



жестко связаны друг с другом, они поворачиваются с одной угловой скоростью, но разница в радиусах поворота означает, что за то же время колесо справа проезжает больший путь по рельсу, чем колесо слева. Это позволяет колесной паре пройти поворот, когда колеса движутся по дугам разной длины. Но на ровном участке разница в линейной скорости колес перекашивает колесную ось, вагон оказывается в скрученном состоянии, при этом возникают силы, смещающие вагон влево до тех пор, пока он не окажется слева от центра. И тогда ситуация поменяется на зеркальную. Если колебания продолжатся, поезд, как говорят, будет рыскать, то есть пытаться найти устойчивое положение.

Рыскание может вызвать случайное отклонение, но оно может возникнуть и из-за сил трения при искривлении рельсов и колес под действием веса вагона. Если скорость поезда меньше какой-то критической величины, колебания из-за случайного отклонения быстро затухают. Но если скорость выше, они нарастают, и только реборды могут помешать поезду сойти с рельсов.

### 1.182 • КОЛЕБАНИЯ АНТЕННЫ АВТОМОБИЛЯ

Некоторые типы вертикальных антенн автомобиля на ходу могут начать колебаться. Почему при низких и средних скоростях антенна будет колебаться так, как показано на рис. 1.54а, а при более высоких скоростях так, как на рис. 1.54б?

**ОТВЕТ •** Если мы установим антенну в тиски и заставим ее колебаться, она начнет колебаться в так называемых *резонансных модах* (типах колебаний) на *резонансных частотах*. Когда колебания устанавливаются на одной из резонансных частот, мы говорим об установлении резонанса. Простейший тип резонансных колебаний называется *фундаментальной модой* (основным тоном), и он соответствует наименьшей резонансной частоте (рис. 1.54а). В этой моде основание антенны не движется (поскольку оно закреплено), вершина отклоняется максимально, а промежуточные точки отклоняются на промежуточные расстояния. Следующая по сложности мода — *первый обертон*, когда есть еще одна точка (узел), которая не колеблется, она находится на некотором расстоянии от вершины (рис. 1.54б). Когда антенна установлена на движущейся машине, встречные потоки воздуха образуют на задней части антенны вихри, и перепады давления в этих вихрях заставляют антенну колебаться. При низких

и средних скоростях автомобиля (когда вихрей нет) в антенне устанавливается *фундаментальная мода*. При больших скоростях, когда возникают вихри, в антенне возбуждается *первый обертон*.

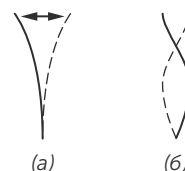


Рис. 1.54 / Задача 1.182. Колебания антенны автомобиля при маленькой скорости (а) и большой скорости (б).

### 1.183 • КОРАБЛИ И УСПОКОИТЕЛЬНЫЕ ЦИСТЕРНЫ

Во время качки на корабле всегда некомфортно, но если волны бьются о борт с частотой, совпадающей с собственной частотой корабля, качка может усилиться и стать опасной. (Такое совпадение частот — пример *резонанса*. Похожее усиление колебаний происходит, когда вы подталкиваете качели каждый раз, когда они пролетают мимо вас.) В прошлом, чтобы уменьшить опасность раскачки, на некоторых кораблях в корпус по всей ширине встраивались так называемые *успокоительные цистерны*, которые заполнялись водой. Размеры цистерн выбирались так, чтобы собственная частота воды в них совпадала с резонансной частотой колебаний корабля. Правильно ли это, ведь при совпадении частот колебания воды в цистерне могут только усилить качку?

**ОТВЕТ •** Предположим, волны бьются о правый борт судна с собственной частотой корабля, но из-за большой массы он качнется не сразу после удара волны, а с задержкой примерно на четверть полного периода качания влево-вправо. А колебания воды в цистерне отстанут от качания корабля еще на четверть периода, а от периодических ударов волн о борт — уже на половину периода. Поэтому, когда волна будет пытаться наклонить судно влево, плещущаяся в цистерне вода будет пытаться наклонить его вправо, так что оно останется стоять вертикально.

Такие успокоительные цистерны в начале прошлого века устанавливались в основном на немецких судах. Хотя при регулярном волнении на море они хорошо справлялись со своей задачей, при хаотическом волновом движении зачастую были бесполезны, а в некоторых случаях даже усиливали качку.

### 1.184 • НЕРОВНОСТИ НА ДОРОГАХ

Новые грунтовые дороги изначально, как правило, ровные, но довольно скоро колеса автомобилей образуют на них поперечный рельеф в виде гребней и впадин, отстоящих друг от друга на расстоянии от 0,5 до 1 м. Этот повторяющийся рисунок, в отличие от случайных выбоин, не объясняется эрозией, вызванной погодными условиями. Такие же рельефы можно увидеть и на горнолыжных трассах. Какова же причина образования такого рельефа? Почему рельеф не исчезает, а дорога снова не выравнивается, когда колеса автомобилей надавливают на гребни?

**ОТВЕТ** • Рельеф появляется, как только на гладкой поначалу поверхности дороги возникает неровность. Когда колеса на большой скорости наезжают на нее, они подсакивают, а приземляясь, слегка проминают поверхность. Даже если колесо и не отрывается от поверхности дороги, при попытке подскочить его давление на дорогу на мгновение уменьшается, а затем колесо «отрабатывает» и еще сильнее вдавливается в дорогу. В тот момент, когда колеса сильнее давят на дорогу, они проделывают в поверхности ухаб, из которого должны выбраться наверх, то есть опять подскочить. Когда следующие машины поедут по этой дороге, рельеф станет еще более выраженным и распространится по дороге дальше.

### 1.185 • ПОЧЕМУ НАМ ВИДНА ТОЛЬКО ОДНА СТОРОНА ЛУНЫ?

Мы видим только одну сторону Луны, причем эта картинка слегка видоизменяется. Но раз Луна вращается вокруг Земли, разве мы не должны видеть всю ее поверхность?

**ОТВЕТ** • Сила притяжения Земли меняется с изменением расстояния от нее. Это означает, что притяжение на противоположной стороне Луны слабее, чем на стороне, обращенной к Земле. Эта разница вызывает небольшие выпуклости на поверхности Луны из-за приливного эффекта (одну на дальней стороне, другую на ближней), так что Луна — не идеальная сфера. С помощью этих выпуклостей поле тяготения Земли синхронизирует вращение Луны вокруг собственной оси с ее вращением вокруг Земли. При вращении Луны вышеупомянутые выпуклости «бегут» по ее поверхности, в результате часть механической энергии ее вращения превращается в тепло, а вращение замедляется. Поэтому Луна всегда показывает нам только свое лицо (иногда чуть меняющееся). Многие

естественные спутники в Солнечной системе также поворачиваются к планете, вокруг которой вращаются, лишь одной своей стороной.

### 1.186 • ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ

Когда в определенном районе Земли нужно постоянно контролировать происходящее, этот район фотографируется с искусственных спутников. Они запускаются с таким расчетом, что, когда один спутник перестает видеть нужный район, следующий как раз начинает его видеть. Аналогичный способ применяется для космической связи. Не проще ли «повесить» над интересующим нас местом один спутник, чтобы он вращался по орбите с той же скоростью, с которой вращается вокруг земной оси данное место? Эта стратегия на первый взгляд кажется предпочтительнее, но для большинства районов Земли она неосуществима. Почему нельзя «повесить» спутник над большинством мест на Земле и где это как раз можно сделать?

**ОТВЕТ** • Вращающийся вокруг Земли спутник удерживается на орбите благодаря силе притяжения Земли. Эта сила направлена всегда на центр Земли, и, соответственно, спутник всегда будет вращаться вокруг этого центра. И из-за этого спутник не может висеть, скажем, над Нью-Йорком, поскольку тогда он должен был бы вращаться не вокруг центра Земли, а в плоскости, параллельной экваториальной, но расположенной в Северном полушарии. Однако если спутник вращается по геостационарной орбите (на которой его угловая скорость совпадает с угловой скоростью вращения Земли вокруг своей оси, причем эта орбита находится в экваториальной плоскости), он висит над какой-либо точкой экватора. Для этого спутник должен находиться на определенной высоте (36 000 км). Такой спутник называется геостационарным спутником. Орбиты других искусственных спутников наклонены к экваториальной плоскости, и фотографировать эти спутники будут те точки земной поверхности, которые окажутся под ними в данный момент времени.

### 1.187 • КАК СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА УСКОРЯЕТ СПУТНИК

Большинство спутников вращается вокруг Земли по орбитам, находящимся там, где сопротивление воздуха хоть и мало, но все же существует. И оно должно замедлять движение спутника так же, как сопротивление воздуха (вместе с трением о дорогу) постепенно останавливает катящуюся по инерции машину! Однако

в случае со спутником все наоборот — сопротивление лишь ускоряет его движение. Как же тормозящая сила может ускорять спутник и тем самым увеличивать его кинетическую энергию?

**ОТВЕТ** • Сопротивление воздуха уменьшает полную энергию спутника, которая состоит из его потенциальной и кинетической энергии, так что спутник постепенно переходит на все более низкие орбиты. При этом потенциальная энергия спутника уменьшается, но только половина этой энергии переходит в тепловую, выделяемую при трении о воздух. Вторая половина переходит в кинетическую энергию, и, так как новая орбита имеет меньший радиус, скорость спутника обязательно возрастет. Если задуматься, результат не такой уж неожиданный — ведь при падении предметов на Землю их скорость возрастает.

#### 1.188 • ПОЛЕТ К ЛУНЕ «ПО ВОСЬМЕРКЕ»

Когда космический корабль должен облететь Луну (и вернуться на Землю), почему его запускают не по эллиптической траектории, а по траектории, имеющей форму неправильной восьмерки?

**ОТВЕТ** • Для полета «по восьмерке» требуется меньше энергии, поскольку большую часть пути корабль остается близ линии, соединяющей центры Земли и Луны. Вдоль этой линии притяжения Земли и Луны направлены в противоположные стороны и суммарная сила, действующая на корабль, меньше, чем на эллиптической орбите. Поэтому для преодоления этой результирующей силы требуется меньше энергии.

#### 1.189 • КТО СИЛЬНЕЕ ПРИТЯГИВАЕТ ЛУНУ — ЗЕМЛЯ ИЛИ СОЛНЦЕ?

Луна вращается вокруг Земли, значит, к Земле она притягивается сильнее, чем к Солнцу, верно? На самом деле нет: Солнце притягивает ее вдвое сильнее, чем Земля. Так почему же мы до сих пор не лишились Луны?

**ОТВЕТ** • Притяжение со стороны Солнца в действительности определяет движение Луны — она вместе с Землей вращается вокруг Солнца. Притяжение Земли создает лишь «небольшое» возмущение, которое приводит к появлению петель на лунной траектории — вращению вокруг Земли. Про движение Луны правильнее будет сказать: «Луна вращается вокруг Земли, и вместе с ней — вокруг Солнца».

#### 1.190 • ГРАВИТАЦИОННАЯ ПРАЩА

Когда космический корабль приблизится на достаточное расстояние к планете, его кинетическая энергия может возрасти благодаря эффекту гравитационного маневра, или гравитационной пращи. Но правильно ли это? Представим себе, что мы следим за кораблем с планеты. Когда корабль приближается к ней, его кинетическая энергия, безусловно, должна увеличиться из-за того, что он притягивается к планете. Но не обнулится ли эта дополнительная энергия, когда он начнет удаляться от планеты?

**ОТВЕТ** • Все зависит от того, где вы находитесь. Планета, к которой приближается корабль, движется. Наблюдателю, находящемуся на ней, кажется, что в результате всего маневра корабль не получил дополнительной энергии. Но представьте себе наблюдателя, покоящегося относительно Солнца. Этот наблюдатель увидит, что корабль притягивается к планете. Если корабль подлетит к планете, движущейся по орбите, со стороны «кормы», планета протащит его за собой по орбите, то есть корабль получит прибавку к энергии. Сама планета потеряет такое же количество энергии, но не заметит этого, поскольку ее масса велика, а прибавка к энергии корабля вполне ощутима из-за того, что у него маленькая масса.

#### 1.191 • СОСТАВЛЕНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ КАРТЫ ИНДИИ

Когда в Индии только начали проводить геодезическую съемку, измерения оказывались слегка неточными из-за того, что отвесы висели не вполне вертикально, особенно на севере Индии. Почему это звучит правдоподобно?

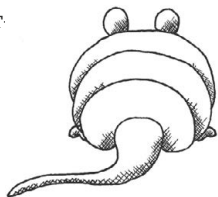
**ОТВЕТ** • Грузик, подвешенный к отвесу, притягивался к Гималаям из-за большой их массы и поэтому отклонялся от вертикали на несколько угловых секунд. И в других районах Земли неравномерное распределение масс по поверхности может вызывать похожие погрешности.

#### 1.192 • БРИТЬЕ ДВОЙНЫМ ЛЕЗВИЕМ

Есть ли оптимальная скорость движения бритвы с двойным лезвием при бритье? Или такой бритвой нужно водить по коже как можно быстрее или как можно медленнее?

**ОТВЕТ** • Когда первое лезвие натывается на волосок, оно сгибает его, протаскивает по коже за собой, стараясь при этом вытянуть корешок волоска из кожи вверх. В какой-то момент первое лезвие срезает часть волоска, который торчал из кожи с самого начала.

Оставшаяся часть волоска отскакивает назад, принимает прежнее положение, а затем начинает втягиваться обратно в кожу. Если второе лезвие поймает волосок после того, как он уже отскочил, но до того, как втянулся, это лезвие может отрезать еще кусочек от волоска и тем самым отдалить следующее бритье. Чтобы побриться чисто, бритва должна двигаться не слишком быстро, иначе волоски не успеют отскочить назад, но и не слишком медленно, чтобы они не успели втянуться обратно в кожу. Оптимальная скорость 4 см/с, но она может варьироваться в зависимости от свойств (особенно упругости) кожи и волос конкретного человека.



### 1.193 • РАЗМЫВ БЕРЕГОВ РЕК

Есть свидетельства того, что в Северном полушарии в среднем правые берега реки подмываются больше, чем левые, а в Южном полушарии — наоборот. Хотя этот эффект мал и замаскирован другими факторами, почему он может иметь место?

**ОТВЕТ** • Вращение Земли может вызвать небольшие отклонения потоков воды в реках из-за действующей на них кориолисовой силы — вправо в Северном полушарии и влево — в Южном. Однако эти отклонения становятся вполне заметными при движениях больших масс (или движении с высокой скоростью), например при движении воздушных потоков, которые в Северном полушарии закручиваются против часовой стрелки во время ураганов. Потоки воды в больших реках, например в Миссисипи, тоже могут заметно отклоняться под действием кориолисовой силы. При этом образуется циркуляция воды в поперечной к направлению течения реки плоскости, которая и подмывает берег. Эффект наиболее силен при протекании реки по меридиану, ослабляется при отклонении от этого направления и исчезает при протекании по параллели.

## Глава 2

# Механика жидкостей и газов

## Гонки по потолку, плавание в сиропе

### 2.1 • ГОНОЧНЫЙ АВТОМОБИЛЬ НА ПОТОЛКЕ

Чтобы машина, участвующая в автогонках класса Гран-при, оставалась в вираже при плоском повороте, необходимо трение. Но если машина движется слишком быстро, трение подводит и машина вылетает с трассы. Раньше гонщикам приходилось проходить плоский поворот достаточно медленно. Но современные гоночные машины спроектированы иначе: машина буквально вдавливается в трассу, что обеспечивает хорошее сцепление шин с дорогой. Говорят, что в этом случае действует *отрицательная подъемная сила*. Она настолько сильна, что некоторые водители утверждают: если потолок длинный, они могут вести машину даже вверх ногами. В чем причина появления отрицательной подъемной силы и может ли реальная гоночная машина ездить вверх ногами, как вымышленный седан из первой серии фильма «Люди в черном»?\* На отрицательную подъемную силу можно положиться, когда только одна машина совершает поворот, как, скажем, при одиночном заезде на скорость. Но опытный водитель знает, что по ходу гонки отрицательная подъемная сила может исчезнуть. В чем тут причина?

**ОТВЕТ** • В основном отрицательная подъемная сила, до 70%, связана с крыльями машины, направляющими вверх поток воздуха. Остальные 30% обеспечивает

\* «Люди в черном» — американская фантастическая комедия (1997 год), рассказывающая о деятельности секретных агентов, наблюдающих за поведением инопланетян на Земле. *Прим. пер.*

так называемый *эффект земной подушки*, связанный с потоком воздуха под днищем автомобиля. Чем быстрее движется автомобиль, тем эффективнее эти механизмы. При высоких скоростях, как на гонках «Формулы-1», отрицательная подъемная сила превышает действующую на автомобиль гравитационную силу. Но это значит, что, если бы автомобилю удалось, не сбавляя скорости, перебраться с гоночного трека на потолок, отрицательная подъемная сила, направленная теперь вверх, с запасом компенсировала бы направленную вниз силу гравитации. Так что машина и в самом деле могла бы двигаться вверх ногами, как в фильме «Люди в черном».



Рис. 2.1 / Задача 2.1

Эффект земной подушки связан с прохождением потока воздуха под днищем автомобиля. Когда воздух сжат в небольшом пространстве под машиной, его



скорость увеличивается, а давление, согласно уравнению Бернулли, понижается. Значит, давление воздуха под машиной меньше, чем над ней, и эта разность давлений прижимает машину к треку. Во время гонки водитель может уменьшить тормозящее сопротивление воздуха, следуя вплотную за другой машиной. Это называется *создать тягу*. Однако машина-лидер нарушает установившийся поток воздуха и под преследующей ее машиной, ослабляя эффект земной подушки. Если водитель, преследующий лидера, не учтет этого и не снизит скорость, столкновение с ограждением трассы ему гарантировано.

«Чапarrаль 2J» — одна из ранних моделей гоночных машин, которая использовала эффект земной подушки. В задней части у нее имелись два вентилятора, которые откачивали воздух, попадавший под автомобиль через зазор между его днищем и дорогой. С двух сторон низ кузова был окружен «юбками», почти касавшимися дороги и затруднявшими попадание воздуха сбоку в поток под днищем. Низкое давление под машиной удерживало ее на треке при быстрых поворотах, к тому же выходящий из вентиляторов воздух препятствовал образованию вертикальных вихрей позади машины, уменьшая аэродинамическое сопротивление при движении. В результате машина достаточно быстро ехала по прямым участкам трассы, а на поворотах ей просто не было равных. Эта машина была настолько хороша, что ей было запрещено участвовать в гонках.

## 2.2 • СИЛА ТЯГИ

Часто гонщики пытаются воспользоваться преимуществами езды за лидером, пристраиваясь почти вплотную к двигающейся впереди машине. Понятно, что это опасно. Но что можно от этого выиграть?

**ОТВЕТ •** Хотя при проектировании гоночных машин учитываются законы аэродинамики, значительное сопротивление со стороны воздушного потока остается. Одна из причин аэродинамического сопротивления — разность давлений между передней и задней частями машины. Набегающий спереди поток воздуха создает область высокого давления. Сзади поток воздуха распадается на вихри, уменьшающие давление. Эта разность давлений замедляет движение автомобиля и увеличивает затраты топлива на поддержание высокой скорости.

Когда машины едут друг за другом, выигрывают обе. Замыкающая машина препятствует формированию вихрей позади лидера, что уменьшает разность

давлений между капотом и задней частью его машины. Уменьшается и напор воздуха на капот машины, идущей за лидером, так что и для нее эта разность давлений меньше.

Водитель идущей сзади машины может обойти лидера, используя маневр, который называют *rogatka*: он должен немного отстать от передней машины, чтобы позади нее образовались вихри. Вихри низкого давления замедляют переднюю машину, а задняя машина устремляется вперед. Тщательно рассчитав время, водитель задней машины может обехать лидера и вырваться вперед.

Говорят, Джонсон-младший\* в 1960 году первым использовал аэродинамические эффекты во время гонки «Дайтона 500», проводимой Национальной ассоциацией гонок серийных автомобилей (NASCAR). Он выиграл эти гонки, хотя считалось, что по скорости его машина уступает машинам остальных участников.

Создание тяги существенно и в других видах спорта, особенно в велогонках. Животные тоже используют силу тяги. Пример: мама-утка переплывает пруд впереди выстроившихся за ней в цепочку утят. Конечно, утка двигается не столь быстро, чтобы заботиться об аэродинамике, но выигрывают утята, плывущие вслед за мамой-уткой.

## 2.3 • АЭРОДИНАМИКА НЕСУЩИХСЯ МИМО ПОЕЗДОВ

Скоростные поезда, несущиеся со скоростью свыше 270 км/ч, разрезают воздух и создают волны сжатия, благодаря чему образуются потоки воздуха, обтекающие поезд с боков и сверху. Что происходит, когда такой поезд проскакивает через тоннель? А что бывает, когда два скоростных поезда проносятся по соседним путям в разных направлениях? Представляет ли скоростной поезд, идущий без остановок, опасность для человека, стоящего на краю платформы?

**ОТВЕТ •** Описать, как поезд на большой скорости проезжает через тоннель, проще, полагая, что поезд покоится, а воздух вокруг него движется. Когда воздух нагнетается в ограниченное пространство между поездом и стенками тоннеля, его скорость увеличивается. На увеличение скорости требуется энергия, источником которой является запасенная внутренняя энергия,

\* Роберт Глен Джонсон (Джонсон-младший) — пилот NASCAR в 1955–1966 годах. За свою карьеру выиграл 50 гонок.

зависящая от давления. Следовательно, давление падает. Пассажир поезда ощущает это падение давления: воздух в ушах давит изнутри на барабанную перепонку. Подобное ощущение испытываешь в быстро взлетающем самолете.

Когда встречаются два поезда, несущиеся навстречу друг другу, давление воздуха между ними тоже понижается. Если это происходит внутри тоннеля, давление падает еще больше. В прежние времена случалось, что при увеличении скорости разъезжавшихся встречных поездов их окна выдавливали наружу.

Неважно, едут ли поезда через тоннель или по открытой местности, структура обтекающих их потоков воздуха очень сложна. Описать ее можно, только используя компьютерное моделирование. Однако понижение давления в пространстве между поездами можно объяснить достаточно просто: каждый из поездов «вытягивает» оттуда воздух, а когда воздуха меньше, давление понижается.

Когда проезжает скоростной поезд, волна сжатия, распространяющаяся впереди поезда, и сильно турбулентный воздушный поток за ним могут сбить с ног человека, стоящего на платформе, или даже бросить его на рельсы.

## 2.4 • ОБРУШЕНИЕ СТАРОГО МОСТА ЧЕРЕЗ ТАКОМА-НЭРРОУЗ\*

Седьмого ноября 1941 года на пленку был снят один из самых впечатляющих документальных фильмов, который часто показывают физикам. Речь идет о разрушении старого моста через Такома-Нэрроуз. Хотя ветер в то утро был не таким уж сильным (около 68 км/ч), этот прочный мост разорвало на части через несколько часов после того, как начались сильные крутильные колебания.

Поскольку мост часто изгибался, становясь похожим на американские горки, строители окрестили его «Галопирующая Герти». Что и говорить, после официального открытия моста автомобилисты съезжались сюда ради острых ощущений: колебания иногда были такой силы, что водители теряли друг друга из виду. Хотя многие считали, что мост развалился именно из-за «галопирования», оно практически не было связано с его обрушением. Что же на самом деле вызвало крушение моста?

---

\* Такома-Нэрроуз — узкое место залива вблизи города Такома (штат Вашингтон) на тихоокеанском побережье. Мост через Такома-Нэрроуз был подвесным. *Прим. пер.*

**ОТВЕТ** • Опоры моста имели форму узкой и высокой буквы Н с армирующей балкой вдоль каждой из сторон. При ветре воздушный поток, налетающий на мост с наветренной стороны, приводил к образованию вихрей сверху и снизу горизонтальных секций моста. Распространяясь вдоль горизонтальных секций, эти вихри становились причиной вибрации моста: его вертикальные колебания напоминали развевающийся на ветру флаг. Ошибочной была сама конструкция моста (хотя тогда этого никто знать не мог), имевшая плохую сопротивляемость как вибрациям, так и крутильным колебаниям (скручиванию). Это отчетливо видно на киноплёнке, запечатлевшей обрушение моста.

После того как колебания стали очень сильными и опасными, два человека были вынуждены на четвереньках уползти с моста. Один из них, профессор, попытался спасти брошенную на мосту собаку, но ему пришлось отступить: перепуганная собака попыталась его укусить. На плёнке видно, как он возвращается к машине, стараясь двигаться по области малых колебаний, вдоль линии на оси моста, вокруг которой он скручивался. Вскоре после этого одна из секций моста упала. Вибрации прекратились, но затем возобновились снова, и оставшиеся пролеты моста рухнули в реку.

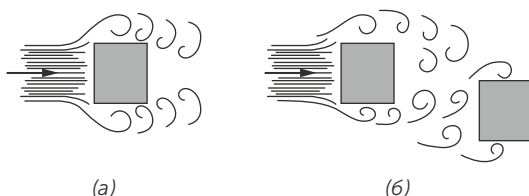
Хотя многие преподаватели физики используют разрушение этого моста как впечатляющий пример резонанса, оно не связано ни с резонансом, ни с галопированием. Обрушение стало следствием вибраций и кручений. На самом деле причиной был ветер. Его направление практически не менялось, не было порывов ветра с частотой, близкой к собственной частоте колебаний моста. Вокруг моста действительно были завихрения (вихри Кармана), сродни вихрям вокруг телеграфного провода при ветре. Такие вихри могут вызвать сильные колебания, если частота, при которой они появляются, совпадает с собственной частотой колебаний провода. Нарастание амплитуды колебаний происходило из-за положительной обратной связи: при смещении полотна моста сила давления ветра на него возрастала. В авиации этот эффект называется «флаттер».

## 2.5 • АЭРОДИНАМИКА СТРОЕНИЙ

Почему в ветреный день особенно достается людям, идущим вблизи зданий? Почему, если вам требуется находиться около здания, но не хочется испытывать на себе порывы ветра, вам лучше стоять? Почему строения раскачиваются на ветру? У некоторых зданий имеются арки на уровне земли, предназначенные

либо для проезда машин, либо для пешеходов. Почему ветер там особенно сильный?

**ОТВЕТ •** Воздушный поток, огибая углы зданий, разбивается на вихри, или воронки (см. рис. 2.2а). Поэтому идущий по тротуару пешеход чувствует ветер сильнее всего либо вблизи угла здания, либо сразу после поворота. Позади здания ветер самый слабый. Там может быть относительно спокойно. За домом давление воздуха, скорее всего, будет ниже, что может стать причиной выдавливания наружу окон. Иногда окна даже вываливаются.



**Рис. 2.2 / Задача 2.5.** а) Воздушный поток разбивается на вихри возле углов здания. б) Особенно ветрено может быть между домами, расположенными в шахматном порядке.

Порывы ветра будут меньше и в том месте с наветренной стороны, где воздушный поток делится на две части, так что одна его часть огибает здание с одной стороны, а другая — с другой.

Если в здании есть сквозной проход, через который может дуть ветер, воздушный поток ускоряется: его затягивает в проход, как в воронку. Отсюда есть два следствия. Во-первых, ветер заставляет пешехода пригнуться или даже может сбить с ног. Во-вторых, давление воздуха в проходе уменьшается, поскольку часть его энергии тратится на увеличение скорости (уравнение Бернулли). Поэтому вдоль прохода окна и двери выгибаются наружу. В некоторых случаях окна даже разбиваются, а двери не удается закрыть.

Когда рядом расположены несколько высоких зданий, картина образования вихрей и структура разделенного воздушного потока оказывается более сложной. Например, если два высотных здания расположены ступенькой по отношению к направлению воздушного потока, область низкого давления с подветренной стороны позади первого здания «оттягивает» воздушный поток с расположенного с наветренной стороны фасада второго здания, приводя к сильному завихрению воздушного потока между зданиями (рис. 2.2б). Другая ситуация: стоящие недалеко друг от друга здания образуют прямоугольник, внутри которого проходит

улица. Тогда улица, параллельная направлению ветра, может фактически стать аэродинамической трубой. Если вы выходите на одну из таких улиц с подветренной стороны здания, вас может сбить с ног. Более того, поскольку воздушный поток втягивается в улицу, как в воронку, давление здесь уменьшается, из-за чего выходящие на улицу окна выдавливаются наружу.

Изменение давления ветра с наветренной стороны здания может вызвать его раскачивание или вибрацию, при этом сильнее всего колеблется верхушка здания. Иногда это вызывает у жильцов чувство тошноты. Тошноту могут вызывать и ультразвуковые или внятно слышимые завывания, источником которых служат вихри, образовавшиеся вблизи углов здания при сильном ветре. Высотные здания, обычно раскачиваемые на сильном ветру, оборудуют различными демфирующими устройствами, гасящими колебания. Например, устанавливают на крыше устройство с блочной пружиной, где тяжелый блок движется в направлении, противоположном движению здания.

Ураганный ветер при тропическом циклоне или торнадо может снести небольшие жилые дома и даже большие здания. Он может сорвать с дома крышу, подцепив ее с наветренного края, а если давление над крышей существенно понижается, ветер вырывает и уносит крышу по кускам. Кроме того, очень сильный ветер может не только вдавить окна внутрь здания с наветренной стороны, но и выдавить их наружу на подветренной стороне или там, где происходит образование вихрей.

## 2.6 • ВОЗДУШНЫЕ ЗМЕИ

Как змей удерживается в воздухе и что определяет его устойчивый полет? Почему полет иногда становится хаотическим, а змей начинает трепыхаться, описывая петлю за петлей?

**ОТВЕТ •** Треугольный змей представляет собой гибкую поверхность, наклоненную под некоторым углом к направлению ветра. Этот угол называют *углом атаки*. На змея действуют четыре силы. 1. Гравитационная сила, которая, конечно, тянет его вниз. 2. Поверхность змея отклоняет воздушный поток, и, следовательно, на него действует направленная вверх *подъемная сила*. 3. Кроме того, тянущее усилие действует в направлении воздушного потока. 4. Бечевка создает силу, действующую вниз и вдоль направления ветра.

Если полет змея нестабилен, вращающий момент этих сил закручивает его вокруг *точки крепления* на уздечке, где основная длинная бечевка разделяется на отдельные нити, идущие к разным точкам на каркасе змея. Вращение меняет угол атаки змея, а следовательно, меняются подъемная сила и сила тяги. В результате змей не только поворачивается, но и поднимается вверх. Движение вверх меняет угол между силой натяжения нити и каркасом в точке крепления, а следовательно, горизонтальную и вертикальную компоненты натяжения бечевки.

Змей летит устойчиво при равенстве нулю трех величин: 1) вращающего момента, 2) равнодействующей всех вертикальных сил и 3) равнодействующей всех горизонтальных сил. Чтобы все эти величины обратились в нуль, змей должен быть не только правильно ориентирован, но также нужно тянуть за бечевку под правильным углом. Когда эти условия соблюдены, говорят, что змей находится в *равновесном состоянии*. При заданной скорости ветра равновесных состояний может быть несколько. Если скорость ветра меняется, чтобы змей оказался в новом равновесном состоянии, следует изменить и ориентацию змея, и угол между бечевкой и каркасом.

## 2.7 • ПРЫЖКИ НА ЛЫЖАХ С ТРАМПИНА

При правильной стойке лыжника, прыгающего с трамплина, он может пролететь около 200 м\*, а если он ошибся, расстояние оказывается гораздо меньше. С чем это связано? Почему некоторые прыжки заканчиваются опасными акробатическими переворотами и как лыжник может их избежать?

**ОТВЕТ •** Длина полета лыжника определяется подъемной силой, действующей на его тело и лыжи. Во время прыжка лыжник с лыжами напоминает букву V, открытую в направлении встречного воздуха. Если прыжок выполняется правильно, лыжник движется по воздуху плавно, как бумажный самолетик. Однако проносящийся мимо воздух представляет серьезную опасность, поскольку благодаря этому потоку подъемная сила, действующая на лыжи спереди, может неожиданно стать больше подъемной силы, действующей сзади. Возникает вращающий момент, переворачивающий лыжника, он теряет контроль над своим положением

\* Мировой рекорд, установленный словенским прыгуном Петером Превецем в 2015 году, составляет 251,5 м. Прим. пер.

и начинает кувыркаться. Приземление в этом случае может оказаться фатальным.

Опытные прыгуны с трамплина знают, как быстро и правильно сориентировать тело и лыжи, чтобы добиться максимальной подъемной силы и сразу начать планировать. Секрет в том, что в конце стола отрыва следует подпрыгнуть вверх. Такой прыжок должен вызвать вращение вперед, обеспечивая верную ориентацию прыгуна и его лыж при спуске, когда лыжник и его лыжи составляют правильный угол относительно движущегося воздуха. Кроме того, лыжник должен выбрать момент толчка так, чтобы вращающий момент стал равен нулю ровно тогда, когда ориентация будет правильной. Все эти маневры абсолютно необходимы: они позволяют выполнить хороший и безопасный прыжок. Однако все не так просто, поскольку необходимо принимать в расчет плотность воздуха, от которой зависит подъемная сила. Если лыжник, приспособившийся к прыжкам на небольшой высоте, попытается совершить прыжок в высокогорных условиях, где плотность воздуха меньше, прыжок может оказаться неудачным.

## 2.8 • СКОРОСТЬ ГОРНОЛЫЖНИКА

Максимальная скорость — мечта всех участников соревнований по скоростному спуску, особенно если цель — побить мировой рекорд скорости, то есть развить скорость выше 240 км/ч\*\*. В этом случае главным препятствием на пути к достижению цели оказывается аэродинамическое сопротивление. Оно, несомненно, более существенно, чем трение лыж о снег. Как горнолыжник может его минимизировать?

**ОТВЕТ •** Вот несколько правил, следуя которым можно уменьшить аэродинамическое сопротивление. Костюм должен плотно облегать тело, а не развеиваться на ветру. Шлем должен быть не только обтекаемой формы, но и прикрывать плечи. Тогда разрывов воздушного потока на плечах или на спине лыжника нет и сзади под шлемом не образуются завихрения. Сталкиваясь с ногами, воздушный поток должен попадать на специальный обтекатель, предназначенный для того, чтобы избежать образования вихрей позади ног. Такие вихри являются областями низкого давления. А значит, если перед ногами давление высокое, а за ними низкое,

\*\* Мировой рекорд скорости в прямом спуске на горных лыжах, установленный в 2015 году итальянцем Симоне Оригоне, составляет 252,632 км/ч. Прим. пер.

сопротивление за счет разности давлений может оказаться существенным. Лыжные палки надо держать за телом, а не выставлять их навстречу набегающему воздуху. Лыжник слегка приседает, принимает стойку «яйцо», чтобы минимизировать площадь, встречающую набегающий поток.

Одна из сложностей при скоростном спуске — необходимость удерживать правильное положение ног. Скорость воздуха между бедрами больше скорости с внешней стороны ног. Давление воздушного потока обеспечивает энергию, необходимую для увеличения скорости движения. Поэтому давление между бедрами лыжника меньше, чем снаружи, и они норовят сомкнуться. Лыжнику все время приходится с этим бороться.

## 2.9 • БУМЕРАНГИ

Почему бумеранг всегда возвращается к бросающему? Некоторые бумеранги могут пролететь по замкнутой траектории до 200 м, а некоторые возвращаются назад несколько раз, прежде чем опустятся на землю. При запуске плоскость бумеранга ориентирована почти вертикально. Тогда почему во время полета плоскость бумеранга обычно переходит в горизонтальное положение? Классический бумеранг изогнут и по форме напоминает банан, но бывают и другие формы. Можно ли заставить прямую палку летать как бумеранг?

**ОТВЕТ** • Каждое плечо бумеранга напоминает классическую аэродинамическую поверхность, близкую к форме крыла первых самолетов. Передняя, разрезающая воздух кромка плеча бумеранга скруглена, задняя кромка тоньше передней; его верхняя поверхность изогнута, а нижняя — плоская. Во время полета бумеранга такая аэродинамическая поверхность меняет направление воздушного потока, в результате чего на бумеранг действует подъемная сила в противоположном направлении.

Если вы запускаете бумеранг правой рукой, сначала его надо поднять к голове, держа к себе изогнутой стороной, при этом плоскость бумеранга должна быть слегка отклонена от вертикали вправо. Затем нужно быстро выбросить вперед правую руку, одновременно обхватив ее запястье кистью левой руки. Тогда подъемная сила, действующая на бумеранг, будет направлена вверх и влево от вас. Вертикальная составляющая этой силы обеспечит полет бумеранга.

Величина подъемной силы, действующей на крыло бумеранга, зависит от скорости движения воздуха вблизи плеча бумеранга. Поскольку в каждый данный

момент времени его верхнее плечо поворачивается в направлении движения (туда, куда летит бумеранг), а нижнее плечо в противоположном направлении, подъемная сила, действующая на верхнее плечо, больше.

Так как подъемная сила на верхнем плече направлена вверх, а точка ее приложения находится на некотором расстоянии от центра масс бумеранга, возникает вращающий момент, стремящийся повернуть плоскость бумеранга. Бумеранг крутится, как волчок, а значит, этот момент поворачивает ось, вокруг которой он вращается, по направлению к вам и вы видите большую часть его верхней поверхности. При повороте бумеранга траектория его полета искривляется. Таким образом, бумеранг летит по замкнутой траектории и возвращается назад к вам.

Прямую палку можно заставить играть роль бумеранга, если запустить ее так же, как бумеранг. Начальное вращение вокруг проходящей через центр короткой оси неустойчиво, и ось вращения смещается к длинной оси, направленной вдоль палки. Изменение направления переориентирует палку, но направление, вокруг которого она вращается, не меняется. Во время полета в обратном направлении вращающаяся палка отклоняет воздушный поток вниз, что приводит к появлению подъемной силы.

## 2.10 • БРОСАЕМ КАРТЫ

Выпустите из рук кредитку (или любую другую жесткую карту) так, чтобы ее длинный край был расположен горизонтально и направлен вниз, а лицевая и оборотная стороны смотрели влево и вправо. Почему карта не скользит в воздухе и не падает на пол ровно под тем местом, где ее выпустили? Обычно, показывая этот фокус, игральные карты мечут в открытую коробку. Я использую пластиковую кредитку. Если я бросаю ее случайным образом, она практически сразу начинает колебаться или крутиться в разные стороны, на мгновение зависает, а потом падает на пол. Есть ли возможность стабилизировать полет карты в воздухе так, чтобы было больше шансов попасть в коробку?

**ОТВЕТ** • Описать падение карты, отпущенной длинным концом вниз, очень сложно. Физики пытаются сделать это начиная с 1854 года. Полет карты может быть совсем беспорядочным, но может происходить и так: 1) карта, скользя по воздуху, колеблется и меняет направление скольжения — то влево, то вправо; 2) карта переворачивается, вращаясь вокруг некоторой



оси, и при этом планирует либо влево, либо вправо. Какой из вариантов осуществится, зависит от размера карты. Стандартная игральная карта обычно устойчиво вращается вокруг горизонтальной оси, скользя под некоторым углом к вертикали. В момент, когда отпускают карту, изначально ориентированную вертикально, ее нижний конец отклоняется вправо или влево. Затем, когда карта скользит под некоторым углом к вертикали, обтекающий ее воздушный поток создает области повышенного давления ниже переднего края карты и выше ее заднего края. Эти области высокого давления поворачивают карту вокруг оси, проходящей вдоль карты через ее центр. Когда карта занимает горизонтальное положение, падение замедляется, но вращение продолжается до тех пор, пока она вновь не встанет вертикально. Поскольку при этом скольжение карты облегчается, ее скорость, направленная вниз, увеличивается. И затем все это повторяется.

Чтобы выполнить трюк с бросанием карты, главное — ее стабилизировать, то есть заставить двигаться устойчиво, без дрожания и вращения. Часто это делают так: вы держите карту горизонтально, большой палец лежит на короткой стороне сверху, указательный палец на длинном крае, а средний палец под короткой стороной снизу. Согните запястье так, чтобы карта коснулась основания ладони. Затем, резко выбросив запястье вперед, отпустите карту. Таким образом вы закрутите ее вокруг вертикальной оси. Силы, действующие на карту со стороны воздуха, поворачивают ее, она занимает почти вертикальное положение и вращается вокруг горизонтальной оси. Если бросок выполнен правильно, карта может лететь с высокой скоростью и практически по прямой. Будьте осторожны, не попадите кому-нибудь в глаз.

Некоторые трюкачи столь искусны, что забрасывают игральные карты поверх голов зрителей на балкон или даже заставляют их летать наподобие бумерангов.

## 2.11 • ВРАЩАЮЩИЕСЯ СЕМЕНА

Почему семена ясеня, вяза или клена могут оставаться в воздухе так долго, что даже легкий ветерок относит их далеко от материнского дерева?

**ОТВЕТ •** Семена этих деревьев снабжены крылышками, а падают они медленно, поскольку вращаются. Так, крылатка\* клена вращается вокруг своего центра масс,

\* Крылатка — простой сухой одно- или двусемянный невскрывающийся плод с крыловидными выростами. Прим. пер.

находящегося между выпуклостью (местом, где расположен плод) и плоским участком крылышка. Наклон плоскости крылышка может достигать  $45^\circ$ . Вращающаяся во время падения крылатка заставляет воздух двигаться вниз, и поэтому на нее действует направленная вверх сила. Эта же сила может еще и подталкивать крылатку в сторону, так что к земле она будет двигаться по винтообразной траектории (рис. 2.3).

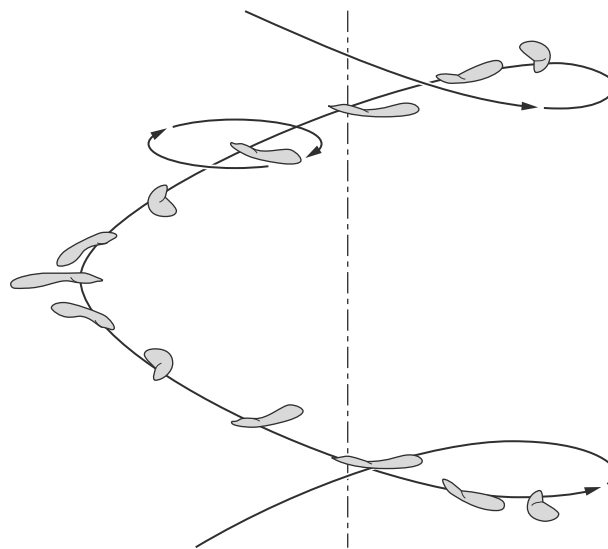


Рис. 2.3 / Задача 2.11. Траектория крылатки, крутящейся против направления основного вращения при движении вдоль винтообразной траектории.

## 2.12 • ЛЕТАЮЩИЕ ЗМЕИ

Если вы боитесь змей, учтите: есть змея, которая всю жизнь будет вам сниться в ночных кошмарах. Райская украшенная змея (*Chrysopelea paradisi*) может взбираться на деревья, прыгать с высоты и, планируя, спускаться на землю. Выбрав новую цель, например другое дерево, она может менять траекторию планирования. Как же этой змее удастся держаться в воздухе и планировать?

**ОТВЕТ •** Свисающая с ветки змея прыгает вверх и вперед. Во время прыжка, когда ее тело распрямляется, туловище от головы и дальше к хвосту уплощается. Кроме того, ближе к хвосту на брюхе змеи образуется нечто вроде плоского желоба с опущенными вниз краями. Средняя часть туловища змеи становится вдвое шире исходного диаметра.

Уплощенная часть туловища змеи служит аэродинамической поверхностью, создающей подъемную силу. Поэтому ее планирование чем-то напоминает полет

бумажного самолетика. Однако, набрав скорость, змея начинает выделять нечто совсем на самолетик не похожее: она принимает S-образную форму, а затем начинает совершать горизонтальные колебания с частотой порядка 1,3 колебания в секунду. Немедленно траектория планирования становится более полой. Это значит, что колебания приводят к увеличению подъемной силы, действующей на змею. Скорость полета змеи порядка 8 м/с, планирует она под углом около  $30^\circ$  и спускается вниз со скоростью около 5 м/с. Она может изменять направление полета, меняя наклон задней части тела или изменяя положение головы, продолжая совершать колебания.

Как подъемная сила связана с колебаниями змеи, не слишком понятно. Однако можно предположить, что при движении влево-вправо вогнутой задней части тела змеи меняется ориентация ее брюха. Если она действительно меняется, когда змея раскачивается то влево, то вправо, это может привести к увеличению подъемной силы.

### 2.13 • АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ ПОЛЕТЕ ТЕННИСНЫХ МЯЧЕЙ

Почему при абсолютно одинаковых ударах теннисный мяч, который уже побывал в игре, обычно достигает принимающего быстрее, чем новый?

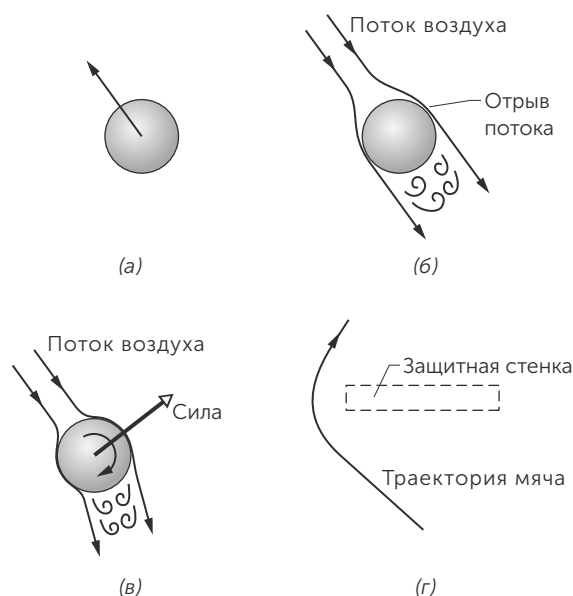
**ОТВЕТ** • Время полета теннисного мяча определяется аэродинамическим сопротивлением. Если взять новый мяч и много раз повторить один и тот же удар (одинаковая начальная скорость и угол подачи), аэродинамическое сопротивление сначала возрастает, а затем постепенно уменьшается до некоторого стабильного значения. По-видимому, это связано с ворсом, пушком на поверхности мяча. В начале игры ворс приподнимается и «улавливает» больше воздуха, увеличивая аэродинамическое сопротивление. Однако постепенно ворс вытирается или сглаживается, и аэродинамическое сопротивление падает. Это значит, что подающий игрок находится в несколько более выгодном положении, играя потрепанным мячом, поскольку мяч испытывает меньшее сопротивление, чем новый, и достигает принимающего за меньшее время, затрудняя ответный удар.

### 2.14 • ФУТБОЛЬНЫЙ МЯЧ, ОГИБАЮЩИЙ СТЕНКУ

Как при свободном ударе футболист посылает мяч таким образом, что он по *искривленной траектории* обгибает стенку из игроков и попадает в ворота? Такой

удар, когда с мячом происходит что-то невероятное, называют *крученым* из-за траектории полета мяча. Он часто застает вратаря врасплох, особенно если из-за стенки тот не видит начало полета мяча.

**ОТВЕТ** • На рис. 2.4а показан летящий мяч в неподвижном воздухе (вид сверху). Если мы движемся вместе с мячом, нас обтекает воздух, как на рис. 2.4б. Если мяч не закручен, воздух с обеих сторон обтекает мяч симметрично, а затем где-то сзади два воздушных потока отрываются от мяча, образуя вихри. Однако, если мяч закручен (скажем, по часовой стрелке, как на рис. 2.4в), воздушные потоки несимметричны. Теперь поток, двигающийся в направлении, противоположном направлению вращения поверхности мяча, распадается на вихри раньше, а поток, двигающийся вместе с вращающейся поверхностью, удерживается ею и отрывается от нее позднее. Представить себе отрывающийся от вращающегося мяча воздушный поток можно, вспомнив, как отбрасывают грязь вращающиеся шины. Поскольку закрученный мяч меняет направление воздушного потока, отлетает он в противоположном направлении. Следовательно, отклонение воздушного потока вращающимся мячом обуславливает изменение направления его полета. Этот эффект обычно называют *эффектом Магнуса* по имени исследовавшего его ученого.



**Рис. 2.4 / Задача 2.14.** а) Полет мяча. б) Картина полета в системе координат, связанной с мячом. в) Вращающийся мяч меняет направление воздушного потока. Мяч отклоняется в сторону. г) Благодаря отклонению мяч обходит стенку и движется к цели.

Предположим, что при выполнении свободного удара мяч отправлен к левому концу защитной стенки и закручен по направлению часовой стрелки (рис. 2.4г). По мячу надо ударить так, чтобы он начал движение под углом  $17^\circ$  по отношению к земле и пролетел на расстоянии вытянутой руки от последнего игрока в стенке. При движении мяча в воздухе его вращение приводит к отклонению воздушного потока влево, а траектория мяча загибается вправо. Если удар выполнен правильно, мяч аккуратно огибает стенку, достать его невозможно и он летит прямо в ворота.

Чудеса, происходящие с мячом после такого удара, связаны еще и с тем, что во время полета его скорость меняется. Аэродинамическое сопротивление при движении мяча во многом определяется тем, что впереди него образуется область высокого давления, а сзади — вихри низкого давления. По мере замедления мяча размер вихревой области меняется: сначала она увеличивается, а затем уменьшается. Аэродинамическое сопротивление тоже сначала увеличивается, а потом уменьшается. Поэтому сначала мяч замедляется быстрее, а затем все медленнее, что может сыграть злую шутку с вратарем.

И в других спортивных играх крученые мячи меняют направление своего полета. Это относится к теннисным мячам, пинг-понговым шарикам и мячам для игры в волейбол. (Очень давно было замечено, что направление полета меняют вращающиеся пушечные ядра и ружейные пули.) Конечно, послав куда-нибудь мяч по искривленной траектории, можно сбить с толку противника. Преимущество крученого мяча в том, что от поля, корта или стенки он отскакивает в самом неожиданном направлении. Однако гладкий пляжный мяч может вести себя иначе. Такой мяч может сначала полететь в одну сторону, а затем изменить направление, так что его траектория не изогнута наподобие банана, а скорее напоминает букву S. Второй, неожиданный разворот мяча происходит тогда, когда скорость мяча и скорость его вращения сильно падают. В этом случае говорят об *обратном эффекте Магнуса*.

## 2.15 • АЭРОДИНАМИКА МЯЧИКА ДЛЯ ИГРЫ В ГОЛЬФ

Зачем на мячиках для игры в гольф делают вмятинки? Если игрок применяет «верхнюю закрутку» (закручивает верхушку мяча в направлении его полета), после падения на землю мячик продолжает катиться по полю. Выгодно ли это игроку с хорошим ударом, обычно удаляющим по мячу вдали от лунки?

**ОТВЕТ** • Изначально мячики для гольфа были гладкими, но потом заметили, что при одинаковом ударе клюшкой поцарапанные и побитые мячи летят дальше. Впоследствии появились современные мячи с вмятинками.

Основная задача неровностей на мячике для гольфа — снизить аэродинамическое сопротивление, замедляющее его движение. Этого можно достичь, уменьшив разность давлений между передней и задней (относительно направления полета) сторонами мяча. Из-за столкновения с воздухом спереди давление выше. Когда мячик летит, пограничный слой воздуха «прилипает» к его передней поверхности, а затем в какой-то точке отрывается от нее. За этой точкой образуются вихри, в которых давление воздуха понижено. Если вихревая область позади мяча достаточно велика, разность давлений перед мячиком и за ним тоже большая. Следовательно, аэродинамическое сопротивление велико, и далеко он не улетит. Если на мяче есть вмятинки (или даже просто царапины), мяч обтекает турбулентный поток, и это позволяет воздуху сильнее «прилипнуть» к мячику и зайти дальше на его заднюю сторону до того, как произойдет отрыв и начнут образовываться вихри. Если сравнивать гладкий мячик с неровным, вихревая область позади мяча с вмятинками меньше. А значит, меньше и аэродинамическое сопротивление.

Хотя неровный мяч летит дальше, он может отклониться вправо или влево от прямого курса. Другими словами, вмятины увеличивают дальность полета, но уменьшают предсказуемость траектории.

На крученный мячик действует *подъемная сила*. Если удар клюшкой низкий с обратным вращением мяча (*нижняя закрутка*), подъемная сила положительна, то есть направлена вверх. Она удерживает мячик в воздухе, что позволяет ему улететь далеко. При высоком ударе клюшкой и вращении вперед (*верхняя закрутка*) подъемная сила отрицательна, то есть направлена вниз. При верхней закрутке мяч может долго катиться по полю, но по воздуху он летит не так далеко.



**Рис. 2.5 / Задача 2.15.** Мячик движется вправо. Поток воздуха, направленный влево, отклоняется закрученным мячиком вниз. На мячик действует подъемная сила.

Действующая на мячик для гольфа подъемная сила (положительная или отрицательная) возникает

благодаря отрыву воздушного потока от вращающегося мяча. При нижней закрутке вращающийся мяч направляет этот поток вниз (рис. 2.5). Поскольку вращение заставляет воздух двигаться вниз, мяч вынужден двигаться вверх, а значит, подъемная сила положительна. При верхней закрутке оторвавшийся поток воздуха устремляется вверх, а мяч вынужден двигаться вниз, что приводит к отрицательной подъемной силе.

## 2.16 • АЭРОДИНАМИКА БЕЙСБОЛА

Как при игре в бейсбол питчеру удастся выполнить подачу «быстрый мяч» так, чтобы мяч не упал под действием силы тяжести, не долетев до бэттера? Если бэттер неправильно угадает, какой будет подача, замах может оказаться слишком низким, чтобы обеспечить хороший контакт с мячом. Как питчеру удастся выполнить крученую подачу, при которой траектория полета искривляется либо в направлении бэттера или от него, либо загибается к земле?

**ОТВЕТ** • Выполняя подачу «быстрый мяч» (или «фастбол»), питчер мощным движением руки резко посылает мяч вперед, при этом его запястье смотрит строго в направлении бэттера. Подающий закручивает мяч в обратном направлении: его верхушка вращается назад по направлению к питчеру. Когда закрученный мяч летит, обтекающий его сверху воздушный поток отрывается от поверхности мяча и движется в направлении земли. Отклонение воздушного потока вниз приводит к отклонению траектории мяча вверх (действует *положительная подъемная сила*). Следовательно, такой мяч падает не там, где упал бы незакрученный мяч, что может ввести в заблуждение бэттера.

Надо еще учесть, что на бейсбольном мяче имеются швы. Если мяч закручен, швы создают непредсказуемое аэродинамическое сопротивление, способное замедлить мяч и изменить траекторию его полета. Швы проходят по всей поверхности бейсбольного мяча. Они соединяют два куска кожи, обтягивающие мяч. Способ, которым держат мяч, и сам бросок обычно описывают так, как это видит бэттер. Один из основных способов подачи шутиво называют «двухшовный фастбол»: при полете крученого мяча бэттер все время видит два участка шва. При «*четырёхшовном фастболе*», когда мяч находится в воздухе, бэттер последовательно видит разные участки мяча, вращающегося в его поле зрения. Хотя оба типа подачи обеспечивают положительную подъемную силу, некоторые питчеры настаивают на превосходстве одного из них.

Бросок по дуге осуществляется с помощью либо бокового, либо верхнего кручения. Если при боковой подкрутке воздушный поток отбрасывается влево от питчера, то мяч отклонится вправо, то есть либо в направлении бэттера, либо от него в зависимости от того, правша он или левша. Если, находясь в середине квадрата, питчер подает мяч с верхней подкруткой, его еще называют *drop*, воздушный поток, отрываясь от мяча, уходит вверх, а мяч уходит вниз (отрицательная подъемная сила). *Слайдер* — это бросок с боковой подкруткой, но вращение, а значит, и отклонение, меньше, что может ввести в заблуждение бэттера.

Это основные способы броска. Хороший питчер может закрутить мяч так, чтобы действующая на него подъемная сила вызывала изменение траектории полета в нужном ему направлении. Чтобы запутать бэттера, он может менять закрутку от подачи к подаче. Профессиональные игроки, выходящие на битву, пытаются предугадать подачу. Они обращают внимание и на положение руки питчера в момент броска, и на вращение швов на мяче. Это дело трудное, поскольку бэттер четко видит мяч только в начале полета. Затем мяч кажется ему размытым, а начинать замах битой надо.

## 2.17 • АЭРОДИНАМИКА КРИКЕТА

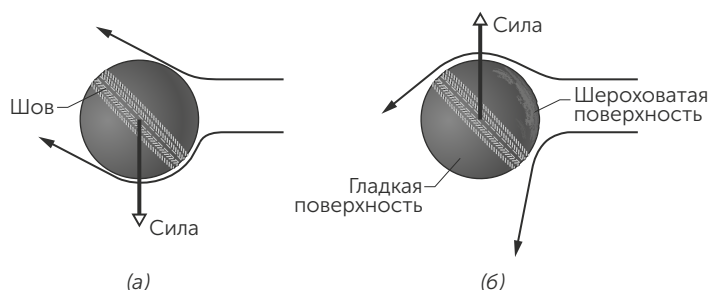
В крикете подающий мяч боулер со всей силы бьет по мячу прямой вытянутой рукой, направляя его в землю так, что он отскакивает в направлении бэтсмана, пытающегося отразить его битой. Хотя такое *схематическое описание* вряд ли покажется интересным для зрителей, в игре есть много неожиданных моментов, и болельщики многих стран заворожено следят за крикетными матчами. Как же боулер может контролировать (хотя бы приблизительно), куда полетит мяч?

**ОТВЕТ** • У боулера есть несколько возможностей обмануть бэтсмана. 1. Подкрученный мяч может отскочить в неожиданном направлении. 2. Боулер может сделать *свинг* (мяч летит не по прямой), правильно сориентировав при ударе положение шва на мяче. 3. Свинг можно сделать, еще и подкрутив мяч. И, конечно, боулер может комбинировать все эти приемы.

Если боулер использует прием 2, мяч все время ориентирован примерно одинаково по отношению к потоку воздуха. На рис. 2.6а (вид сверху) неподвижным считается мяч, а воздух движется влево. Если смотреть так, шов располагается на нижней части передней поверхности, а воздух движется сверху и снизу мяча.



Сверху воздушный поток достаточно спокоен, и слои, примыкающие непосредственно к поверхности мяча, продолжают двигаться влево. Они отрываются от мяча, не достигнув обратной стороны. Снизу воздух сначала течет плавно, но шов разрывает поток, что приводит к турбулентности. Из-за турбулентного перемешивания приповерхностные слои воздуха прижимаются к мячу сильнее. Воздушный поток отрывается от мяча, достигнув его обратной стороны. Можно сказать, что из-за шва поток на этом рисунке уходит вверх, то есть влево от боулера. Таким образом, если воздушный поток смещается влево относительно боулера, мяч будет уходить вправо от него, то есть мяч повернется направо.



**Рис. 2.6 / Задача 2.17.** Поток воздуха, обтекающий закрученный крикетный мяч, и действующая на мяч отклоняющая сила. а) Новый мяч. б) Использованный шероховатый мяч, который с одной стороны потерял боулер.

**Обратный свинг** — отклонение мяча в направлении, противоположном показанному на рис. 2.6а. Боулер трет мяч, который уже давно в игре, о брюки, приглаживая его с одной стороны. Вторая сторона мяча остается шероховатой. Затем боулер бросает мяч шероховатой стороной вперед (рис. 2.6б). В этом случае воздушный поток с обеих сторон мяча сразу становится турбулентным и стремится к нему прижаться. Однако теперь шов, находящийся справа, отрывает турбулентный поток от мяча. В результате поток сверху (относительно рисунка) отрывается от мяча сзади, а поток снизу — на шве. С точки зрения боулера поток направляется вправо, а следовательно, мяч сместится влево — обратный свинг выполнен.

## 2.18 • СТАЯ ПТИЦ, ЛЕТАЮЩАЯ КЛИНОМ

Почему стаи многих птиц при дальних перелетах выстраиваются V-образным клином?

**ОТВЕТ •** Когда птицы летят, не планируя, а размахивая крыльями, при каждом махе крыла вниз в воздухе образуется вертикальный вихрь (воронка), следующий

за птицей. Ближе к птице вихрь закручивается вниз (наружу от птицы с нижней стороны крыла), на дальнем конце крыла вихрь закручивается вверх (по направлению к птице на верхней стороне крыла). Попадая в восходящую струю за летящей впереди птицей, вторая птица испытывает действие дополнительной подъемной силы. Крыльями ей по-прежнему размахивать надо, однако теперь на это тратится меньшее усилие, а значит, и расход энергии меньше. При длительном перелете такая экономия может быть очень существенной.

Чтобы оставаться в восходящем потоке, надо сдвинуться в сторону от летящей впереди птицы, и V-образный клин — один из лучших способов расположить птиц правильно. Кроме того, так они видят друг друга. Однако далеко не всегда птицы выстраиваются так, чтобы экономия энергии была максимальной, да и расстояния между птицами не всегда одинаковы. Можно предположить, что поддерживать строй во время полета не так уж легко.

Хотя птицы слева и справа от вожака тоже создают восходящий поток, обычно лететь впереди стаи труднее всего. Возможно, вожаками по очереди становятся разные птицы. А иногда, чтобы облегчить полет вожака, птицы уменьшают угол раствора клина или летят шеренгой.

Вероятно, и рыбы плавают косяками ради экономии энергии. За плывущими впереди рыбами образуются вихри, позволяющие уменьшить энергозатраты остальных рыб из косяка.

## 2.19 • С КАКОЙ СКОРОСТЬЮ МОЖНО ПЛАВАТЬ В СИРОПЕ?

Движения во время плавания характеризуются чередующимися фазами захвата (подтягивания) и отталкивания воды. Конечно, вода — жидкость. Если бы вода была тверже, подтягивание и отталкивание были бы более эффективны. Предположим, в воду что-то добавили и она стала более вязкой. Удастся ли в такой воде плыть быстрее?

**ОТВЕТ •** В одном из экспериментов в плавательный бассейн добавили гуар\*, чтобы вязкость воды в нем удвоилась. Замерялась скорость пловцов на дистанции 25 м. Оказалось, что их скорость не изменилась.

\* Гуар, или гороховое дерево, — растение родом из Индии. Получило широкое распространение в косметической и пищевой промышленности. Из гуаровых бобов делают пищевые добавки, содержащие вещества, образующие гель в воде. *Прим. пер.*



Увеличение вязкости позволило пловцам лучше захватывать и отталкивать воду, но она же увеличивала и силу сопротивления, действующую на пловца, и эти два эффекта компенсировали друг друга.

## 2.20 • КОНДЕНСАЦИОННЫЕ СЛЕДЫ

Почему самолеты иногда оставляют в небе след в виде белых линий? Почему эти следы могут расплываться или образовывать петли?

**ОТВЕТ •** Когда самолет на большой высоте летит через насыщенный водяными парами воздух, за ним может образоваться так называемый *конденсационный след*. Обычно он состоит по крайней мере из двух белых линий, начинающихся где-то позади самолета. Когда самолет прокладывает себе путь через воздух, законцовки крыльев (и другие выступающие части) оставляют после себя вихри (воронки). Воздух в концевом вихре крыла движется сначала вверх, потом по направлению к самолету, затем вниз и наружу. Двигатели самолета выбрасывают в этот вихревой поток продукты сгорания топлива, что приводит к образованию водяных капель или кристалликов льда. Их скопление рассеивает солнечный свет, и поэтому мы видим эти следы. Поскольку интенсивность рассеяния обычно не зависит от длины волны (цвета), конденсационные следы чаще всего белые.

Концевые вихри могут быть опасными для других воздушных судов. Маленький и легкий самолет они могут просто перевернуть. Поэтому пилоты небольших летательных аппаратов должны проявлять осторожность, чтобы не оказаться позади больших самолетов. Однако во время Второй мировой войны летчики в небе над Англией не раз использовали концевые вихри. Во время атак крылатых ракет «Фау-1», их называли летающими бомбами, британские пилоты летали поблизости, добываясь того, что концевые вихри переворачивали ракеты в воздухе и выводили их из строя.

Водяные капли испаряются, поэтому состоящий из них конденсационный след обычно короткий. Однако, когда такой след состоит из кристалликов льда, он длинный и сохраняется долго, если только льдинки не вырастают настолько, что просто выпадают вниз. Долгоживущий конденсационный след расширяется, если из водяной пыли образуются новые капли или кристаллики. В местах напряженного воздушного трафика конденсационные следы могут перекрываться, покрывая почти все небо.

Иногда исчезающий конденсационный след изгибается, образуя петли. Тогда можно видеть только ядра вихрей. След может образовать рыхлую структуру, напоминающую воздушную кукурузу, если его нисходящие участки опускаются и раздуваются книзу.

Если при ярком свете конденсационный след отбрасывает тень на аэрозольный слой под ним (такой слой может образоваться из-за дыма, мороси или густого тумана), с земли такая тень видна как темная линия на небе. Когда солнце находится позади самолета, темная линия может появиться перед ним. Она выглядит как вытянутое вперед темное продолжение конденсационного следа.

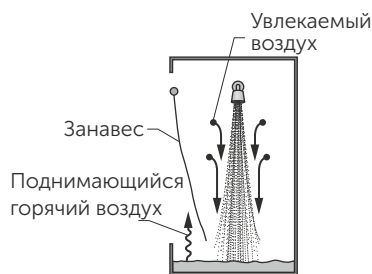
А еще, если облачность не слишком сильная, за самолетом может образовываться темная линия, которую называют *инверсионным конденсационным следом*. Его можно видеть в условиях слоистой или кучевой облачности, когда водяные капли и кристаллики льда в туче испаряются либо за счет разогрева воздуха двигателями самолета, либо при попадании в тучу теплого воздуха над ней. Инверсный конденсационный след может появиться и в том случае, когда двигатели самолета обеспечивают поступление в тучу большого количества влаги и кристаллики льда, разрастаясь, выпадают из тучи.

## 2.21 • ПОЧЕМУ ВТЯГИВАЕТСЯ ЗАНАВЕС ДУШЕВОЙ КАБИНКИ

Когда я принимаю душ, занавес душевой кабинки неизменно начинает трепыхаться, втягивается внутрь и липнет к моим ногам. В поведении моего занавеса нет ничего необычного. Все они одинаково надоедливы, если только их не утяжелить или не оснастить маленькими магнитами. Что же втягивает внутрь занавес душевой кабинки?

**ОТВЕТ •** Одно из широко распространенных объяснений таково: горячая вода нагревает воздух, он поднимается над занавесом, а более холодный воздух из ванной комнаты втягивается внутрь душевой кабинки по краю занавеса. Если вы принимаете горячий душ, такой поток, сродни потоку в дымовой трубе, конечно, присутствует. Но занавес втягивается внутрь и тогда, когда вода в душе холоднее воздуха в ванной комнате.

Основная причина движения занавеса заключается в том, что падающая вода *увлекает* за собой прилегающий воздух (рис. 2.7). На его место устремляется поток воздуха, направленный вверх. При этом, в соответствии с уравнением Бернулли, падает давление, и разность давлений изгибает занавес.



**Рис. 2.7 / Задача 2.21.** Захват и увлечение воздуха льющейся водой приводит к втягиванию занавеса внутрь душевой кабинки.

Движение воздуха, обязанное захвату и увлечению его текущей водой, может возникать и при стекании воды внутрь системы пещер. Так воздух переносится внутри пещеры вдоль русла, по которому течет вода, а это значит, что такое же количество воздуха должно выйти из пещеры. Иногда спелеологи чувствуют ветер, дующий из пещеры.

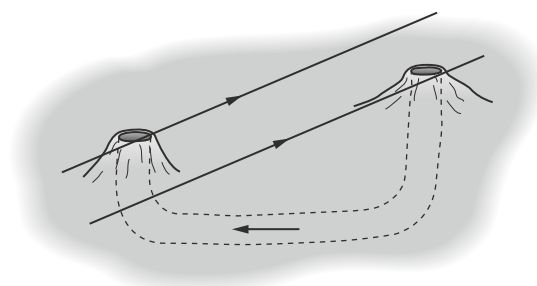
## 2.22 • ЛУГОВЫЕ СОБАЧКИ И ГИГАНТСКИЕ МУРАВЕЙНИКИ

Луговые собачки — грызуны, очень многочисленные как на безлюдных равнинах северо-запада Соединенных Штатов, так и во многих заселенных районах. На глубине от 1 до 5 м они строят длинные подземные коридоры, соединяющие несколько входов. Поскольку ветер в эти лабиринты не задувает, они совершенно не проветриваются. Почему же луговые собачки не задыхаются в своих норах?

Муравьи-листорезы (их еще называют муравьи-грибоведы) строят под землей гигантские муравейники глубиной до 6 м, где обитает порядка пяти миллионов муравьев. Этим муравьям не только приходится дышать внутри сложного лабиринта из подземных переходов, но и разводить специальный грибок, которым они кормят своих личинок. Для этого требуется не только кислород, но и поддержание температуры не выше 30 °С. Активная деятельность муравьев внутри муравейника вполне может привести к нарушению температурного режима. Как же вентилируются такие муравейники и как муравьям удастся контролировать и количество кислорода, и температуру?

**ОТВЕТ •** Вокруг каждого входа в свое жилище луговая собачка сооружает холмик. Обычно у одного входа он скругленный куполообразный, а у другого — более крутой, в форме конуса (рис. 2.8). Холмики сложены

из материала, извлеченного при строительстве лабиринта, и поверхностного грунта. Они содержатся в полной исправности и служат зверькам наблюдательным пунктом, но основное их предназначение — вентиляция подземных коридоров. Когда воздушный поток дует над норой, его скорость оказывается разной над разными отверстиями. Причем она больше над тем отверстием, которое венчает более высокий холмик. С увеличением скорости потока в нем уменьшается давление (согласно уравнению Бернулли), поэтому давления над отверстиями оказываются разными и воздух в подземном тоннеле протягивается со стороны большего давления в сторону меньшего, то есть от низкого холмика в сторону более высокого.



**Рис. 2.8 / Задача 2.22.** Воздушный поток, проходящий через два входа норы луговой собачки.

Этот надежный способ снабжения подземного жилища свежим воздухом с высоким содержанием кислорода позволяет зверькам не задохнуться.

Муравьи и грибы в гигантских муравейниках выделяют большое количество тепла, за счет чего воздух в муравейнике нагревается. Нагретый воздух стремится покинуть муравейник. Но муравейник слишком большой и сложный, поэтому так продуть его не получится. Как и лабиринт луговых собачек, муравейник вентилируется воздушным потоком, проходящим через отверстия на его поверхности.

## 2.23 • ВИХРИ В ВАННОЙ

Почему, когда вода вытекает из ванной, она закручивается возле сливного отверстия, образуя вихрь? Каково направление такого вращения, по или против часовой стрелки? Если направление вращения зависит от того, в каком полушарии находится ванна, куда будет вращаться вода, если поместить ванну вблизи экватора? Стекает ли вода в воронку преимущественно сверху, как будто вихрь — водосточная труба, по которой сверху стекает вода? Что определяет глубину вихря? Это

небольшое углубление на поверхности воды, заполненное воздухом, или столб воздуха, уходящий вниз в водосточную трубу? Почему иногда направление вращения неожиданно меняется на обратное в последние несколько минут до полного вытекания воды? Почему некоторые вихри в ваннах издают звуки?

**ОТВЕТ •** Легенда о том, что в разных полушариях вода, вытекающая из ванной, закручивается в разных направлениях, основывается на общих представлениях о крупномасштабных круговых движениях атмосферы, например ураганах. Когда воздух перемещается над большим пространством, вращение Земли приводит к заметному отклонению воздушного потока в результате *эффекта Кориолиса*. В Северном полушарии подобные отклонения приводят к вращению воздуха против часовой стрелки, а в Южном полушарии вращение происходит по часовой стрелке.

Ванна и вытекающая из нее вода — система слишком маленького размера, где движение воды определяется другими силами, существенно превышающими силу Кориолиса. Направление вращения при вытекании задается главным образом тем, как вращалась вода, когда наполняли ванну или когда кто-то взбаламутил ее. Если при наполнении ванны преобладало, скажем, вращение по часовой стрелке, оно может ощущаться еще целый час или даже дольше. Если вода выливается, все еще вращаясь по часовой стрелке, вихрь над водостоком будет закручиваться тоже по часовой стрелке. Другие факторы, определяющие направление потока, — это несимметричная форма ванны или несимметричное расположение сливного отверстия, возмущение, связанное с выдергиванием пробки, разная температура воды на бортиках ванны (скажем, один бортик ближе к входу в ванную, а другой ближе к стене).

Эффект Кориолиса удалось продемонстрировать в специальной ванне при соблюдении целого ряда предосторожностей. Ванна была круглой, сток располагался строго по центру, воде дали достаточно времени, чтобы она успокоилась, а ее температура установилась, ванну амортизировали, чтобы не допустить передачи вибраций от перемещения находящихся в комнате людей, а пробку вытаскивали очень аккуратно. Теперь вращение воды определялось силой Кориолиса, а поскольку ванна была установлена в Бостоне, вода вращалась против часовой стрелки.

Большая часть стекающей в водосток воды движется по направлению к нему по дну ванны. Когда вода

достигает сливного отверстия, часть ее тут же срывается вниз, но большая часть продолжает вращаться по спирали, пока ее не затянет в слив. Вода,двигающаяся вниз по самому центру водостока, поступает из верхних слоев, то есть из небольшого углубления над сливным отверстием. Если завихрение сильное, основание углубления узкое и неустойчивое, из него вырываются пузырьки воздуха.

Протяженность вихря (высота столба воздуха) частично определяется диаметром сливного отверстия. Если оно широкое, обычно на поверхности воды образуется только углубление, а при узком стоке — узкий мощный вихрь, где столб воздуха уходит вглубь стока. При промежуточных размерах стока может образоваться вихрь, который сначала углубляется, а затем отступает вверх.

До конца не понятно, почему меняется направление вращения, когда уже почти вся вода вытекла из ванны. Одно из возможных объяснений следующее: когда слой воды становится очень тонким, трение о дно ванны неожиданно начинает препятствовать поступлению воды в вихрь.

Вихрь в ванне может издавать звуки, если он достаточно мощный, чтобы увлечь за собой пузырьки воздуха. Когда такие пузырьки колеблются или лопаются, то издают звуки. Поверхность воды тоже может колебаться, вызывая колебания давления воздуха в диапазоне звуковых волн.

## 2.24 • ВИХРИ В ЧАШЕЧКЕ КОФЕ

Осторожно помешайте ложечкой в чашке черного кофе, а затем вытащите ложку. Если кофе в чашке вращается, медленно и осторожно влейте в центр чашки холодное молоко или сливки. Почему в центре чашки появляется небольшая воронка? Почему такого не происходит, если молоко теплое или горячее?

**ОТВЕТ •** После того как вы размешали кофе, кроме основного, заметного вращения там, возможно, осталось много небольших завихрений. Поскольку плотность холодного молока больше, его струйка опускается вниз вдоль центральной оси. Поток молока, захватывая вихри, подтягивает их к центру и удлиняет. Слияние достаточно длинных вихрей увеличивает скорость вращения кофе в центре, и на его поверхности вблизи центра образуется углубление. То же происходит и с любой другой вращающейся жидкостью, но в этом примере вогнутость заметна больше.

## 2.25 • СКОПЛЕНИЕ ЧАИНОК В ЧАЕ, КРУЖЕНИЕ ОЛИВКИ В МАРТИНИ

Если вы размешаете ложечкой чай в чашке с чайниками на дне (а затем уберете ложку), вы заметите, что чайники собираются в центре дна чашки. Почему так происходит и почему перед тем, как собраться в центре, чайники образуют вблизи центра фигуру, напоминающую круг, а затем двигаются внутрь этого круга?

Если размешать мартини с оливкой, она будет не только крутиться вместе с жидкостью вокруг центра бокала, но и вращаться вокруг своей оси. Почему, как правило, направление кручения противоположно направлению вращения вокруг оси?

**ОТВЕТ •** Как объяснил Альберт Эйнштейн, чайники воспроизводят схему движения чая в чашке. Поскольку размешивание вызывает вращение чая вокруг центральной вертикальной оси, вода стремится двигаться по раскручивающейся спирали. То есть каждый небольшой объемчик воды движется так, как на плоской вращающейся карусели.

Однако из-за трения о дно чашки нижний слой чая замедляется и поэтому вращается не столь интенсивно, как слой на поверхности чашки. Поэтому наверху вращение по внешней спирали происходит интенсивнее, чем на дне. Это различие обуславливает появление еще одного циркулирующего, так называемого *вторичного потока*: жидкость из верхнего слоя, двигаясь по раскручивающейся спирали вокруг центральной оси до стенки чашки, затем спускается вниз по стенке, продолжает движение по закручивающейся внутрь спирали по дну чашки, а затем поднимается вверх по центральной оси (рис. 2.9). Поток на дне чашки увлекает чайники к центру и оставляет их там.



Рис. 2.9 / Задача 2.25. Вторичный поток в размешанном чае.

Но Эйнштейн не обратил внимания на то, что сначала, сразу после того как вы вынули ложечку, чайники образуют круг, а уж затем собираются в центре. Чайники вдали от этого круга втягиваются в него вторичным потоком. Чайники, находящиеся ближе к центру, двигаются к тому же кругу по раскручивающейся спирали. Когда вращение воды в чашке прекращается, радиус кольца уменьшается и чайники постепенно сдвигаются к центру, где и остаются.

Если мы хотим размешать чай, поставив чашку на вращающийся стол, например на проигрыватель для пластинок, из-за трения нижнего слоя жидкости о дно чашки размешивание начнется со дна. Во вращение будут постепенно вовлекаться новые, более высокие слои жидкости. Пока верхний слой не принимает участия во вращении, чай на дне раскручивается по внешней спирали, а сверху не вращается. В результате устанавливается вторичный поток. Теперь он направлен вонне на дне, затем вверх по боковой стенке чашки, внутрь сверху, а затем вниз по центральной оси. Этот вторичный поток направлен в противоположную сторону относительно вторичного потока при размешивании чая ложечкой, и теперь чайники на дне собираются у стенки чашки.

Если размешивать мартини с оливкой, оливка оказывается между быстро двигающимися слоями жидкости вблизи центра бокала и медленными слоями ближе к стенке. Поэтому действующая на нее сила сопротивления может оказаться больше в самой близкой к центру бокала точке, что приведет к вращению оливки в направлении, противоположном размешиванию. (Поскольку переменных, влияющих на этот процесс, слишком много, например для фаршированной оливки или оливки без косточки это распределение масс, оливка может вращаться и в направлении размешивания или даже хаотически.)

## 2.26 • ИЗВИЛИСТЫЕ (МЕАНДРИЧЕСКИЕ)\* РЕКИ

Почему обычно русло реки не прямое, а с излучинами? Глядя из окна самолета, обращаешь внимание на извилистость некоторых рек. В чем причина образования стариц, слепых рукавов рек? Почему вдоль сильно извилистых рек можно видеть *старичные озера*, напоминающие по форме ярмо для быков?

\* Название происходит от малоазиатской реки Меандр, известной своими необыкновенными изгибами.  
Прим. пер.

**ОТВЕТ** • При сложном режиме течения реки образование стариц начинается случайно. Однако если форма русла изменилась хоть немного, водный поток способствует дальнейшим изменениям. Из-за эрозии почвы или разрушения скальных пород вдоль берега и в ложе реки ее русло изгибается, а затем образуются петли. Это очень сложный процесс, зависящий от характера реки, но объяснить, что происходит, просто. На рис. 2.10а показан вид сверху на изгиб реки, а на рис. 2.10б — вертикальное поперечное сечение этого изгиба. Когда поток воды затекает в изгиб, он по спирали движется вверх, как если бы его туда выбрасывало. До выхода на поверхность поток замедляется благодаря шероховатости ложа реки. На поверхности воды поток не тормозится. Итак, в изгибе кроме потока вниз по течению возникает *вторичный поток*. По поверхности воды этот поток натекает на выгнутую наружу часть берега, по дну реки течет в направлении внутренней части петли, а затем вверх на поверхность воды. Этот вторичный поток вымывает грунт из-под выгнутой наружу части берега, а затем этот грунт переносится вниз по течению на внутреннюю сторону изгиба. Таким образом, по мере того как грунт убирается из-под выступающей наружу части берега, изгиб наружу увеличивается.

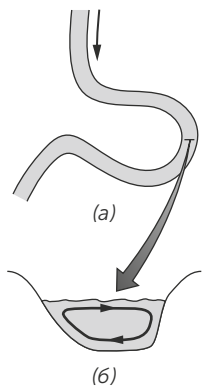


Рис. 2.10 / Задача 2.26. а) Вид сверху на вытянутый изгиб реки. б) Вторичный поток в поперечном сечении изгиба.

Когда петля становится большой, эрозия берега в районе изгиба может отсечь ее от основного русла и привести к образованию старичного озера.

## 2.27 • ПТИЦА, ВЕРТЯЩАЯСЯ В ВОДЕ

Почему, добывая пищу, кулики-плавунчики (маленькие болотные птички) энергично вертятся в воде из стороны в сторону и беспрестанно кивают головой?

**ОТВЕТ** • Когда на поверхности воды пищи недостаточно, плавунчик резко поворачивается, растопыривая пальцы и сильно отталкиваясь от воды, а затем

подгибает и поджимает лапки. Благодаря его усилиям вода из нижних слоев, в которых есть корм, поднимается на поверхность, вращаясь в направлении, противоположном направлению вращения птички. Когда пища достигает поверхности, плавунчик мгновенно ее склевывает. По-видимому, наилучший результат достигается в том случае, когда выходящая наверх вода приносит с собой пищу со дна мелкого болота, откуда плавунчик никак иначе ее достать не может.

## 2.28 • ВОДА, ПОДНИМАЮЩАЯСЯ ПО ВРАЩАЮЩЕМУСЯ ЯЙЦУ

Если вы будете вращать сваренное вкрутую яйцо, оно будет стоять на одном конце. Если вы вращаете его в мелком водоеме (глубиной несколько миллиметров), вода сначала поднимается по поверхности яйца и лишь потом разбрызгивается. Почему?

**ОТВЕТ** • Как правило, когда вы размешиваете жидкость, например чай, в чашке, она движется по раскручивающейся спирали: в центре образуется углубление, что указывает на наличие здесь вихря. Если яйцо закручено в воде, вода не только движется в направлении от яйца, но и прилипает к нему. Поднимаясь по его поверхности вверх, вода может двигаться, не отрываясь от скорлупы. Когда вода поднимется до некоторого уровня на изогнутой поверхности яйца, гравитационная сила и общая потеря устойчивости приведут к отрыву воды. Она каплями разлетится по воздуху. Достигнув поверхности стола, капли образуют вокруг яйца кольцо.

## 2.29 • ВОДА, ОБРАЗУЮЩАЯ КРУГ В РАКОВИНЕ

Почему, когда вода из крана льется в плоскую раковину с открытым сливом, вокруг места ее удара о раковину образуется водяное кольцо, причем вне этого кольца вода глубже?

**ОТВЕТ** • Когда вода из крана ударяется о раковину, она растекается в радиальном направлении со скоростью, которую называют *сверхкритической*. Так говорят, поскольку вода движется быстрее, чем волны, которые могут распространяться по воде. Вначале поток стабилен: любые случайные возмущения быстро затухают. Однако по мере того, как вода растекается, ее вязкость начинает играть существенную роль, и поток становится неустойчивым. Происходящее можно описать следующим образом. На дне раковины возникает



вязкий поток, постепенно распространяющийся вверх. На определенном расстоянии от точки, где струя ударяется о раковину, вязкий поток достигает поверхности воды, и ее глубина неожиданно увеличивается. Этот эффект известен как *гидравлический скачок* (рис. 2.11). За образовавшейся водяной стенкой скорость воды меньше (*докритическая скорость*). Таким образом, гидравлический скачок — переход от более быстрого и мелкого потока к более медленному и глубокому.

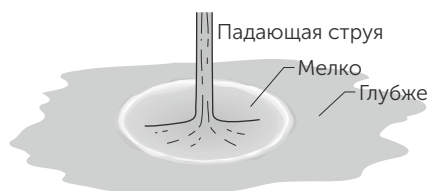


Рис. 2.11 / Задача 2.29. Водяное кольцо вокруг падающей в раковину струи.

С гидравлическим скачком приходится иметь дело часто. Например, когда вода течет по подъездной дорожке или вдоль бордюра тротуара, в дренажных трубах и наклонных ирригационных каналах. Обратите внимание на стоячую волну, образующуюся там, где на пути потока воды есть препятствие. Когда вода обтекает препятствие или течет поверх него, образуются волны. Большинство из них просто затухают, теряя энергию, но волна определенной длины распространяется против течения со скоростью воды в потоке. Это стоячая волна. Препятствие непрерывно нарушает спокойное течение потока, а вызванные им волны «подпитывают» воду энергией, поддерживая стоячую волну. В отличие от раковины, где есть только одно возвышение, в стоячей волне возможны несколько неподвижных гребней и впадин. При сплаве на плоту по реке с порогами гидродинамический скачок бывает опасен: если плот, перебираясь через стену воды и попав в водоворот, перевернется в бурном потоке, последствия могут оказаться серьезными.

Если в кухонной раковине каплю воды осторожно поместить чуть выше по потоку от места гидравлического скачка, она может попасть в ловушку перед образовавшейся водяной стенкой. Такая капля будет долго оставаться на плаву (не смешиваясь с остальной водой), поскольку ее поддерживает воздух, затягиваемый под каплю текущей водой.

В потоке вязкой жидкости, такой как антифриз (этиленгликоль), тоже возможно образование круговой стенки при гидравлическом скачке, но в этом

случае она может самопроизвольно трансформироваться в многоугольник с прямыми сторонами и закругленными вершинами.

## 2.30 • УРОВЕНЬ ВОДЫ В КАНАЛЕ

Предположим, вы плывете на лодке по достаточно узкому и мелкому каналу. Что происходит с уровнем воды вблизи стенок канала, когда мимо проходит нос лодки? Уровень воды там повышается или понижается?

**ОТВЕТ •** Вода перед плывущей вдоль канала лодкой должна протиснуться через узкое свободное пространство между ее бортами и стенами канала. Движение воды возможно благодаря тому, что нос лодки все время погружен в воду. При этом вода оттесняется от передней части лодки, скорость ее увеличивается, а давление уменьшается. Таким образом, когда лодка плывет вдоль канала, уровень воды между стенками и носом лодки понижается. Это называется *канальным эффектом*. Возникающие изменения напора воды и скорости потока вдоль бортов судна могут сильно осложнять судоходство по каналам, влиять на работу оборудования на стенках канала и его ответвлениях.

## 2.31 • СОЛИТОНЫ

В 1834 году британский инженер и кораблестроитель Джон Скотт Рассел наблюдал необычную волну на канале близ Эдинбурга. По узкому каналу лошади быстро тянули баржу, а затем и лошади, и баржа внезапно остановились. Но водяной вал, образовавшийся около носа баржи, продолжал двигаться вдоль канала со скоростью примерно 4 м/с. Около трех километров Рассел верхом на лошади гнался за этой «водяной горой» около метра высотой и примерно десяти метров шириной (от края до края канала). Затем «в изгибах канала» он потерял ее из виду. Рассел был поражен: распространяясь, волна, казалось, не уменьшалась в размерах. Волны в возмущенном потоке достаточно быстро уменьшаются в размерах и, уж конечно, не будут катиться несколько километров даже на широких водных просторах. Что же такое особенное было в волнах Рассела?

**ОТВЕТ •** Когда баржа движется вдоль канала со скоростью, превышающей скорость волн на воде, перед ее носом формируются водяные валы. Если скорость баржи лишь слегка превышает скорость волн, перед баржей появляются несколько отчетливо видных гребней

и впадин. Но если баржа движется быстрее, впадины заполняются водой и формируется один мощный вал, называемый *одиночной волной*, или *солитоном*.

Рассел наблюдал одиночную волну, оторвавшуюся при внезапной остановке баржи. Описать такую волну математически сложно, но на пальцах объяснить эффект можно так. Обычно волны, распространяющиеся по воде, различаются длиной волны. От длины волны зависит скорость их распространения. Это называется дисперсией волн. Если всплеск стал источником пакета волн разной длины, он диспергирует, меняет форму, расплывается и затухает с расстоянием. В одиночной волне исходное нарушение уровня воды усиливается самой волной, препятствуя дисперсии и сохраняя форму волны. И действительно, солитон распространяется на очень большие расстояния, поскольку благодаря малому внутреннему трению воды свою энергию он теряет медленно.

В обычной волне элемент объема воды движется по круговой или эллиптической траектории, но не переносится в направлении распространения волны. Например, если вы брызгаетесь в пруду, возбуждая на его поверхности волны, распространяются только волны, но вода по пруду не перемещается. Солитон отличается тем, что он воду переносит. Чтобы показать это, Рассел поставил много опытов, изучая одиночные волны, созданные баржами, которые лошади волокли вдоль канала. Рассел обнаружил, что глубина воды в конце канала увеличивается, а в начале, откуда отплыла баржа, ровно на столько же уменьшается.

### 2.32 • ПРИЛИВНЫЕ ВОЛНЫ

Почему в некоторых реках, впадающих в открытое море, когда вода поднимается вверх по реке во время прилива, образуется приливная волна? Аномально высокую приливную волну называют *бор*. Почему на некотором расстоянии от устья такая волна может привести к очень существенному увеличению глубины воды? Случается, что иногда при «правильном» приливе бор столь высок, что, оседлав его, серфингисты преодолевают расстояние в несколько километров (например, в Англии на реке Северн).

Задолго до того, как серфинг стал спортом, рыбаки устанавливали лодки в устьях рек и, используя бор, поднимались высоко вверх по течению. Правда, об этом не знали капитаны и команды кораблей Королевских военно-морских войск Великобритании, занимавшиеся в 1888 году в Китае геодезической съемкой

местности в бассейне реки Цзинь-шацзян\*. Однажды ночью, когда корабли стояли на якоре, моряки услышали ужасный рев. Примерно через полчаса корабли подхватил бор и, хотя моторы работали на полную мощность, пытались противостоять волне, протаскивая их вверх по течению почти на километр. Причиной грохота была турбулентность бора, который мог бы и опрокинуть корабли.

**ОТВЕТ** • Приливная волна бор может возникнуть, когда огромная масса воды устремляется вверх по реке либо как один бурный вал, либо образовав несколько следующих друг за другом спокойных гребней и провалов. Наилучшие условия для образования бора следующие. 1. Большие приливные изменения уровня воды в том водном пространстве, куда впадает река. 2. Мелкая река с отлогими берегами и воронкообразным устьем. Когда образовавшиеся на глубокой воде волны с большой длиной волны прорываются через узкое отверстие в мелководье устья, а затем в реку, формируется либо волновой фронт, либо водяной вал. При волнистом гидравлическом скачке, его называют *прыжок-волна*, поверхностных водоворотов нет. Гребни и провалы этой волны увеличиваются и по высоте, и в ширину, передняя часть гребней становится более пологой, а затем они переливаются через край, заполняя провалы. В результате формируется один водяной горб — солитон,двигающийся вверх по течению. Бор может быть очень опасен, если возникает неожиданно для лодочников. Исторический пример: в 1843 году дочь знаменитого писателя Виктора Гюго каталась на лодке в нижнем течении Сены. Неожиданно налетевший бор перевернул лодку, и не умевшая плавать молодая женщина утонула.

### 2.33 • ПРИЛИВЫ И ОТЛИВЫ

Что вызывает приливы и отливы? Почему в некоторых местах бывает два прилива в день, а в других один?

**ОТВЕТ** • Основная причина приливов и отливов — гравитационное притяжение океанских вод к Луне, хотя эта сила и не настолько велика, чтобы приподнять воду. Поскольку сила притяжения меняется вдоль поверхности Земли (притяжение сильнее на стороне, обращенной к Луне, и слабее на противоположной стороне), она меняет форму свободной поверхности водных массивов, вытягивая ее в направлении линии,

\* Местное название реки Янцзы в районе Сино-Тибетских гор. Прим. пер.

соединяющей Землю и Луну. Из-за этого распределение воды меняется и океан как бы вспучивается в двух местах: одно «вздутие» на стороне, обращенной к Луне, а другое — на противоположной. Если бы Земля не вращалась, на участках берега вблизи обоих «вздутий» высокая вода (*высшая точка прилива*) держалась бы круглосуточно. Однако Земля вращается, а это означает, что примерно раз в сутки каждый участок берега проходит мимо одного из вздутий. Этим и объясняется существование двух приливов в день.

Однако не все так просто. Поскольку движение воды зависит еще и от внутреннего трения и трения воды о берег, вздутия расположены не строго на линии, соединяющей Землю и Луну. Из-за трения реакция воды на обязанное Луне растяжение запаздывает. А это означает, что в портовых городах высшая точка прилива может сдвигаться на час, а то и больше, относительно времени, когда Луна будет в зените. Например, в Ла-Манше, где беспрепятственное движение воды сильно затруднено, высшая точка прилива запаздывает на много часов.

Еще одна сложность связана с тем, что притяжение Солнца тоже стремится изменить распределение воды. Однако оказывается, что влияние Солнца примерно вдвое меньше влияния Луны. Хотя Солнце гораздо больше Луны, оно еще и гораздо дальше от Земли. Во время новолуния и полнолуния Солнце, Луна и Земля выстраиваются вдоль одной прямой, и приливообразующие силы Луны и Солнца действуют вдоль одного направления, поэтому приливы максимальны. Их называют *сигизийными приливами*. Наоборот, *квадрантурный прилив* — это минимальный прилив, когда приливообразующие силы Луны и Солнца действуют под углом 90° друг к другу. Есть и другие эффекты, влияющие на приливы и отливы. Поэтому в некоторых местах приливы бывают только один раз в день.

## 2.34 • ПРИЛИВЫ В ЗАЛИВЕ ФАНДИ

Впечатляют приливы в заливе Фанди (Канада). Они происходят каждые несколько часов, причем разница уровней воды при приливах и отливах достигает 18 м. Почему же здесь амплитуда прилива столь велика и почему она не достигает таких значений в других местах?

**ОТВЕТ** • Воду в ванне можно заставить колебаться (плескаться), если периодически надавливать на нее (накачивать ее) лопаткой. Осцилляции будут самыми сильными, если рассчитать время так, чтобы надавливание

происходило каждый раз, когда на одном из концов ванны уровень воды самый высокий. В этом случае говорят о *резонансной* накачке, а также о том, что выбранный вами временной интервал совпадает с *периодом собственных колебаний* воды в ванне.

Воду в заливе тоже можно заставить колебаться с большой амплитудой, если имеет место резонансная накачка. Например, в заливах вода обычно плещется под действием приливных сил Луны. Однако, поскольку цикличность приливов не совпадает с периодом собственных колебаний воды в заливе, чаще всего вода лишь слегка колеблется. В заливе Фанди дело обстоит иначе: там период собственных колебаний воды порядка 13,3 ч, что достаточно близко к 12,4 ч — времени между приливами (это время составляет половину лунных суток). Поэтому в заливе Фанди колебания уровня воды значительны.

Согласно многолетним наблюдениям, период собственных колебаний воды в заливе постепенно сдвигается в сторону периода приливных колебаний, поэтому амплитуда прилива в заливе Фанди понемногу растет. Этот сдвиг может быть связан с изменением формы поверхности воды в заливе из-за изменения уровня воды в море.

## 2.35 • МЕРТВАЯ ВОДА

В августе 1893 года у северных берегов Сибири «Фрам», корабль полярной экспедиции под руководством Фритьофа Нансена, попал в зону так называемой *мертвой воды*. Скорость судна, обычно достигавшая 6–7 узлов, в мертвой воде не превышала 1,5 узла, хотя и вода была спокойной, и погода тихой. Более того, корабль был почти неуправляем. Видимых отличий воды в этой зоне от остальной воды в океане не было. Что же привело к падению скорости и почему корабль не слушался руля?

**ОТВЕТ** • Зоны мертвой воды появляются там, где при впадении реки в океан слой относительно пресной воды, не перемешиваясь, растекается по соленой воде. Существенную роль в этом играет наличие двух поверхностей раздела между разными средами: это поверхность раздела воздух — пресная вода и поверхность раздела пресная вода — морская вода. В обычных условиях большая часть энергии корабельного двигателя тратится на создание поверхностных волн на границе раздела воздух — океанская вода. Можно сказать, что потери энергии при создании волн — одна из форм аэродинамического сопротивления, препятствующего движению корабля. В мертвой воде корабль создает две системы волн

на обеих поверхностях, а это означает, что аэродинамическое сопротивление существенно увеличивается. Чем быстрее корабль пытается двигаться, тем быстрее его энергия передается так называемым *внутренним волнам* на поверхности раздела пресная вода — соленая вода.

Нос корабля располагается выше первого гребня внутренней волны. Вода непосредственно под этим гребнем движется в направлении, противоположном направлению движения корабля, и тормозит его. Форма корпуса «Фрама» оказалась такой, что руль также располагался над гребнем волны и поэтому никак не мог помочь капитану управлять кораблем.

### 2.36 • ТОРНАДО

Торнадо случаются во многих местах по всему миру, но в центральной части Соединенных Штатов есть *аллея торнадо* — большое пространство, где торнадо может возникнуть практически в любой момент. Человек испытывает перед торнадо благоговейный трепет и страх. Каждый, кто видел и пытался спрятаться от торнадо, знает: этот смерч одновременно и прекрасен, и ужасен. Почему же возникают торнадо и почему на аллее торнадо они происходят так часто? Как торнадо разрушает дома: стены вываливаются наружу или падают внутрь? Иногда в популярных книжках рассказывается, что воздушные потоки при торнадо, бывает, впечатывают солому в деревянную стойку бара. Такое и впрямь возможно?

**ОТВЕТ •** Торнадо — мощный атмосферный вихрь, образующийся при сильной грозе, если теплый, насыщенный паром воздух движется ниже сухого и холодного воздуха и эти два воздушных массива двигаются в противоположных направлениях. Когда теплый воздух, поднимаясь вверх, проходит через холодный воздух, водяной пар конденсируется и образуются водяные капли. Этот процесс сопровождается существенным выделением тепла, благодаря чему нагретый воздух устремляется вверх с еще большей скоростью. Сложное движение воздуха (движение воздушных масс в противоположных направлениях и ускорение поднимающегося вверх теплого воздуха) приводит к так называемому *сдвигу ветра*, когда скорость соседних воздушных потоков сильно разнится и по величине, и по направлению. По не слишком понятным до сих пор причинам в таких условиях могут образовываться воздушные вихри, а затем и торнадо. Хотя этот процесс можно моделировать на мощных компьютерах,

простой ответ, указывающий на причину возникновения торнадо, получить не удастся. Неясно и почему торнадо обладают таким большим запасом энергии.

Торнадо можно видеть только тогда, когда смерч подхватывает с земли и несет с собой грязь и другой мусор, или при значительной конденсации пара в водяные капли. Возможно, мощные торнадо состоят из нескольких небольших вихрей, вращающихся вокруг одного большого центрального вихря. Торнадо бывают разных форм. Они могут напоминать воронки, столбы или канаты (змей). Некоторые торнадо почти вертикальны, а другие, прежде чем опуститься, становятся почти горизонтальными. Кажется, что все торнадо двигаются, причудливо изгибаясь, перемахивая через целые деревни, а иногда опускаются вниз, оставляя на земле глубокие отметины.

В противовес распространенным представлениям, для домов торнадо представляет опасность не из-за внезапного понижения давления воздуха, когда стены неожиданно вываливаются наружу. На самом деле давление падает не слишком сильно. Поэтому при приближении торнадо не тратьте время, не открывайте окна, надеясь, что в доме давление воздуха сравняется с давлением во дворе. Бегите! Прячьтесь! Лучше всего укрыться в подвале, но, если подвала нет, ванная комната с системой водопроводных труб и ванной, которая может служить хоть каким-то щитом, тоже подойдет.

Угрозу для дома представляют воздушные потоки большой скорости, сопровождающие торнадо. Попад под карниз, они могут сорвать с дома крышу. Поскольку при этом целостность конструкции нарушается, стена с наветренной стороны обрушится внутрь дома, а остальные три распадутся наружу. Хотя в «Волшебнике Изумрудного города» торнадо поднял и унес домик Элли, это маловероятно. Скорее, дом развалится на части, а его обломки разлетятся в разные стороны. Они, как шрапнель, могут даже разнести соседний дом. Если дом не развалился на части, его может развернуть вокруг какой-то закрепленной оси, возможно, вокруг водопроводной трубы в ванной комнате. Для дома это кончится тем, что он будет ориентирован по-новому.

Воздушные потоки торнадо бывают настолько сильны, что могут впечатать солому в какой-нибудь деревянный предмет, а деревянную палку — в стальную трубу. Когда воздушные потоки торнадо моделировали в лаборатории, стреляя из пневматической пушки щепками, зубочистками и соломенными вениками, они застревали в деревянных мишенях.



## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 2.37 • КАК ВЫГЛЯДИТ ТОРНАДО ИЗНУТРИ

Не многим довелось на собственном опыте испытать, что происходит внутри воронки торнадо. Наиболее детально это описал капитан Рой Холл, чей дом оказался на пути торнадо в мае 1948 года. Когда с дома сорвало крышу и часть стен рухнула внутрь, Холл увидел соседний дом и успокоился, удостоверившись, что его дом не летит по воздуху, как ему показалось сначала. Однако через мгновение он оцепенел от ужаса: всего лишь в 20 м от него, на высоте около 6 м над землей висело нечто. Это нечто медленно колебалось вверх и вниз. Оно было изогнуто, и его вогнутая поверхность была повернута к Холлу. Он был потрясен собственной догадкой о том, что эта парящая штука — внутренняя поверхность воронки торнадо, а значит, *он оказался внутри этой воронки!*

Он заглянул в эту раскачивающуюся и непрерывно изгибающуюся воронку, которая, казалось, вытянулась вверх метров на триста. В центре воронки имелась светящаяся область. Когда воронка изгибалась, по всей ее длине образовывались кольца. Не было видно ничего, что воронка тащила бы за собой. Холл мог нормально дышать (значит, давление воздуха не было слишком низким), вокруг было невероятно тихо (в отличие от страшного рева, оглушившего его при приближении торнадо). Неожиданно воронка отодвинулась, и родня Холла, выбравшись из укрытия, обнаружила его в сильнейшем волнении, но целого и невредимого.

### 2.38 • ВОДЯНЫЕ СМЕРЧИ И ОБЛАЧНЫЕ РУКАВА

Что вызывает смерчи на воде, эти огромные водяные воронки? Почему иногда лодкам удается спастись при встрече с водяным смерчем?

**ОТВЕТ** • Обычно водяные смерчи образуются над водой там, где сильный восходящий поток воздуха окружен областью нисходящего воздушного потока. Воздух, который втягивается в восходящий поток, уносит с собой мелкие капельки воды и отбирает тепло у верхних слоев воды. Он теплее и влажнее, чем окружающий его в воронке воздух. Теплый воздух устремляется вверх, но затем влага начинает конденсироваться, образуя водяные капли. Это превращение сопровождается

выделением большого количества *тепловой энергии*, за счет чего воздух нагревается еще сильнее, а значит, увеличивается и скорость его движения вверх. Такой процесс называется геоконвекцией, и именно он управляет движением водяного смерча. Окружающий смерч воздух, особенно если он охлаждается из-за дождя, опускается, занимая место воздуха, поднявшегося по воронке. Водяной смерч напоминает торнадо, его даже часто описывают как очень слабое торнадо. Но геоконвекция, управляющая водяным смерчем, и неустойчивость воздуха, приводящая к возникновению восходящего потока, скорее сродни пыльному вихрю\*.

Хотя часто лодки справляются со слабыми водяными вихрями, более сильные вихри могут значительно повредить и даже перевернуть лодку среднего размера.

Нижний конец водяного смерча окружен своеобразным футляром — вращающимся облаком из водяной пыли. Нижнюю треть воронки видно благодаря поднявшейся по ней воде, а верхнюю часть можно увидеть, если образовались капли, рассеивающие солнечный свет.

### 2.39 • ПЫЛЬНЫЕ ВИХРИ, ВИХРИ В ТУМАНЕ, ТУМАННЫЕ ВИХРИ

Пыльные вихри — частое явление в жарких странах, но, случается, они образуются и на холодной поверхности Марса. Такие вихри видны благодаря пыли, грязи и всякому мусору, подхваченному ими с земли и поднятому вверх. Часто пыльные вихри маленькие и безобидные, но иногда они очень высокие, до километра высотой, и достаточно мощные, способны поднять с земли небольшое животное или даже ребенка. Высота марсианских пыльных вихрей может достигать 6 км.

Вихри в тумане — небольшие завихрения в тумане, а туманными вихрями называют вихри, образующиеся над водой в холодные дни. И те и другие живут недолго и безопасны.

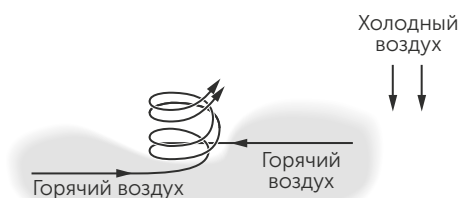
Что является причиной образования всех этих вихрей?

**ОТВЕТ** • Подобные вихри образуются благодаря неустойчивости, возникающей, если более холодный воздух располагается поверх более теплого. Например, пыльный вихрь может появиться, если яркий солнечный свет сильно разогреет землю, которая, в свою очередь, разогревает тонкий слой воздуха вблизи

\* В англоязычных странах пыльный вихрь называют пылевым дьяволом (dust devil). *Прим. пер.*



поверхности. Горячий воздух малой плотности должен подниматься от поверхности земли вверх, но, если в данном месте совсем безветренно или ветер очень слаб, холодный воздух, как одеялом, накрывает слой теплого воздуха. Такое расположение слоев воздуха нестабильно, и даже выскочивший из кустов кролик может инициировать стремительный выброс горячего воздуха вверх. Массы горячего воздуха устремляются по земле к месту прорыва «холодного одеяла», закручиваются вблизи него и формируют поднимающийся вверх столб горячего воздуха. Это и есть пылевой вихрь (рис. 2.12). Вихрь может закручиваться либо по часовой стрелке, либо против в зависимости от потока воздуха над землей и встречающихся на его пути препятствий. Опускаясь, окружающий вихрь холодный воздух вытесняет вверх горячий воздух, который уносится вместе с пыльным вихрем.



**Рис. 2.12 / Задача 2.39.** Закручивающийся вверх поток горячего воздуха,двигающийся вдоль нагретой земли. Холодный воздух опускается.

Пыльный вихрь может переместиться с земли на воду, но, пока он не захватит достаточное количество воды, разглядеть его будет трудно. Единственным свидетельством, указывающим на существование такого вихря, будут круги, которые он оставляет на воде.

В тумане вихри образуются, если туман поднимается над местом, покрытым мокрой, ярко освещенной травой. Трава нагревает воздух непосредственно над собой, и он поднимается вверх наподобие горячего воздуха в пыльном вихре. Однако влага в воздухе конденсируется с образованием капель. Это процесс, сопровождающийся выделением большого количества тепла, благодаря чему нагретый воздух поднимается еще быстрее.

Туманный вихрь может появиться над водой, когда температура воздуха ниже температуры замерзания, а температура воды выше этого значения. Тогда воздух непосредственно около воды теплее, чем воздух в вышине, а такое состояние неустойчиво.

Когда за окном очень холодно, вы можете сами создать миниатюрный туманный вихрь. Для этого

поместите в комнате под окном широкий контейнер и наполните его очень горячей водой. Затем откройте окно, так, чтобы холодный плотный воздух, прошедший через окно, оказался над водой. Горячий воздух и водяной пар, поднимающиеся над водой, устремляются вверх со все увеличивающейся скоростью, поскольку холодный воздух плотнее и конденсация водяного пара идет с выделением тепла. Надо еще принять во внимание горизонтальную силу, обусловленную потоком холодного воздуха через окно. В условиях небольшой турбулентности сложное движение вверх и по горизонтали способно привести к образованию короткоживущих вихрей. Увидеть их можно будет благодаря конденсации водяных капель.

## 2.40 • КРУГОВЫЕ ВИХРИ

Как курильщикам удается пускать дым кольцами? Почему, приближаясь к стене, такие кольца увеличиваются в размерах? Как дельфинам удается создавать похожие кольца из воздуха в воде?

**ОТВЕТ •** Кольца дыма — *круговые вихри*, вырывающиеся из наполненного дымом рта при сильном выдохе. Когда курильщик выпускает дым и воздух через округленные губы, вблизи губ поток тормозится из-за трения и, следовательно, отстает от потока в центре отверстия. Это приводит к тому, что вокруг губ поток выгибается наружу, и возникает вихревое движение. Дым просто играет роль маркера, позволяя увидеть движение воздуха.

Когда кольцо дыма приближается к стене, трение потока воздуха о стену приводит к расширению кольца. Скорость вращения воздуха уменьшается, как уменьшается скорость фигуриста, когда он вращается на носке конька и расставляет руки.

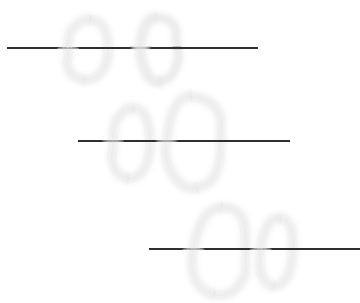
Как и курильщики, дельфины тоже любят играть круговыми вихрями и умеют их создавать разными способами. По-видимому, самый обычный из них такой: дельфин плывет на боку, помахивая из стороны в сторону хвостовым плавником, находящимся в этот момент в вертикальном положении. Когда плавник двигается в воде, трение замедляет поток вблизи него, вызывая завихрения, из которых потом формируется круговой вихрь в вертикальной плоскости. Затем дельфин разворачивается, вставляет свое дыхало\*

\* Дыхало — дыхательное отверстие у китообразных. У дельфинов дыхало располагается на вершине головы. *Прим. пер.*

в круговой вихрь и выдыхает воздух в его центр, откуда он быстро распределяется по всему вихрю. Воздух помогает вихрю держаться на воде, а также выступает как маркер. Дельфин, играя, гоняется за вихрем, проплывает сквозь него. Он создает следующий кольцевой вихрь или разрывает вихрь на кусочки, которые, загибаясь, образуют вторичные вихри меньшего размера.

В классе создать вихрь можно с помощью *воздушной пушки*. Это коробка с круглым отверстием спереди, а сзади вместо стенки натянут гибкий материал (например, пластиковый мешок для мусора). Если оттянуть пластиковое покрытие наружу, а затем его отпустить, оно выталкивает струю воздуха через круглое отверстие. Точно так же, как при выпускании колец дыма, поток образует круговой вихрь, правда, без маркера. Можно испугать человека в другом конце комнаты, если, используя воздушную пушку, направить на него потихоньку большой круговой вихрь.

Также круговой вихрь получится, если капнуть жидкость либо в ту же самую жидкость, либо в любую другую жидкость, с которой она способна смешиваться. Вихрь формируется, когда капля ударяется о поверхность жидкости и пробивает ее. Чтобы увидеть, как он образуется, надо добавить в каплю чуть-чуть краски.



**Рис. 2.13 / Задача 2.40.** Догоняющее кольцо дыма проходит через переднее кольцо.

Если один круговой вихрь следует за другим, а их центры располагаются примерно на одной оси, второй вихрь может зацепиться за первый. В зависимости от обстоятельств эти два вихря могут либо слиться, образовав один большой вихрь, либо устроить «игру», напоминающую чехарду (рис. 2.13). Догоняющий вихрь сжимается и начинает вращаться быстрее, а первый вихрь расширяется, вращаясь медленнее. Затем второй вихрь проходит через первый и становится ведущим. «Перепрыгивание» вихрей друг через друга может происходить несколько раз. Его можно наблюдать

и в том случае, если быстро, одну за другой, капнуть две капли на поверхность жидкости. Если каждая капля приводит к созданию кольцевого вихря, второй вихрь может пройти сквозь первый.

## 2.41 • СИФОНЫ И ТУАЛЕТЫ

Почему сифоном можно откачать жидкость из сосуда (рис. 2.14)? Другими словами, почему жидкость поднимается по вставленной в нее трубке? В частности, жидкость вверх по трубке выталкивает атмосферное давление? Чем ограничена высота подъема? Почему свободный конец сифонной трубки должен быть ниже конца, вставленного в сосуд?

**ОТВЕТ •** Чтобы начать откачку, выходное колено сифона должно быть до конца заполнено жидкостью (это можно сделать с помощью груши-помпы, выкачивающей жидкость из сосуда). Хотя жидкость не твердая, а текучая субстанция, она тем не менее способна противодействовать внешнему усилию (говорят, обладает когезией). Это значит, что соседние элементарные объемы жидкости притягиваются друг к другу. Когда жидкость начинает вытекать из выходного колена сифона, жидкость сверху «перетягивает» новые объемы жидкости через изгиб, а те, в свою очередь, подтягивают вверх новые порции жидкости. Это напоминает вытягивание веревки или цепи из сифонной трубки. До тех пор пока участок цепи вне контейнера длиннее того, что остается в нем, сила тяжести вытягивает новые звенья цепи вверх, помогает им преодолеть изгиб сифона и направляет вниз по выходному колену.

Вопреки распространенному мнению, не атмосферное давление выталкивает жидкость вверх по сифонной трубке. На самом деле изменение атмосферного давления на работу сифона не влияет.

Говорят, что при подъеме жидкости по сифонной трубке на нее действуют *растягивающие напряжения*: каждый элементарный объем жидкости растягивается и вверх, и вниз. Может показаться неожиданным, но жидкость способна выдерживать растягивающие напряжения до тех пор, пока они не превосходят некоторое предельное значение, но если этот предел превзойден, в воде неожиданно начинают образовываться пузырьки, куда идет испарение. Высоту сифона можно повышать до тех пор, пока в верхней части сифонной трубки не образуются пузырьки. После этого водяной столб разрывается, сифон перестает откачивать воду, а вода, оставшаяся в сифоне, просто вытекает из него.

Сифон перестает работать и в том случае, когда воздух, просачиваясь во внутреннее колено сифонной трубки, собирается сверху и разрывает водяной столб. Такое часто случается в обычных туалетах. Когда вы сливаете воду из бачка в унитаз, давление в нижней части бачка увеличивается и проталкивает воду в канализационную трубу, имеющую форму сифонной трубки. Вода и все, что в ней плавает, откачиваются до тех пор, пока почти вся вода не вытечет из бачка. Может случиться, что воздух попадет в сифон и вода перестанет откачиваться. Обычно вода из бачка льется в унитаз еще несколько минут, но этого недостаточно, чтобы сифон опять начал функционировать. Однако он служит барьером, ограждающим вас от запаха из канализационной трубы.

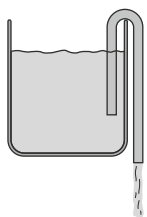


Рис. 2.14 / Задача 2.41. Сифонная трубка.

## 2.42 • БЕГАЮЩИЕ ПО ВОДЕ ШЛЕМОНОСНЫЕ ВАСИЛИСКИ

Как дневным ящерицам, шлемоносным василискам, удается бегать по воде и не тонуть? Так убегают от хищников не только молодые и легкие василиски, но и ящерицы постарше и потяжелее.

**ОТВЕТ** • Василиск начинает бег с удара задней лапой по воде. В результате удара возникает поддерживающая его сила, направленная вверх. Но поскольку вода — жидкость с малой вязкостью, вскоре лапа начинает погружаться в воду. При этом благодаря кожным складкам на пальцах она захватывает с поверхности пузырек воздуха, который двигается вниз и назад. Толчок назад приводит к появлению направленной вперед силы, позволяющей василиску бежать. Поскольку василиску не нужно, чтобы его лапа испытывала сопротивление воды, он поднимает лапу до того, как воздушная полость под ней заполнится водой. Но к этому моменту по воде ударяет вторая лапа. Хотя василиски немного погружаются в воду, в результате чередующихся ударов задними лапами о воду средняя сила направлена вверх. Этой силы достаточно, чтобы удержать на воде даже взрослую особь.

## 2.43 • СВИНЦОВЫЙ БРУСОК, ПЛАВАЮЩИЙ В ЛОДКЕ

Предположим, вы сидите в лодке, плавающей в небольшом бассейне на заднем дворе. С собой в лодку вы взяли деревяшку и брусок свинца. Что произойдет с уровнем воды в бассейне, если выбросить деревяшку на траву, деревяшку в воду, брусок на траву, брусок в воду?

Что произойдет, если в дне лодки проделать небольшую дырку, так что вода будет понемногу затапливать лодку? Если уровень воды в бассейне меняется, это произойдет сразу после того, как вода начнет поступать в лодку?

**ОТВЕТ** • Плавающий предмет вытесняет воду, то есть занимает место, которое иначе занимала бы вода. Объем вытесненной воды определяется из следующего простого правила: масса вытесненной воды равняется массе предмета. Поэтому если кусок дерева весом 1 кг плавает в воде, он будет погружаться до тех пор, пока не вытеснит объем воды, масса которого равна 1 кг. Деревяшка вытесняет именно этот объем воды вне зависимости от того, плавает она в лодке или просто в воде. Когда вы выбрасываете деревяшку из лодки в воду, количество вытесненной воды не изменится, а значит, не изменится и уровень воды в бассейне. Но если вы выкинете ее на траву, она больше не будет занимать место воды в бассейне и, следовательно, уровень воды понизится.

Когда брусок свинца находится в лодке, на него распространяется то же правило равенства масс. Предположим, брусок весит 1 кг. Тогда он вытеснит объем воды весом 1 кг. Воды потребуется много: объем вытесненной воды окажется примерно в 11 раз больше объема бруска. Если брусок выбросить на траву, он больше не будет вытеснять воду и уровень воды в бассейне сильно понизится. Если вместо этого бросить брусок в воду, он утонет. Объем вытесненной воды теперь равен объему бруска. Он в 11 раз меньше того объема, который вытеснял брусок, плавая в лодке. Уровень воды в бассейне понизится, но не так сильно.

Когда вода начинает поступать в лодку, она все еще остается на плаву и, следовательно, вытесняет то же количество воды. Уровень воды изменится только тогда, когда лодка перестанет плавать, то есть когда она полностью затонет. Тогда уровень воды сразу резко понизится.

## 2.44 • ПЛАВАЮЩИЕ БРУСКИ И ОТКРЫТЫЕ КОНТЕЙНЕРЫ

Открытые контейнеры, такие как тара для пищевых продуктов или бутылок, плавают прямо или наклонно? Если в жидкости плавает длинный брусок с квадратным поперечным сечением, как он будет ориентирован (см. рис. 2.15)?

**ОТВЕТ •** Если какой-то предмет плавает, действующая вверх выталкивающая сила уравнивает направленную вниз силу тяжести. Оказывается, что, если контейнер частично погружен в воду, есть несколько ориентаций, гарантирующих баланс этих сил. Однако большинство таких ориентаций неустойчивы. Это связано с тем, что выталкивающая сила может вызвать вращение контейнера. В общем случае конечную ориентацию предсказать трудно. Вы можете сами в этом убедиться, отправляя контейнер в плавание в раковине или ванне. Вот несколько результатов. Низкий и широкий контейнер будет плавать прямо (дном вниз), но высокий и узкий контейнер наклонится и может даже перевернуться. Похоже, самым неожиданным образом ведет себя легкий контейнер, в который медленно просачивается вода. Когда такой контейнер пуст, он ориентирован прямо, но по мере заполнения водой он все больше наклоняется, а затем угол наклона уменьшается, и перед тем как затонуть, контейнер опять ориентирован прямо.

Ориентация бруска квадратного поперечного сечения зависит от отношения между его плотностью и плотностью жидкости. Поскольку брусок плавает, это отношение больше единицы быть не может. Когда оно близко к нулю, брусок так легкий, что почти не погружается в воду, он плавает гранью вниз. Если понемногу увеличивать плотность материала бруска, он постепенно погружается, но по-прежнему будет плавать вниз гранью. Но когда отношение плотностей становится порядка 0,21, брусок начинает наклоняться, а когда оно достигает 0,28, грани бруска составят угол в  $45^\circ$  с горизонтальной поверхностью воды.

Если и дальше увеличивать плотность жидкости, ориентация бруска не меняется до тех пор, пока отношение плотностей не станет равным 0,72, затем угол наклона начнет уменьшаться. Когда это отношение окажется равным 0,79, брусок опять будет плавать одной из граней вниз. При отношении плотностей, равном единице, брусок, естественно, утонет.



Рис. 2.15 / Задача 2.44. Две ориентации плавающего бруска с квадратным сечением.

## 2.45 • ДЫРА В ДАМБЕ И КОРАБЛЬ В СУХОМ ПЛАВУЧЕМ ДОКЕ

Всем известна легенда о голландском мальчике, который спас свой город от наводнения, заткнув пальцем дырку в дамбе, защищавшей город от наступления Северного моря. Как одному мальчику удалось сдержать натиск всего Северного моря?

Когда судно ставят в плавучий сухой док, из него откачивают воду, и одновременно стены дока сдвигают так, чтобы удерживать судно в нужном положении. Какое минимальное количество воды надо оставить, чтобы корабль держался на плаву?

**ОТВЕТ •** Давление воды на палец мальчика зависит от того, насколько далеко от поверхности воды была замеченная им дырка, а не от ширины или глубины всего моря. Поэтому если предположить, что дырка находилась вблизи поверхности моря, подобная история вполне могла бы быть правдой.

Дать полный ответ на вопрос о сухом доке не получится. Однако способность судна держаться на плаву не зависит от ширины и глубины всей воды в доке. Важна только высота воды у бортов судна. В принципе, если высота воды остается прежней, давление воды приводит к появлению действующей на судно и направленной вверх выталкивающей силы, компенсирующей направленную вниз силу тяжести. Значит, для удержания судна на плаву достаточно даже тонкого слоя воды вокруг его корпуса. Однако слишком тонкий слой нестабилен, и любое случайное возмущение может привести к соприкосновению судна и стенок дока. В этом случае судно уже не сможет удержаться на плаву.



## 2.46 • ОБМОРОКИ ЛЕТЧИКОВ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ

Летчики-асы давно знают, что большие перегрузки на крутых виражах могут привести к потере сознания\*. Организм летчика заранее сигнализирует о возможной опасности. Когда центростремительное ускорение достигает 2 или 3 g, тело летчика тяжелеет. Примерно при 4 g происходит потеря цветового зрения и сужение поля зрения: летчик видит все в черно-белом цвете и теряет способность к периферическому обзору (видит только то, что происходит прямо перед ним, как в тоннеле). Если долго сохраняется ускорение 4 g или оно еще возрастает, зрение теряется полностью, а вскоре после этого летчик теряет сознание. Что вызывает изменения в его состоянии?

**ОТВЕТ •** При больших ускорениях изменяется давление в системе кровоснабжения сетчатки глаза. При этом ухудшается или прекращается поступление кислорода сначала к сетчатке глаза, а затем к зрительной зоне коры головного мозга. В результате у человека ослабляется зрение, затем наступает слепота, и в конце концов происходит потеря сознания. На современных мощных и высокоманевренных реактивных самолетах в условиях близкого боя пилот, выполняя стремительный вираж, может потерять сознание без предупреждения. Если сознание быстро к нему не вернется, самолет либо сорвется в штопор, либо, потеряв управление, столкнется с землей.

## 2.47 • КРОВООБРАЩЕНИЕ ЗМЕЙ, ЖИРАФОВ И ВЫСОКИХ ДИНОЗАВРОВ

Почему у водных змей сердце находится где-то посередине туловища, у наземных оно смещено чуть ближе к голове, а у древесных — гораздо ближе к голове? Каким образом жирафу удастся направлять кровь к голове, не допуская ее скопления в ногах? Как он умудряется избегать нарушения мозгового кровообращения и не падать в обморок, когда на водопое наклоняется к воде? Зауроподы — это динозавры с массивным телом и очень длинной шеей, достигавшей у некоторых видов 9–11 м. Как им удавалось снабжать кровью голову и пить воду?

\* Английский термин, обозначающий это состояние, G-LOC (аббревиатура от G-force induced Loss Of Consciousness), в аэрокосмической физиологии означает потерю сознания при чрезмерных и устойчивых перегрузках. Прим. пер.

**ОТВЕТ •** Когда змея поднимает голову и тянется вверх, ее сердце должно обеспечить ток крови к мозгу, тогда как кровь стремится скопиться в нижней половине ее туловища. Но для водной змеи это не проблема. Давление воды с глубиной увеличивается, а значит, увеличивается и давление на нижнюю половину туловища змеи, и поэтому кровь там не скапливается. Сердце змеи располагается примерно посередине ее туловища: чем выше здесь давление воды и чем оно меньше около головы, тем легче кровеносной системе змеи поставлять кровь мозгу.

Если наземная змея высоко поднимает голову, разность давлений воды ей никак не поможет, и поэтому кровь может скапливаться в нижней части тела, причиняя змее неудобство. Однако наземным змеям повезло: сердце у них расположено не посередине туловища, а ближе к голове. Древесные змеи приспособились еще лучше: их сердце еще больше смещено к голове, а нижняя половина туловища очень плотная, что препятствует скоплению в ней крови. Поэтому такие змеи прекрасно ползают по деревьям, не боясь обморока.

У жирафа с кровотоком еще более серьезная проблема. Из-за того, что его голова находится гораздо выше сердца, кровяное давление должно быть очень высоким. Например, чтобы давление в головном мозге жирафа ростом 4 м оставалось на нужном уровне, а это примерно 90 мм рт. ст., его среднее артериальное давление должно доходить до 250 мм рт. ст. Поскольку ноги жирафа тоже находятся далеко от сердца, очень высокое давление должно было бы приводить к серьезной проблеме из-за скопления в них крови. Однако жирафа выручает строение ног: они у него мускулистые, туго обтянутые кожей наподобие компрессионных чулок. Когда жираф на водопое наклоняет голову, он двигает ею медленно, чтобы кровяное давление успело скорректироваться. Кроме того, чтобы сердце было ниже, он широко расставляет передние ноги. Хотя разветвленная *сеть кровеносных сосудов*, поставляющих кровь мозгу жирафа, в какой-то мере защищает мозг, неожиданное повышение давления может привести к обмороку и даже к нарушению у него мозгового кровообращения.

У зауроподов, даже если они никогда не поднимали голову на максимальную высоту, вопрос о кровоснабжении мозга стоял еще острее. Вероятно, они двигались медленно, что позволяло регулировать давление. Кроме того, у них было громадное сердце, вес которого достигал 5% веса тела.



## 2.48 • ПЛАВАЛИ ЛИ ЗАУРОПОДЫ?

В группу *динозавров-зауроподов* входят, в частности, апатозавры (их еще называют *бронтозаврами*) и *маменчизавры* — динозавры с самой длинной шеей, будто сошедшие с картины художника-сюрреалиста. Даже по меркам динозавров это были огромные животные. По-прежнему открыт вопрос — как они могли не то что бегать, но даже ходить. Одно из предположений состоит в том, что они были полуводными животными и большую часть жизни либо плавали, либо просто бродили в воде. Могли ли такие огромные динозавры плавать?

**ОТВЕТ** • Поскольку нет живых зауроподов и непосредственно наблюдать их образ жизни мы не можем, лучший способ ответить на этот вопрос — построить масштабные модели и посмотреть, смогут ли они плавать. (Отдельная сложная задача — ввести поправку на легкие зауроподов.) Оказалось, что у моделей точка приложения выталкивающей силы несколько смещена назад относительно точки приложения направленной вниз силы тяжести. Подобная модель неустойчива, поскольку момент этих сил будет переворачивать зауропода вперед, пока его шея не погрузится в воду хотя бы частично. Кроме того, он может завалиться на бок. Иными словами, плескаться на мелководье зауроподу не понравилось бы.

Однако если зауропод погрузится в воду по грудь, он сможет передвигаться без проблем. Те из динозавров, у которых передние ноги были длиннее, могли бы, как гондольеры в Венеции, использовать их вместо шеста. В самом деле, удалось найти следы динозавров, указывающие, что они передвигались именно так. Эти следы отличаются от следов динозавров, наступавших при ходьбе на всю ногу, так как при движении «с шестом» динозавр втыкает в грязь концы когтей, а затем вытаскивает их, оставляя узкий желоб с возвышением из выброшенной грязи сзади.

## 2.49 • ГАСТРОЛИТЫ У ДИНОЗАВРОВ И КРОКОДИЛОВ

Почему в желудках многих четвероногих, например живущих сейчас крокодилов или ископаемых плезиозавров, находят *гастролиты* (или *желудочные камни*), а проще — гальку и камешки?

**ОТВЕТ** • Долго считалось, что гастролиты необходимы для пищеварения и что животные с их помощью размельчают пищу в желудке. Есть, однако, убедительные доводы за то, что желудочные камни используются для

уменьшения выталкивающей силы, благодаря чему животное плывет, почти целиком погрузившись в воду. Так крокодил держится на воде, выставив наружу только глаза и нос, и выслеживает из засады добычу, оставаясь почти неподвижным и невидимым. Кроме того, камни служат крокодилу балластом, уменьшая энергию, необходимую, чтобы противостоять течению, и те же камни помогают крокодилу затащить в воду добычу.

Плезиозаврам, способным достаточно глубоко погружаться в воду, гастролиты тоже служили стабилизирующим балластом. У этих животных легкие, помогавшие им держаться на плаву, располагались за длинной и тяжелой шеей. В беспокойной воде плезиозавры могли легко перевернуться, но с камнями в желудке позади легких сохранить устойчивость было легче.

## 2.50 • ЭФФЕКТ КОАНДА

Почему вблизи твердой поверхности поток жидкости сначала изгибается в сторону поверхности, а затем и прижимается к ней? Этот эффект можно наблюдать даже в кухонной раковине, подставив искривленную поверхность под спокойно текущую из крана воду. Например, подставьте под струю горизонтально стеклянную банку так, чтобы струя сначала ударяла по искривленной поверхности, а затем стекала по одной из ее сторон (рис. 2.16а). Иногда поток прилегает к поверхности так плотно, что, достигнув самой низшей точки, он едва не начинает подниматься вверх по противоположной стороне. Если вы подставите под струю воды стержень, держа его под наклоном, и правильно подберете скорость воды, то струя прижмется к стержню и, прежде чем оторваться, может несколько раз обогнуть его по спирали (рис. 2.16б).

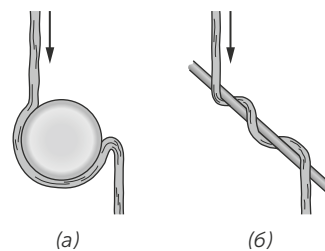


Рис. 2.16 / Задача 2.50. Падающий поток воды наматывается: а) вокруг банки и б) наклонного стержня.

Защищаясь от муравьев, жуки-бомбардиры\* разворачивают заднюю часть брюшка, где расположены железы, и, как из пульверизатора, выстреливают горячей

\* Бомбардиры — жуки из двух подсемейств жужелиц *Brachininae* и *Paussinae*. Прим. пер.

(до 100 °С) токсичной жидкостью. Если муравей атакует, скажем, переднюю ногу бомбардира, жук, целясь в эту ногу, направляет кончик брюшка, как турель пушки, вниз и вперед. Облитый жидкостью муравей быстро ретируется. У пауссинов, менее распространенной разновидности жуков-бомбардиров, задний кончик брюшка не такой подвижный: выстрелить жук может только назад или в сторону. Тем не менее и такой жук метко целится в муравья, даже если тот находится впереди него или вцепился ему в переднюю ногу. Как пауссин может направить струю вперед, когда выстрелить в этом направлении он не может?

**ОТВЕТ** • Отклонение потока по направлению к твердой поверхности, приводящее к прилипанию, называется *эффектом Коанда* по имени открывшего его румынского инженера Анри Коандэ. Предположим, что вода течет достаточно близко к твердой поверхности. Струя *увлекает* за собой воздух, то есть захватывает соседние молекулы воздуха, которые в результате уносятся потоком жидкости. При этом возникает поток воздуха (движение молекул воздуха, находящихся дальше от струи воды), стремящийся заместить ушедшие с водой молекулы воздуха. Однако твердая поверхность препятствует притоку воздуха, и давление воздуха между струей и поверхностью падает (эффект Бернулли). При этом с другой стороны струи давление остается атмосферным, и струя, прижимаясь к твердой поверхности, прилипает к ней. Прилипание может наблюдаться даже в том случае, когда поверхность отогнута от изначального направления течения воды.

У пауссинов есть выступы сразу перед отверстием железы, из которой они стреляют. Чтобы направить струю вперед, отверстие ориентируется так, чтобы струя ядовитой жидкости попала в выступ. В соответствии с эффектом Коанда струя, огибая закругления выступа, может отклониться на угол до 50°. Оторвавшись от выступа, она движется по воздуху в виде тонкой струйки. Жук контролирует, в какое место на выступе попадает струя, выпущенная из железы, и таким образом может контролировать, куда в конечном счете она будет направлена.

### 2.51 • ЭФФЕКТ ЧАЙНИКА

Если носик чайника (или любого другого сосуда для жидкостей) имеет правильную форму, вода хорошо течет из него и попадает туда, куда ей положено, например в чашку. Неправильно выполненный носик чайника

приводит к так называемому *эффекту чайника*: вместо того чтобы спокойно течь струей, вода затекает под носик чайника, сбегает по нему вниз на расстояние до нескольких сантиметров, а затем отрывается и летит на скатерть (рис. 2.17). Даже если струя не прилипла к нижней стороне носика, она может изогнуться дугой в сторону чайника. Конечно, это прилипание или непредсказуемый изгиб струи воды могут обернуться неприятностью. С чем же связан эффект чайника?

**ОТВЕТ** • Если вода вытекает достаточно быстро, скорее всего, в воздухе струя воды будет двигаться так, как мы ожидаем. В этом случае говорят: струя движется по баллистической траектории. Название связано с тем, что, если из носика чайника «выстрелить» твердым предметом, он будет двигаться так же. Неожиданности начинаются, если вода из носика течет недостаточно быстро. Дело в том, что давление в поперечном сечении струи непостоянно: на поверхности воздух — вода давление остается атмосферным, но вблизи того места, где вода переливается через край носика чайника, она движется быстрее, и там давление понижено. Повышенное внешнее давление прижимает струю к краю носика. Если струя вытекает достаточно быстро, она перетекает через край носика и отрывается, образуя выгнутую в сторону от чайника дугу.

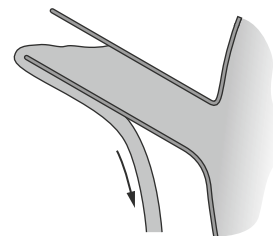


Рис. 2.17 / Задача 2.51. Струя воды, прилипшая к носику чайника.

Если вода вытекает медленнее, точка, где струя в последний раз касается носика чайника, может оказаться на нижней стороне носика. Обычно такое прилипание связывают со взаимным притяжением молекул воды и молекул материала, из которого сделан носик чайника. Прилипание часто трактуется как результат действия *поверхностного натяжения* и обычно приводится как пример *смачивания* твердой поверхности жидкостью. Однако основная причина, по которой струя, вытекающая из чайника, стекает вниз по его носику, — давление воздуха. Даже если смазать

маслом нижнюю поверхность носика, чтобы уменьшить на ней взаимное притяжение молекул и исключить смачивание, медленная струя по-прежнему будет стекать вниз вдоль носика чайника.

Место отрыва струи от носика чайника определяется многими факторами. Даже если экспериментировать с одним и тем же чайником и контролировать скорость вытекания воды, расстояние, на котором струя оторвется от носика чайника, от раза к разу может меняться. Для того чтобы исключить «эффект чайника», у края носика снизу можно сделать небольшое отверстие. Когда струя достигает этого отверстия, резкое изменение кривизны поверхности приводит к отрыву потока (*прерывает поток*). Сходная техника используется на подоконниках для борьбы с эффектом чайника: дождевая вода не должна затекать под подоконник и попадать на стену. Снизу у подоконника имеется узкий вертикальный разрез, благодаря которому поток воды отрывается от края подоконника далеко от стены. Чтобы эффект чайника не мешал сливать жидкость, например из кастрюли, достаточно подставить вертикально нож или брусок в том месте, где выливается жидкость. Жидкость прижмется к ножу или бруску вместо того, чтобы стекать вниз по стенке кастрюли.

Некоторые фонтанчики для питья тоже проявляют эффект чайника: когда вода перетекает через край поддона, она либо стекает по нему снизу, либо, выгибаясь, образует вокруг фонтанчика что-то вроде ниспадающей завесы. Если поддон имеет форму круга, стекающая вода может образовать замкнутую поверхность, которую называют *водяным колоколом*.

## 2.52 • ВСПЛЫТИЕ ПОСЛЕ ГЛУБОКОВОДНОГО ПОГРУЖЕНИЯ

Почему глубоководный водолаз, которого поднимают на поверхность, должен переждать какое-то время на определенной глубине и почему его нельзя поднимать без остановок? Почему многие водолазы после такой процедуры чувствуют себя хорошо, но испытывают боль, если им приходится лететь самолетом вскоре после погружения? (Боль дает о себе знать после взлета.) Киты часто погружаются на большую глубину и быстро всплывают. Это как-то вредит им?

**ОТВЕТ •** Если при погружении водолаз вдыхает воздух под давлением, молекулы азота из воздуха растворяются у него в крови и поступают в кровоток. Когда он

всплывает, давление уменьшается и азот должен покинуть кровоток. Если он не успевает это сделать, в крови образуются пузырьки из азота. Пузырьки двигаются вместе с кровотоком. По достаточно крупным сосудам они перемещаются свободно, но, попадая в более мелкие сосуды, застревают, препятствуя кровотоку. Последствия называют *кессонной болезнью*, или *декомпрессией*. Она может привести к сильным болям, инвалидности и даже смерти. Больного с признаками кессонной болезни помещают в барокамеру и заставляют дышать воздухом с повышенным давлением, медленно его понижая, при этом растворенный в крови азот постепенно выходит. Чтобы избежать кессонной болезни, водолаз, всплывая на поверхность, делает несколько остановок, задерживаясь на каждой из них на определенное время, чтобы кровь могла очиститься от азота.

График декомпрессии составлен так, чтобы при всплытии избавиться от достаточного количества растворенного азота и исключить образование азотных пузырьков. Однако оставшийся растворенный азот все еще может собираться в пузырьки, если водолаз вскоре после всплытия приходится лететь на самолете. Хотя в современных самолетах в салоне давление поддерживается, оно все же ниже нормального атмосферного давления на уровне земли. При пониженном давлении азотные пузырьки могут образовываться вновь.

Хотя раньше считалось, что киты защищены от опасностей, связанных с погружением глубоко под воду, есть основания полагать, что и они страдают от кессонной болезни, особенно если всплывать им приходится быстро.

## 2.53 • КАК ЛЮДИ И СЛОНЫ ПЛАВАЮТ ПОД ВОДОЙ

Под водой пловец дышит через трубку, конец которой находится над поверхностью воды. Почему длина трубки не может превышать 20 см? Почему так опасно увеличивать ее длину, помимо затрудненной циркуляции воздуха в трубке? Слон, используя хобот вместо трубки, тоже может плавать под водой. Как ему удастся остаться в живых, если обычно он погружается на глубину около двух метров?

**ОТВЕТ •** Поскольку с глубиной возрастает давление воды на ныряльщика, увеличивается и кровяное давление. Если ныряльщик плавает, задерживая дыхание, давление в легких тоже увеличивается. Тогда кровяное давление и давление воздуха в легких совпадают,

что обеспечивает непрерывную поставку кислорода в кровь и удаление оттуда углекислого газа. Однако когда ныряльщик дышит через трубку, давление воздуха в легких падает до атмосферного. Уменьшение давления не слишком значительно, если пловец остается вблизи поверхности воды. При большей глубине погружения несовпадение кровяного давления и давления в легких становится опасным и может даже привести к летальному исходу, если происходит так называемая *пневмпрессия*, или *сдавление легких*. В этом состоянии в легких разрываются небольшие кровеносные сосуды и кровь проникает в легкие.

Кажется, что легкие взрослого слона, использующего хобот как трубку, сдавливаются всякий раз, когда он плавает под водой. Его легкие находятся под водой на глубине около двух метров, а это значит, что разность давления воздуха в легких и давления крови значительна. Однако легкие слона имеют специальную защиту. У всех млекопитающих легкие окружены *плеврой* — предохраняющей мембраной. Особенность слонов в том, что их плевро заполнена соединительной тканью, которая поддерживает и защищает небольшие кровеносные сосуды в стенках легких. Поэтому они и не рвутся при плавании под водой.

## 2.54 • ГЛУБОКОВОДНОЕ ПОГРУЖЕНИЕ И КАК СПАСТИСЬ ИЗ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

Одно из правил безопасности при погружении с аквалангом — перед тем как подняться на поверхность, надо вдохнуть. Какие опасности могут подстерегать аквалангиста при всплытии? Можно ли спастись из потерпевшей аварию подводной лодки, если, набрав полные легкие воздуха, попытаться выплыть на поверхность? Спортсмены, занимающиеся фридайвингом\*, и ама, ныряльщики за жемчугом в южной части Тихого океана, погружаются, набрав полные легкие воздуха. Опасно ли это? В чем опасность очень быстрого снижения давления воздуха в гидрокостюме при глубоководном погружении?

**ОТВЕТ •** При погружении давление на тело пловца сильно возрастает с увеличением глубины. Если на дне водоема вдохнуть воздух из баллона, а затем всплывать, задерживая воздух, внешнее давление будет падать, а легкие поэтому будут расширяться, пока их размер не достигнет некоторого предельного значения. Если

\* Фридайвинг — подводное плавание на задержке дыхания. *Прим. пер.*

воздух не выдыхать, давление в легких может превысить кровяное давление. Это опасно и может привести к смертельному исходу. Каждый год по этой причине погибает несколько аквалангистов.

В принципе, можно выплыть на поверхность и из потерпевшей аварию подводной лодки, если, конечно, лодка погрузилась не слишком глубоко и моряк при всплытии будет выдыхать воздух. Но выдыхать нужно, придерживаясь строго определенных правил, хотя интуитивно и кажется, что, поскольку впереди наводящий ужас подъем с неизвестной глубины, воздух надо удерживать. Еще страшнее непреодолимое желание сделать вдох. Потребность в очередном вдохе определяется вкладом углекислого газа в давление в легких. Когда обусловленное углекислым газом давление достигает определенного критического значения, желание сделать вдох становится непереносимым. Если при всплытии правильно выдыхать воздух, критическое давление углекислого газа достигается на некотором расстоянии от поверхности. Если удастся пройти эту точку, дальнейший подъем будет сравнительно легким.

Команду подводной лодки можно вызволить, опустив к подводной лодке камеру в форме колокола. Именно такая камера использовалась при спасении 33 членов команды американской подводной лодки «Сквалус», потерпевшей крушение на глубине около 80 м в мае 1939 года\*\*. С пришедшего на помощь корабля водолазы спустили направляющий трос к люку подводной лодки. Затем вдоль этого троса они опустили камеру. В открытую снизу камеру вода не поступала, поскольку внутрь закачивался воздух до соответствующего давления. Достигнув входного люка, камера герметично присосалась к кольцу вокруг него. Закрепив камеру, давление воздуха в ней уменьшили, открыли люк, через который несколько членов команды попали в камеру и были подняты на поверхность.

При фридайвинге умение сдерживать дыхание при длительном погружении достигается тренировкой, позволяющей увеличить объем легких и уменьшить частоту вдохов. Помогает и так называемый *рефлекс ныряния* — шок, связанный с погружением головы в холодную воду, приводит к спазму, препятствующему вдыханию воды, и изменениям в работе сердца, что уменьшает расход кислорода. Обычно при погружении используют какой-то тяжелый предмет (чаще

\*\* Операция по спасению команды подводной лодки «Сквалус» была первой, где был использован спасательный колокол. *Прим. пер.*



всего прикрепленный к поясу), который отбрасывают по окончании погружения. Однако даже без дополнительной тяжести при погружении выталкивающая сила может стать меньше веса. При погружении легкие ныряльщика сжимаются и его объем становится меньше, выталкивающая сила уменьшается и результирующая сила становится направленной вниз.

Такие физиологические изменения происходят, если погружение начинается с поверхности и легкие ныряльщика заполнены воздухом. Однако если начать погружение из опущенной в воду камеры и дышать воздухом (или другой газовой смесью, содержащей кислород) при давлении окружающей воды, ныряльщик не должен испытывать дискомфорт. Хотя погружение в самые глубокие океанские впадины кажется невероятным, с точки зрения физиологии ничего невозможного в этом нет.

Когда глубоководные работы выполняются в водолазном скафандре, воздух подается через шланг в защитный шлем. Насос на выходящем на поверхность конце шланга увеличивает давление в костюме так, чтобы оно совпадало с давлением воды. Если насос начинает действовать с перебоями или ломается, предохранительные клапаны закрываются, чтобы не допустить понижения давления в костюме до атмосферного. Раньше, когда таких защитных клапанов не было, при поломке насоса напор воды буквально впечатывал скафандр в тело водолаза.

## 2.55 • ТРАГЕДИЯ НА ОЗЕРЕ НИОС

В августе 1986 года в долине высокогорного озера Ниос на северо-западе Камеруна погибли около 1700 человек, весь домашний скот, птица, дикие животные и даже насекомые. Смерть вызвал какой-то ядовитый газ или аэрозольное облако. Специалисты, добравшиеся туда через несколько дней, пришли к выводу, что, скорее всего, причиной катастрофы было само озеро, а не выброс токсичных вулканических газов. Как озеро могло стать источником ядовитого газа?

**ОТВЕТ** • Вода в озере отличается большим содержанием растворенного диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ). В донных слоях его концентрация особенно высока из-за большого давления воды. Вероятно, по какой-то причине вода из донных слоев переместилась к поверхности, что привело к выделению пузырей газа, всплывших на поверхность. Пузыри вырывались из воды с такой силой, что по озеру пошли мощные волны, затопившие низины на южном

берегу. Собравшийся над озером диоксид углерода превратился в туман и быстро распространился за его пределы, окутав всю долину. Все, кто оказался на пути этого смертоносного облака, задохнулись.

Вероятно, мы никогда не узнаем, что именно привело к подъему придонных слоев воды озера Ниос. Это могли быть холодные дожди, выпавшие только на одной половине озера, в сочетании с очень сильным ветром в этом месте. Поскольку дождевая вода холоднее, а значит, и плотнее воды в озере, ее скопление на поверхности нарушило равновесие. Если сильный ветер гнал слои дождевой воды по поверхности озера и они опускались на дно, это могло привести к выталкиванию донных слоев в противоположном конце озера. Когда вода постепенно поднималась из глубины, давление понижалось и газ начинал выделяться из раствора.

Диоксида углерода в озере Ниос по-прежнему очень много, и ученые боятся, что может произойти новый смертельно опасный выброс этого газа. Они предупреждают всех о необходимости, особенно в сезон дождей, держаться подальше от этого озера. Кроме того, на дне озера проложены трубы и вода перемешивается, чтобы не допускать ее насыщения углекислым газом.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 2.56 • ПРЫЖОК ЧЕРЕЗ ДОМ И ПЛАНИРОВАНИЕ В ШЕЗЛОНГЕ

В сентябре 1937 года на поле для гольфа в городе Олд-Орчард-Бич (США) кинохроникер Эл Мингалоне всю вторую половину дня пытался заснять трюк, известный как прыжок через дом. Прикрепив к себе ремнями 27 больших баллонов, наполненных водородом, он раз за разом разбежался, бежал к дому и прыгал вверх, надеясь, что подъемная сила баллонов подхватит его и перенесет через строение. Но все его попытки заканчивались провалом: ему удавалось подняться лишь на 7,5 м, а этого было недостаточно.

Когда начали сгущаться сумерки, он объявил: «Ладно, покончим с этим: в этот раз для хорошего прыжка увеличим число баллонов». Наполнили еще пять баллонов, прикрепили их к ремням, и Мингалоне совершил свой последний за этот день прыжок. Но когда он поднимался, страховочный канат, привязанный одним концом к бамперу машины, а другим к ремням, туго натянулся, а затем лопнул.



Начиналась гроза, а Мингалоне в тусклом свете сумерек дрейфовал в направлении Атлантического океана. Его отец и один из ассистентов сначала в ужасе наблюдали за происходящим, а затем вскочили в машину. К ним присоединился священник местной церкви отец Муллен, предусмотрительно захвативший дальнобойную винтовку 22-го калибра. Втроем на машине они погнались за Мингалоне, но воздухоплаватель, пролетая через дождевые тучи, часто исчезал из виду. Кроме того, машина была сконструирована для езды по дорогам, которые, безусловно, не повторяли в точности траекторию полета Мингалоне.

Через час, когда Мингалоне был на высоте примерно 250 м, автомобилисты его наконец увидели. Они остановились, отец Муллен тщательно прицелился и прострелил три баллона, чтобы Мингалоне мог приземлиться без травм. Уменьшение подъемной силы позволило ему медленно опуститься, но если бы отец Муллен прострелил слишком много баллонов, все могло бы кончиться трагически. Во время полета Мингалоне уронил камеру, но позже ее нашли на картофельном поле. Камера осталась цела, а событие, которое удалось запечатлеть, оказалось гораздо более захватывающим, чем то, которое он изначально пытался заснять.

В июле 1982 года Ларри Уолтерс из Сан-Педро совершил похожий полет, но он сделал это намеренно. Его взлетной полосой была подъездная дорожка к гаражу, а в воздушное путешествие Уолтерс отправился в шезлонге, к которому привязал 42 метеозонда, наполненных гелием. Вначале скорость его подъема составляла 250 м/мин, и вскоре Уолтерс оказался примерно на пятикилометровой высоте. Он попал в воздушный коридор, где его заметили пилоты двух самолетов. Их сообщения о человеке в шезлонге на метеозондах сильно удивило бы авиадиспетчеров международного аэропорта Лос-Анджелеса, если бы один из приятелей Уолтерса не рассказал им об этом по телефону чуть раньше.

Поднявшись до слоев разреженного холодного воздуха, Уолтерс собрался уменьшить подъемную силу и прострелил несколько метеозондов пневматическим ружьем. Но затем из-за сильного волнения и кислородного голодания он выронил ружье. Хотя кислородное голодание приводит к эйфории, Уолтерс испугался, когда его шезлонг вскоре начал вновь набирать высоту. Когда шезлонг стал наконец снижаться, воздухоплаватель контролировал падение, периодически выбрасывая для облегчения шезлонга банки с водой.

Когда Уолтерс был уже недалеко от земли, шары запутались в линии электропередачи, но, к счастью, все закончилось тем, что он повис в двух метрах от земли. Этого расстояния было достаточно и возможность короткого замыкания непосредственно между ним и землей исключалась. Чтобы освобождение Уолтерса не превратилось в казнь на электрическом стуле, спасателям, прежде чем спустить его вниз, пришлось обесточить целый район.

Полет Уолтерса продолжался около полутора часов. Он поднялся на высоту порядка 5 км и пролетел 16 км по горизонтали. Сначала чиновники Федерального управления гражданской авиации недоумевали, в чем можно было бы обвинить Уолтерса: правил, регулирующих полет шезлонгов в коридорах для самолетов, не существовало. Но после шести месяцев раздумий агентство предъявило ему несколько обвинений, включая управление воздушным судном, не имеющим сертификата летной годности. В результате Уолтерсу пришлось выплатить крупный денежный штраф.

## 2.57 • ТЕЧЕНИЕ СТЕКЛА В ОКНЕ СРЕДНЕВЕКОВОГО СОБОРА

Некоторые оконные стекла средневековых соборов снизу толще, чем сверху. Значит ли это, что в продолжение всех прошедших столетий стекло постепенно стекало вниз?

**ОТВЕТ** • Стекло можно считать вязкой жидкостью, способной течь или оседать. Однако, согласно расчетам, стекание вниз происходит слишком медленно.

Потребуется около миллиона лет, чтобы вызвать заметные изменения в средневековых стеклах.

Можно объяснить, почему старинные оконные стекла имеют такую форму, рассмотрев процесс их изготовления. Сначала стекло выдували в форме цилиндра, который затем разрезали и уплощали. Нижняя часть цилиндра могла быть толще верхней, и поэтому одна из частей стекла оказывалась толще. Строители, конечно, устанавливали оконные стекла утолщением вниз.

## 2.58 • СТРАННЫЕ ВЯЗКИЕ ЖИДКОСТИ

Почему кетчуп легче вытекает из бутылки, если ее сначала потрясти? Этот эффект можно наблюдать, когда, пытаясь полить гамбургер, вы вдруг обнаруживаете, что кто-то за вашим столом незадолго до этого встряхнул бутылочку с кетчупом. В результате кетчупа на вашей тарелке оказывается больше, чем гамбургера. Почему чернила легко вытекают из шариковой ручки, когда ею пишут, но не когда она лежит в кармане или в сумке? Почему однослойная краска легко ложится на стену, но не стекает со стены на пол? Почему при комнатной температуре масло можно размазать по хлебу ножом, а само оно не растекается? Почему крахмал, в который добавили немного воды, трудно размешать, если вы стараетесь делать это быстро, но дело пойдет лучше, если размешивать его медленно?

Почему жвачка для рук из кремнийорганического полимера (силикона) или игрушка лизун (слайм) из желеобразного материала на основе поливинилового спирта ведут себя как твердые тела, если по ним ударить; достаточно упруги, когда их бросают на пол; и стекают по вертикальной поверхности, как жидкость?

**ОТВЕТ •** Необычные свойства этих разных жидкостей связаны с их *вязкостью*, мерой текучести жидкости, показывающей, насколько легко преодолевается сопротивление перемещению одних слоев жидкости относительно других. Например, вязкость холодной патоки очень высока и течет она медленно, тогда как у воды вязкость небольшая и течет она быстро. Вязкость большинства жидкостей зависит от температуры, но при заданной температуре их вязкость постоянна. Говорят, что это *ньютоновские жидкости*.

К другому классу относятся *неньютоновские жидкости*. Название указывает на то, что их вязкость определяется не только температурой, но также зависит от того, что привело к течению. Кетчуп — пример такой жидкости. Если какое-то время он стоит спокойно, вязкость его высока, и поэтому вылить кетчуп через небольшое отверстие сложно. Однако если несколько секунд размешивать или трясти кетчуп, его вязкость заметно падает. И поэтому, чтобы кетчуп лился из бутылки, ее надо несколько раз встряхнуть. При встряхивании одни слои жидкости скользят относительно других, и такое относительное движение (так называемый *сдвиг*), вероятно, приводит к распутыванию входящих в состав кетчупа молекул в виде длинных цепочек, до того спутанных в клубок. После этого кетчуп

течет легко. Если сдвиг способствует уменьшению вязкости жидкости, говорят, что это *псевдопластичная жидкость*.

Чернила в шариковой ручке, однослойная краска и масло — все это псевдопластичные жидкости. Когда вы на эти жидкости нажимаете и пытаетесь заставить их двигаться — шариком ручки, кистью или ножом, — вы уменьшаете их вязкость и они начинают течь сравнительно легко. Как только воздействие прекращается, вязкость опять становится слишком большой и течь такие жидкости не могут.

Густой раствор крахмала в воде является *загустителем*, поскольку в этой жидкости относительное движение приводит к увеличению вязкости. Такие жидкости называют *дилатантными*. (К разбавленному раствору крахмала в воде это не относится.) Если ударить по густому раствору крахмала ладонью, относительное движение слоев жидкости мгновенно так увеличит вязкость, что этот раствор станет практически недеформируемым, и всплеска уж точно не будет, хотя почти сразу вязкость уменьшается и смесь опять может течь. Мгновенное увеличение вязкости происходит, по-видимому, из-за того, что молекулы крахмала ориентируются в направлении, перпендикулярном направлению течения, и тормозят его. Как только прекращается воздействие, затрудняющее течение, ориентация молекул снова становится произвольной. Если пригоршню такого густого раствора бросить на пол, в момент удара он поведет себя как твердое тело, но затем сразу растечется по полу. Если погрузить туда достаточно большой стержень или ложку, а затем рывком поднять ее вверх, возможно, удастся на мгновение поднять и раствор крахмала, и кастрюлю, в которой он находится.

Жвачка для рук и лизун тоже сделаны из вязких неньютоновских жидкостей. Положите эти игрушки на край стола так, чтобы они с него слегка свисали. Под действием направленной вниз силы тяжести они будут потихоньку стекать вниз. Если, как при ударе, на них действует большая по величине кратковременная сила, они напоминают упругий мячик: в этом случае длинные молекулы этих материалов свернуты в спираль и ведут себя как пружинки. Например, если неожиданно потянуть в разные стороны за два конца полоски из жвачки для рук, она разломится примерно так, как разломился бы металлический стержень, который тянут в разные стороны. А еще и жвачку, и лизун можно резать ножницами. Когда лезвия резко надавливают на эти жидкости, сдвигая их слои, они становятся твердыми и хрупкими.

Еще один интересный эффект можно наблюдать, если проталкивать жвачку для рук через узкую трубочку. Когда она появится с другого конца, мы увидим, что площадь ее поперечного сечения увеличилась. Это так называемый *эффект Баруса* — *разбухание струи*, выходящей из капилляра при продавливании растворов полимеров. Он обусловлен тем, что длинные молекулы полимера возвращаются в исходное состояние, после того как он был сжат при протягивании через трубку.

Некоторые неньютоновские жидкости могут откачивать сами себя из сосуда. Если часть такой жидкости вы подтянете к краю лабораторного стакана, а затем перекинете через край, она потечет по внешней стороне стакана, поднимая и перекачивая через край оставшуюся жидкость.

## 2.59 • СУП, ВРАЩАЮЩИЙСЯ В ОБРАТНУЮ СТОРОНУ

Почему, если начать размешивать некоторые консервированные супы, например томатный, а потом вытащить ложку, последние несколько секунд до остановки он будет вращаться в противоположном направлении? Чтобы это увидеть, добавьте сначала в концентрированный томатный суп немного воды (меньше, чем указано в инструкции). Затем проведите испытание, освещая поверхность супа.

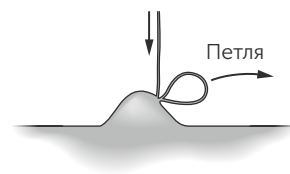
**ОТВЕТ** • Размешивая суп, вы не только прикладываете усилие к ложке, двигая ею в супе, но и вынуждаете различные слои супа двигаться друг относительно друга. Относительное движение, так называемое *сдвиговое течение*, приводит к разматыванию длинных молекул, которые в нормальном состоянии скручены в спираль. Когда движение ложки и сдвиговое течение останавливаются, молекулы сразу стремятся свернуться обратно в спиральки, меняя направление вращения, как если бы суп был упругим веществом.

## 2.60 • СКАЧУЩАЯ СТРУЙКА ЖИДКОСТИ

Пустите шампунь для волос или жидкое мыло для рук тоненькой струйкой на плоскую поверхность. У ее основания образуется небольшое возвышение, которое затем растекается лужицей. Почему, если некоторые жидкости лить с определенной высоты, струя, попадая на поверхность, иногда отскакивает далеко в сторону?

**ОТВЕТ** • «Прыгучие» шампуни относятся к так называемым *вязкоупругим жидкостям*: они одновременно

и вязкие (внутреннее трение препятствует их движению), и упругие (ведут себя как резиновая пленка). Вязкость шампуня достаточно велика, когда он медленно движется в льющейся струйке и внутри возвышения. Однако, когда струйка попадает на возвышение, соударение создает сдвиг, благодаря чему один вязкий слой быстро движется по другому вязкому слою. Такое движение уменьшает вязкость в этом месте струйки. Поскольку жидкость упругая, неожиданное уменьшение вязкости позволяет сталкивающимся объемчикам отскакивать наподобие резиновых мячиков. Так струя образует широкую, растягивающуюся в сторону от струйки и возвышения петлю (рис. 2.18). Петля существует так недолго, что видна только ее верхняя часть и создается впечатление, что струйка шампуня отскакивает от возвышения в основании струйки.



**Рис. 2.18 / Задача 2.60.** Кажется, что струйка льющегося шампуня отскакивает от образовавшегося на поверхности возвышения.

## 2.61 • ЖИДКОСТЬ, ВЗБИРАЮЩАЯСЯ ПО СТЕРЖНЮ

Если вставить вращающийся стержень в сосуд с водой, вода начнет вращаться вокруг стержня, образуя направленную вниз воронку. Если заменить воду яичным белком, моторным маслом или некоторыми другими жидкостями, то они, вращаясь, начнут *наматываться* на стержень. Такое поведение жидкостей называется *эффектом Вайсенберга*.

**ОТВЕТ** • Поведение жидкостей обусловлено тем, что вращающийся стержень увлекает за собой жидкость. Чтобы представить себе, как происходит такое сдвиговое течение, положим, что слои жидкости заключены в цилиндрические оболочки с осью на оси стержня. При вращении стержень увлекает за собой внутреннюю оболочку. Эта оболочка скользит относительно следующей, заставляя вращаться и ее. Таким образом, оболочка за оболочкой жидкость втягивается во вращение. Поскольку движение связано с тянущими и скользящими усилиями, говорят, что оболочки испытывают действие сдвигающих напряжений. Когда речь

идет о воде, уже через несколько слоев сдвиг практически не ощущается, и поэтому чем выше, тем вращение меньше. Однако есть жидкости, молекулы которых связаны друг с другом, образуя цепочки. Цепочки настолько перепутаны, что ведут себя как упругие полоски. Вращающийся стержень наматывает на себя такие «полоски», так что сначала они подтягиваются к стержню, а затем сдвигаются по нему вверх.

## 2.62 • БУХТА ЖИДКОГО КАНАТА

Если подобрать высоту и тоненькой струйкой лить мед на тост, он, как канат, начинает укладываться колечками (рис. 2.19). Есть и другие жидкости, способные в некоторых случаях накручиваться сами на себя. Например, широкая струя льющегося теста складывается туда-сюда, как лента на подарочной коробке. Почему эти жидкости так себя ведут?

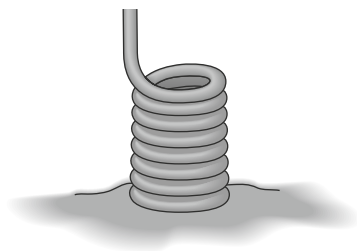


Рис. 2.19 / Задача 2.62. Колечки меда, похожие на бухту каната.

**ОТВЕТ •** Сворачиваются спиралью или складываются как лента вязкоупругие жидкости, то есть те, которые обладают одновременно и вязкостью, и упругостью. Мед, льющийся с достаточно большой высоты, сворачивается колечками или складывается как лента по следующим причинам. 1. Когда он попадает в лужицу меда, уже налитого на тост, высокая скорость и большая вязкость не позволяют ему сразу объединиться с этой лужицей. Из-за соударения с налитым ранее медом струйка внезапно замедляется, и в ней возникают напряжения. 2. Льющаяся струйка утончается, и вблизи поверхности лужицы она представляет собой либо цилиндр маленького радиуса, либо тонкую широкую ленту. Тонкую струйку действующие напряжения могут отогнуть в сторону. Цилиндрическая струйка будет продолжать закручиваться, образуя спиральку, которая внутри может быть полый. Более широкая струя изгибается туда-сюда. Отклонившись в одну сторону, она возвращается обратно благодаря межмолекулярным связям, а затем сгибается в другую сторону, и так

далее. В общем случае чем больше высота, с которой льется струйка, тем больше частота накручивания или перегибания. Однако эффект пропадает, если эта высота слишком большая. В этом случае более вероятно, что жидкость будет падать отдельными каплями, а не литься тоненькой струйкой.

## 2.63 • ВОЛНЫ НА ВОДЕ

Что вызывает волны на воде? Как вообще они возникают?

**ОТВЕТ •** До конца это не ясно, но упрощенно объяснить появление волн можно так: легкий ветер или какое-то другое возмущение воздуха или воды приводят к появлению на воде ряби. Ветер может превратить рябь в более сильные волны. В частности, поток воздуха с наветренной стороны волны, проходя через гребень, разбивается на вихри с подветренной стороны. Давление воздуха в вихрях меньше, и разность давлений между наветренной и подветренной сторонами гребня гонит верхушку волны в направлении ветра и увеличивает высоту волны. Другими словами, ветер может передавать энергию волнам. Если ветер усиливается, усиливаются и волны — увеличивается их высота.

## 2.64 • ГИГАНТСКИЕ ОДИНОЧНЫЕ ВОЛНЫ И ВОЛНЫ-УБИЙЦЫ

Обычно высота океанских волн не превосходит некоторой величины, которая зависит от ветров и штормов в данном районе. Однако иногда волны бывают особенно большими. О *гигантской одиночной волне* говорят, что ее высота пугает. Но бывают еще и *волны-убийцы*, их высота вызывает настоящий ужас. Такой волне предшествует появление впадины, которую часто называют «дыркой в океане». Если нос большого корабля, способного противостоять ураганам, соскальзывает в такую пропасть, его обычно разламывает на части, а обломки выносит наверх волной, возвышающейся над поверхностью океана на 30 м. В 1933 году экипажу корабля ВМС США «Рамапо» удалось выжить, столкнувшись с тридцатичетырехметровой волной-убийцей. Дежурный офицер измерил ее высоту методом триангуляции; невероятной преданностью науке обладает человек, занимающийся физикой в такой момент.

И гигантские волны, и волны-убийцы наблюдались на всех океанских побережьях. Но в водах юго-восточного побережья Африки они образуются гораздо чаще, чем в других районах. Это подтверждает и большое



число случившихся здесь кораблекрушений. Что же вызывает появление гигантских волн и волн-убийц?

**ОТВЕТ** • Обычно, когда речь заходит об океанской волне, имеют в виду синусоидальную волну (волна в форме синусоиды с гребнями и впадинами), распространяющуюся по океанской поверхности. Если две двигающиеся в одном направлении волны перекрываются, можно допустить, что *результатирующая волна* (та, которую вы увидите) получится просто сложением двух волн. Если бы волны точно совпадали по фазе, гребни и впадины новой волны были бы выше и глубже, чем у каждой отдельной волны. Если перекрывается много волн, двигающихся в разных направлениях, вычислить, какой будет результирующая волна, затруднительно, но простое сложение отдельных волн по-прежнему дает высоту ее гребней и глубину впадин.

Волна, образовавшаяся при простом сложении волн, называется *линейной комбинацией* волн. По-видимому, гигантские волны — это *нелинейные комбинации* отдельных волн, то есть такие их комбинации, когда по каким-то причинам у результирующей волны гребни гораздо выше, а впадины гораздо глубже. Возможно, когда высота гребней увеличивается, ветер усиливает их рост, так что в итоге они оказываются выше, чем ожидалось. А может быть, в определенных ситуациях увеличение высоты результирующей волны сверх какой-то критической точки модифицирует исходные волны и образовавшаяся волна становится еще выше. Шансы образования гигантских волн невелики, но случается, что такая волна захлестывает круизный лайнер или какой-нибудь другой корабль, приводя в изумление капитана, привыкшего иметь дело с линейными комбинациями волн.

Объяснить, как возникают волны-убийцы (их еще называют *волнами-монстрами* и *чокнутыми волнами*), еще труднее, но и они появляются как результат нелинейной комбинации отдельных волн. То, что такие волны часто образуются вблизи юго-восточного побережья Африки, наверняка связано с движением в противоположных направлениях течения мыса Игольного, или Агульяс, и ветровых волн. Сильное течение Агульяс, извиваясь, движется на юго-запад, а ветровые волны — обычно на северо-восток. Волны, вынуждающие течение изгибаться, могут фокусироваться наподобие света в линзах. При определенных условиях такая фокусировка приводит к образованию «дырки в океане», за которой следует огромная, наклоненная в ее сторону волна.

## 2.65 • ВОЛНЫ, РАЗВОРАЧИВАЮЩИЕСЯ К БЕРЕГУ

Океанские волны двигаются в самых разных направлениях, зависящих от ветра и отдаленных штормов. Тогда, казалось бы, подходить к берегу они должны с разных сторон. Почему же, приближаясь к берегу, волны разворачиваются и подходят к нему более или менее параллельно береговой линии (рис. 2.20)?

**ОТВЕТ** • Поворот волн происходит в результате *рефракции*, или *преломления*, — явления, изучаемого обычно в оптике\*. Дело в том, что при уменьшении глубины воды уменьшается и скорость волн. Рассмотрим отдельную волну. Когда гребень волны подходит к берегу, где глубина воды меньше, его часть, первой попавшая на мелководье, замедляется, а затем начинает отставать от остальной части гребня. Это запаздывание изгибает гребень волны: к берегу постепенно разворачивается та его часть, которая на мелководье движется медленнее. Наконец весь гребень, вытянувшийся параллельно береговой линии, попадает на мелководье.

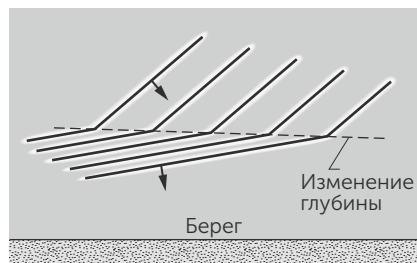


Рис. 2.20 / Задача 2.65. Океанские волны меняют направление при уменьшении глубины воды (вид сверху).

При подходе к берегу меняется и форма волн. Если наблюдать за волнами сверху, мы видим не одну волну, а совокупность многих отдельных волн разной длины. Степень замедления волны, а следовательно, и ее разворот, зависит от длины волны. Поэтому отдельные волны замедляются и разворачиваются по-разному.

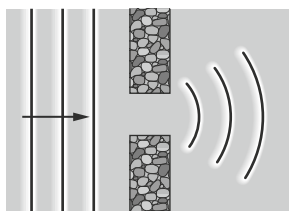
## 2.66 • ВОЛНЫ, ПРОШЕДШИЕ ЧЕРЕЗ СУЖЕНИЕ

Почему океанские волны, вырываясь из узкого прохода, ширина которого немногим больше их длины, расширяются (расходятся), а не продолжают двигаться в исходном направлении (рис. 2.21)?

\* Рефракция — изменение направления луча или волны на границе двух различных сред или в одной среде, где скорость распространения волны неодинакова. *Прим. пер.*



**ОТВЕТ** • Подобное расширение — пример *дифракции*, то есть наложения (интерференции) волн при прохождении через узкое отверстие. Как правило, распространяющуюся по прямой волну с плоской поверхностью (плоским волновым фронтом) можно представить как набор небольших источников вторичных полусферических волн. Перекрытие и интерференция всех этих волн непрерывно создают распространяющуюся волну с плоским фронтом. Однако когда волна попадает в узкий проход, сохраняются только источники, попавшие внутрь этого прохода. Этих источников недостаточно, чтобы испускаемые ими полусферические волны, перекрываясь и интерферируя, могли образовать распространяющуюся волну с плоским волновым фронтом. Испускаемые ими полусферические волны образуют на выходе из узкого прохода расходящуюся волну. Более того, у этой новой волны амплитуда вертикального движения в разных точках разная. Есть точки, где вертикальное движение воды существенно, но в промежуточных точках оно вообще отсутствует. Поэтому, если к берегу подходит волна, прошедшая между волнорезами\*, есть места, где волнение практически не ощущается, хотя в других местах волны могут быть достаточно большими.



**Рис. 2.21 / Задача 2.66.** Океанские волны испытывают дифракцию на проломе в скале (вид сверху).

Дифракция имеет место и при прохождении волны вблизи края барьера: часть воды вблизи барьера затекает в *область тени*, в то место, которое, как кажется, защищено от волн.

## 2.67 • СЕЙШИ И РАЗЛИТАЯ ВОДА

Когда вы идете и несете открытый сосуд с жидкостью, например миску с водой, почему вода расплескивается? Что определяет частоту всплесков, то есть число колебаний поверхности жидкости за секунду? Можно ли расплескать воду в ванне или плавательном бассейне? А в пруду, в гавани или в озере?

\* Волнорез, в отличие от мола, не примыкает к берегу.  
Прим. пер.

**ОТВЕТ** • Когда вы идете, ваши шаги и колебания руки, держащей миску, вызывают движение жидкости как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Это значит, на поверхности жидкости появляются волны. Большинство таких волн интерферируют беспорядочно, но при интерференции некоторых волн образуются так называемые *стоячие волны*. Амплитуда такой волны — максимальное отклонение от поверхности в вертикальном направлении — зависит от места на поверхности жидкости с постоянным шагом. В некоторых местах амплитуда максимальна (это называют пучностями волны), а в некоторых — минимальна, то есть поверхность воды почти покоится (это называют узлами волны). Стоячая волна самой низкой частоты называется *основной модой*, а ее частота — основной. Такая волна возбуждается практически всегда. Основная частота зависит (по крайней мере, приблизительно) от размеров сосуда и от глубины воды. Если вы шагаете с частотой, приблизительно равной основной частоте, вода будет колебаться так сильно, что выльется из миски. Можно понизить вероятность такого развития событий, если идти медленнее или изменить походку.

И из ванны можно выплеснуть воду, двигая туда-сюда широкой лопаткой. Меняя частоту движений, можно добиться ее совпадения с основной частотой, и тогда весь пол в ванной комнате окажется залитым водой.

Случается, что волны основной частоты возбуждаются и в таких больших емкостях, как автоцистерны или железнодорожные цистерны. Конечно, неконтролируемые колебания могут привести к потере устойчивости, а значит, и к аварии. Чтобы этого не случилось, внутри цистерн часто устанавливают направляющие лопатки, ограничивающие распространение волн.

Когда несколько человек одновременно раз за разом прыгают с вышки в плавательный бассейн, может образоваться стоячая волна основной частоты. Того же эффекта можно достичь, установив большой механический плунжер на одном из концов бассейна, но это далеко не так интересно.

В естественных водоемах больших размеров, таких как пруды, гавани и озера, могут возбуждаться стоячие волны, если колебания воды вызваны сейсмическими волнами или изменениями давления воздуха (например, под воздействием ветра). Такие колебания большой амплитуды называют *сейшами*. Хорошо известен случай образования сейш в результате Аляскинского землетрясения в марте 1964 года. Тогда сейши были зарегистрированы на всем побережье

североамериканского континента вплоть до Мексиканского залива. Большинство этих волн были слишком малы, чтобы их можно было заметить невооруженным глазом, но была зарегистрирована и волна, высота которой от основания до гребня достигала двух метров.

В гаванях и в приливных бассейнах возбуждение стоячих волн связано с приливами или такими природными катаклизмами, как шторм или цунами. Они напоминают бутылку или трубу органа, где стоячие звуковые волны возбуждаются колебаниями воздуха. Только здесь стоячая волна есть результат колебаний уровня воды.

Обычно амплитуда колебаний воды в гавани (а значит, и возможность несчастных случаев) больше, когда ширина входа в гавань (ворот в океан) меньше. Это может быть связано с так называемым *парадоксом гавани*: широкий вход в гавань допускает отвод энергии накатывающихся волн обратно в океан, тогда как гавань с узким входом фактически является ловушкой для поступающей энергии. Сходный эффект имеет место и в случае звуковых волн. Если вдуть воздух в узкое горлышко наполовину заполненной бутылки с газированной водой, в заполненной воздухом части бутылки можно генерировать громкие резонирующие звуки. Но если горлышко бутылки широкое, добиться резонансного звучания труднее, а может, и вообще невозможно.

## 2.68 • КИЛЬВАТЕРНЫЙ СЛЕД ОТ УТОК И АВИАНОСЦЕВ

Почему за плывущей уткой или, скажем, авианосцем на воде остается кильватерный след V-образной формы (рис. 2.22)? Зависит ли форма или угол, под которым расходится кильватерный след, от их скорости?

**ОТВЕТ** • При разумных скоростях позади плывущих тел остается практически одинаковый кильватерный след. Это связано с тем, что в результате движения возбуждаются главным образом не капиллярные волны (колебания, в которых основную роль играют силы поверхностного натяжения), а *гравитационные волны* (в гидродинамике гравитационными волнами называются колебания жидкости под действием силы тяжести). Поэтому и утка, и авианосец оставляют за собой след, расходящийся под одним и тем же углом, примерно равным  $39^\circ$ . Однако в пределах кильватерного следа картина волнового движения для разных тел различна.

Внутри кильватерного следа волновое движение определяется волнами, расходящимися по воде

в результате возмущения от плывущего корабля. Каждая такая волна, имеющая форму синусоиды, распространяется, вызывая колебания поверхности воды. Общая картина определяется в основном фазами волн, то есть аргументами соответствующих синусоид. Однако поодиночке эти волны увидеть нельзя, поскольку плывущий корабль возбуждает сразу большое количество перекрывающихся (*интерферирующих*) волн. Мы можем наблюдать только распространение *волнового пакета* (группы волн), образующегося в результате сложения волн с разными частотами. Нам кажется, что волновой пакет движется по воде, но на самом деле он непрерывно образуется заново путем интерференции волн с разными фазами. Если все фазовые скорости равны, скорость распространения волнового пакета, *групповая скорость*, в два раза меньше фазовой скорости.

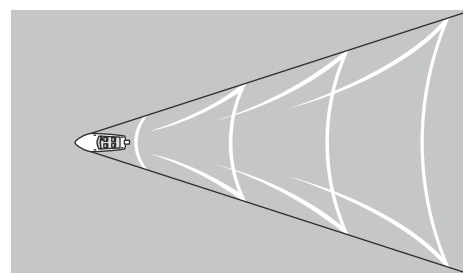


Рис. 2.22 / Задача 2.68. Кильватерный след при движении по воде (вид сверху).

Дело осложняется тем, что на воде фазовые скорости зависят от длины волн: длинные волны распространяются быстрее коротких. Поэтому длинные волны стремятся обогнать короткие.

Когда движущийся корабль прошел точку А, из этой точки распространяются синусоидальные волны, скорость которых в два раза больше групповой скорости образованного из них волнового пакета. Поскольку генерируются волны в широком диапазоне длин волн, скорости отдельных волн и скорости волновых пакетов тоже существенно различаются. Поэтому детальная картина волнового движения, образованная волнами, расходящимися из точки А и из всех остальных точек траектории корабля, очень сложна. Однако эти волны формируют основной волновой пакет внутри V-образного кильватерного следа с вершиной в месте нахождения корабля и углом раствора  $39^\circ$ , который мы и видим.

Если внимательно присмотреться к фотографии кильватерного следа, видно, что внутренность буквы V состоит из большого числа искривленных линий, так

что сам след напоминает птичье перо. Внутренние линии — результат интерференции большого числа волновых пакетов, исходящих из многих точек на траектории движения корабля.

При ярком солнечном свете можно заметить, что внутри кильватерного следа вода спокойнее, чем вне его. Хотя все волны вызваны возмущениями от движения корабля, можно полагать, что внутри следа меньше волновых пакетов, образованных короткими волнами. Иногда видно, что отражение солнечных лучей внутри следа больше похоже на зеркальное отражение, оно ярче, чем от области снаружи.

## 2.69 • СЕРФИНГ

Что заставляет серфингиста (на доске для серфинга) двигаться по направлению к берегу или вдоль волны? Можно ли скользить по вершине волны или с обратной ее стороны?

**ОТВЕТ •** На глубокой воде, далеко от берега, волны движутся практически с постоянной скоростью. Однако вблизи берега при уменьшении глубины уменьшается и скорость волны. Когда океанская волна подходит к берегу, где глубина становится все меньше и меньше, нижняя часть волны постепенно замедляется. Верхняя часть волны, двигающаяся с прежней скоростью, обгоняет ее нижнюю часть, благодаря чему волна подается вперед. Кроме того, высота волны тоже может увеличиться. Если во время прибоя волны обрушиваются, образуя пену, — такая волна для серфинга непригодна. Если же это *скользящий бурун* (волна разрушается постепенно и существует дольше, чем другие волны) или *ныряющий бурун* (завихряющаяся волна, гребень которой настолько вырывается вперед, что опрокидывается и ударяет спереди в основание волны, образуя водяную трубу), на таких волнах кататься можно.

На катающемся серфингиста одновременно действуют три силы. 1. Выталкивающая сила, перпендикулярная поверхности воды. Эта сила возникает благодаря тому, что доска для серфинга частично погружена в воду. 2. Направленная вниз сила тяжести, стягивающая серфингиста вниз по поверхности волны. 3. Сила сопротивления, действующая вдоль поверхности воды, она связана с давлением воды на поднятый вверх передний конец доски и трением его о воду при скольжении.

Загребая, чтобы набрать скорость, стоящий на коленях серфингист движется с задней поверхности волны, переваливает через гребень и оказывается

на передней поверхности волны. Попадая туда, серфингист поднимается, ожидая начала свободного скольжения, и перестает грести. Правильно сориентировав доску в воде, серфингист регулирует силу сопротивления и положение доски на поверхности волны. Где-то внизу волны все три силы компенсируют друг друга (серфингист находится в *состоянии равновесия*): выталкивающая сила наклоняет его в направлении движения волны и, следовательно, толкает вперед; сила тяжести стремится стянуть его по склону волны вниз, но этому препятствует сила сопротивления воды. Это позволяет серфингисту оседлать волну. Чтобы перемещаться по поверхности волны или продвигаться вдоль нее, ему надо изменить ориентацию доски и, следовательно, сопротивление воды. Как правило, если серфингист сдвигается назад, задний конец доски глубже погружается в воду, увеличивая сопротивление и замедляя движение, что позволяет ему подниматься вверх по поверхности волны. Если же серфингист сдвигается вперед, скорость доски увеличивается и он скатывается вниз по волне.

Нельзя оседлать волну, если ее гребень настолько пенистый, что возникает турбулентность. Если турбулентность возникает одновременно вдоль всей длины волны, серфингисту ничего не остается, как ждать следующей волны. Однако если волна накатывает на берег под определенным углом, турбулентность возникает на одном из ее концов, а затем движется вдоль волны (говорят, что волна *ломается*). Серфингист пытается оседлать такую волну непосредственно перед турбулентностью, в том месте, где волна загибается. Если волна ломается слишком быстро, турбулентность догоняет серфингиста и катание на волне заканчивается.

Вероятно, самое неизгладимое впечатление производит серфинг на волнах с трубами, так называемый *пайплайн*, когда гребень очень высокой волны опрокидывается, ударяет в ее основание и между падающим гребнем и остальной поверхностью волны образуется тоннель. Если до образования трубы опытному серфингисту удалось оседлать волну на ее передней поверхности, он вполне может прокатиться внутри трубы.

## 2.70 • ДВИЖЕНИЕ МОРСКИХ СВИНЕЙ И ДЕЛЬФИНОВ

Часто морские свиньи и дельфины сопровождают лодки и корабли, бесшумно двигаясь неподалеку от судна примерно в метре от поверхности воды. Они могут высываться, переворачиваться с боку на бок и даже

вращаться вокруг собственной оси. Но создается впечатление, что они не сами плывут, а какая-то сила удерживает их рядом с кораблем, словно они к нему привязаны. Что же заставляет этих животных двигаться так часами?

**ОТВЕТ** • В этом случае основная движущая сила — волны, распространяющиеся от носа судна (или иногда от его кормы). Морская свинья или дельфин располагаются перед волной не слишком глубоко под (наклоненной) поверхностью. Когда нос разрезает воду, заставляя ее двигаться вперед, вверх и вбок, вода толкает животное вперед. Если морские свиньи или дельфины хотят просто прокатиться на волне, а не играть, выпрыгивая и переворачиваясь, они выбирают глубину так, чтобы направленная вперед сила уравнивала сопротивление воды. Иногда этим животным удается прокатиться на дармовщину, даже если расходящиеся от носа корабля волны настолько малы, что пассажиры корабля могут и не заметить их.

### 2.71 • КРАЕВЫЕ ВОЛНЫ

Вблизи пластинки, колеблющейся вертикально или горизонтально в воде, может возникнуть любопытная волновая картинка: стоячие волны с гребнями, сильно смахивающими на зубья расчески, расположены перпендикулярно пластинке (рис. 2.23). Они отличаются от обычных волн, распространяющихся от колеблющейся пластинки, гребни которых параллельны пластинке. Такие необычные волны называются *краевыми*, или *поперечными*, волнами. Майкл Фарадей открыл их 1 июля 1831 года. Он описал их в своем дневнике, где очень подробно записывал данные научных наблюдений. Чтобы образовались краевые волны, надо правильно подобрать глубину, на которую погружается лопатка, колебания должны быть равномерными, и тогда на возбуждение краевых волн потребуется примерно минута.

Краевые волны можно наблюдать и в наполненном до краев (или почти до краев) бокале с вином. Проведите несколько раз по краю бокала чистым сухим пальцем. Если вам повезет, вы обнаружите, что трение тоже может возбуждать перпендикулярные кромке бокала краевые волны. Они могут быть настолько сильными, что брызги вина взлетят в воздух. Почему трение возбуждает краевые волны?

**ОТВЕТ** • Нормальные, или собственные, волны, вызываемые колебаниями пластинки в воде, — это

*капиллярные волны*, амплитуда и частота которых определяется не силой тяжести, а поверхностным натяжением. Эти волны, фактически рябь на поверхности воды, не надо путать с существенно более сильными *гравитационными волнами*. При определенных условиях колебания пластинки приводят к образованию стоячей волны вдоль пластинки. Отличительная черта таких волн — их частота равна половине частоты колебаний пластинки.

На замедленной съемке видно, что, когда пластинка начинает колебаться в горизонтальном направлении, события развиваются так: всякий раз, когда пластинка движется вперед, вдоль всей ее ширины образуется бугорок, а когда пластинка отходит назад, за ней остается углубление. Образовавшиеся бугорки и углубления движутся в направлении от пластинки как обычные капиллярные волны.

Когда пройдет примерно минута после начала колебаний, видно, что при каждом движении пластинки вперед поверх бугорков капиллярных волн поднимается ряд перпендикулярных поверхности пластинки гребней. Однако имеется два набора гребней. Когда пластинка движется вперед, образуется один набор гребней, при следующем колебании вперед — следующий набор и так далее. Гребни из одного набора образуются посередине между гребнями другого набора. Следовательно, частота, с которой появляется каждый из таких наборов, равна половине частоты колебаний пластинки.

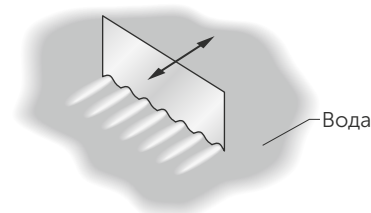


Рис. 2.23 / Задача 2.71. Краевые волны, перпендикулярные горизонтально колеблющейся пластинке.

Если потереть край бокала с вином, можно добиться того, что его кромка начнет колебаться наподобие колокола — можно услышать, как бокал «поет». Кромка бокала — круг, при колебаниях превращающийся в эллипс или более сложную фигуру, поэтому, колеблясь, она движется либо к центру бокала, либо от него. На рис. 3.4 (глава 3) запечатлен момент, когда палец проходит через точку, соответствующую 12:00 часам на циферблате. Максимальные смещения соответствуют положениям стрелок в 3:00, 6:00 и 9:00,

а посередине смещений нет. При движении пальца за ним следует конфигурация распределения смещений. Кромка бокала играет роль колеблющейся пластинки, приводя к образованию системы краевых волн.

Краевые волны можно возбудить и в наполненных водой бронзовых китайских поющих чашах\*. Однако следует тереть их ручки, а не край. Если это делать правильно, краевые волны могут поднимать воду вверх на расстояние до полуметра.

Если жидкость колеблется вертикально, в тонком слое воды и глицерине можно получить не только краевые волны, но и более сложные волновые картины (включая красивые системы полос, шестиугольников и кругов).

## 2.72 • ПЛЯЖЕВЫЕ ФЕСТОНЫ\*\*

Что приводит к образованию пляжевых фестонов, которые мы привыкли видеть на многих пляжах?

**ОТВЕТ •** С точки зрения математики, волны, ответственные за образование пляжевых фестонов, сходны с краевыми волнами, рассмотренными в предыдущей задаче. Однако поскольку математика здесь сложная, ограничимся простым их описанием. Набегающая на берег волна по форме близка к синусоиду (рис. 2.24). В те места на берегу, куда волна продвинулась дальше всего, она выносит песок, образуя выступ из мокрого песка. Вода отступает, перетекая через центр выступа, а затем стекает вниз вдоль образовавшейся в песке впадины, напоминающей корыто. Этот обратный поток мешает следующей волне. Она не повторяет путь предыдущей волны, а обтекает с двух сторон образовавшийся выступ там, где первая волна меньше всего продвинулась вглубь берега. Вода опять приносит песок и отступает вдоль вырытой ею по центру впадины. Снова обратный поток препятствует подъему следующей набегающей волны вверх по тому же выступу. Таким образом, благодаря попеременному накату воды на соседние песчаные выступы на пляже формируется береговая линия.

\*Поющая чаша — древний музыкальный инструмент типа колокола. В отличие от обычных колоколов, они не подвешиваются и не крепятся на ручке. Звук рождается от вибрации стенок чаши и ее края. *Прим. пер.*

\*\*Пляжевые фестоны — ритмично чередующиеся небольшие остроконечные выступы и серповидные углубления береговой линии. *Прим. пер.*

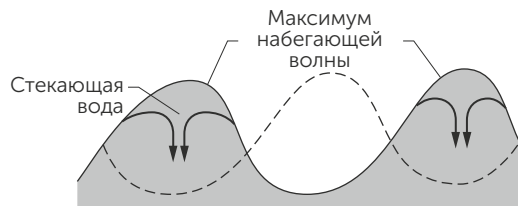


Рис. 2.24 / Задача 2.72. Волна, набегающая на берег (вид сверху). Следующая набегающая волна показана пунктирной линией.

## 2.73 • МАСЛО И ВОЛНЫ

С древнейших времен люди знали, что слой масла (например, оливкового) на воде может даже при сильном ветре уменьшить или вообще погасить волны. Это хорошо знал и Бенджамин Франклин, который часто прихватывал на пикник небольшую бутылочку масла в надежде продемонстрировать этот эффект. Однажды такой пикник проходил вблизи ручья. Когда легкий ветерок поднял небольшие волны, Франклин прошел вверх по ручью, сделал несколько «магических» пассов своей бутылочкой так, чтобы гости не видели, как он разливает масло. К их крайнему удивлению, волны практически сразу улеглись и ручей успокоился.

Когда летишь над водой, можно заметить грязные штилевые пятна\*\*\*. Поскольку на таких пятнах волны меньше (или их совсем нет), их освещенная солнцем плоская поверхность оказывается ярче, чем окружающая незагрязненная поверхность воды. Почему же масло успокаивает волны?

**ОТВЕТ •** Масло или другие загрязнения успокаивают воду по трем причинам. 1. Растекшееся масло образует вязкий слой (в нем внутреннее трение затрудняет скольжение одного слоя воды относительно другого). Поэтому энергия образовавшейся волны расходуется быстро. Этот эффект играет особую важную роль в случае коротких волн (расстояние между идущими подряд гребнями мало). 2. Когда дует ветер, волны обычно развиваются из мелкой ряби. Если ряби нет, более сильные волны появиться не могут. 3. Слой затрудняет обмен энергией между длинными и короткими волнами.

## 2.74 • ПАРЯЩИЕ КАПЛИ

В некоторых кофемашинах кофе по капелькам капает в сосуд. Такие капли должны были бы, разбрызгивая кофе, быстро слиться с остальным кофе, а вместо этого

\*\*\*Штилевые пятна — зеркальные пятна или полосы на волнистой поверхности моря или озера. *Прим. пер.*



они парят над поверхностью кофе, иногда даже проделывая несколько раз путь от одной стенки сосуда к другой.

А еще парящие капли можно получить, повозив по столу обычный пенопластовый стаканчик с кофе (или каким-нибудь другим напитком), раз за разом прижимая, а затем останавливая его. Если стакан достаточно быстро двигать зигзагами, из колеблющейся жидкости могут выплескиваться вверх капли. Падая обратно в стакан, они, вместо того чтобы немедленно смешаться с остальной жидкостью, могут остаться парить над ее поверхностью. Если перестать двигать стакан, капли быстро погружаются в жидкость.

Когда вода льется из крана в плоскую раковину, вокруг места падения струи образуется кольцевая область и окружающая ее водяная стенка. В этой области, то есть внутри стенки, поток воды мелкий и быстрый; снаружи он медленнее и не такой мелкий. Таким образом, водяная стенка — это граница, на которой поведение потока воды меняется. Если из пипетки капнуть воду прямо у этой стенки с внутренней стороны, то есть в пределах кольцевой области, капля может некоторое время парить над поверхностью воды.

Что же во всех этих случаях позволяет каплям воды парить над поверхностью?

**ОТВЕТ** • Капли могут быть подвешены над поверхностью жидкости из-за электростатического отталкивания молекул капли и молекул на поверхности жидкости. Добавим жидкое мыло в сосуд с водой и в каплю. Молекулы мыла стремятся собраться на поверхности жидкости. При этом их гидрофильные (водолюбивые) концы спрятаны в воду, а гидрофобные (отталкивающие воду) концы торчат наружу из воды. Гидрофобные концы, торчащие и из капли, и из сосуда с водой, отталкиваются друг от друга, удерживая каплю в воздухе. Кроме того, может играть роль электризация трением, возникающая при движении по столу стакана, в котором вы готовили мыльный раствор.

Процесс может развиваться и так. Предположим, что капля падает в неподвижный сосуд с очень маленькой высоты. Пока она снижается и еще не коснулась в первый раз поверхности жидкости, воздух из-под нее вытесняется. Затем капля наполовину погружается в воду. Возникает волна, распространяющаяся по поверхности капли, которая «отщипывает» погружившуюся половину, немедленно сливающуюся с жидкостью в сосуде. Верхняя часть капли продолжает опускаться, а воздух под ней отчасти поддерживает

ее, но и продолжает вытекать наружу. Затем она тоже касается жидкости в сосуде. Опять по капле пробегает волна, отрывает ее нижнюю половину, которая немедленно погружается в контейнер. Это может повторяться несколько раз, до тех пор, пока капелька, оставшаяся от начальной капли, уже не разорвется пополам, а полностью растворится в жидкости в сосуде.

Теперь посмотрим, что происходит в кофемашине, где капли кофе падают одна за другой в сосуд. Падающая капля может достичь поверхности кофе в сосуде именно тогда, когда заполняется кратер, оставленный предыдущей каплей. Под напором поступающей в кратер жидкости новая капля отскакивает. Когда после этого капля опять опускается, она вытесняет из-под себя воздух, однако какое-то время этот воздух поддерживает каплю. Объяснить, почему в раковине с льющейся в нее водой парит капля, можно почти так же. Только в этом случае поток воды непрерывно затягивает под каплю новый воздух, обеспечивая ей поддержку, и капля тормозится около водяной стенки.

Если сосуд с жидкостью и капля колеблются, движение помогает достаточно быстро закачивать под каплю воздух, что обеспечивает ее поддержку. Именно это и происходит, когда пенопластовый стаканчик возят туда-сюда по столу. Вероятно, можно добиться того же результата, если удастся как-то заставить каплю и жидкость в сосуде совершать вертикальные колебания с той же частотой, что и в стаканчике.

Также каплю можно удержать над поверхностью жидкости, если ее температура или температура воды в сосуде очень велики. В этом случае каплю поддерживает пар, образовавшийся при испарении воды. Этот механизм, обычно называемый *эффектом Лейденфроста*, мы обсудим в главе 4, посвященной тепловым явлениям.

## 2.75 • РАЗБРЫЗГИВАЮЩИЕСЯ КАПЛИ

Что происходит с каплей воды, например дождевой каплей, когда она сталкивается с твердой горизонтальной поверхностью или с водой в луже? Почему некоторые капли разбрызгиваются (частички этих капель летят вверх и в стороны), а другие нет?

Когда детектив обнаруживает на месте преступления кровавое пятно, он понимает, что кровь либо вытекала из жертвы по капле, либо била фонтаном. Но ему надо по размеру пятна определить скорость и размер капель. Это дело сложное, поскольку размер оставшегося пятна зависит и от того, и от другого: если капля маленькая, но скорость ее большая, размер

пятна может оказаться больше, чем в случае, если капля больше, но движется она медленнее. Есть ли способ получить такую информацию, анализируя пятно? (Представьте, что вы Шерлок Холмс.)

**ОТВЕТ** • Рассмотрим сначала падение капли на твердую поверхность. В зависимости от обстоятельств капля, ударившаяся о твердую поверхность, может либо разбрызгаться, либо растечься по поверхности (смотить ее) или сначала отскочить от поверхности, а затем разбрызгаться или растечься. При разбрызгивании капли образуется неглубокий, почти круглый слой с короной (приподнятым внешним краем). Когда корона формируется, из нее вылетают мелкие капельки. Образование капелек обусловлено тем, что, когда увеличение размеров короны замедляется, она становится неустойчивой. Одна из волн, возникших на этой стадии и распространяющихся вдоль короны, становится доминирующей, а ее наиболее высокие точки, зубцы короны, отрываются, образуя капельки. На пятнах, оставленных брызгами, часто видны вытянутые языки — следы от зубцов короны. Длина основной волны, приведшей к неустойчивости, приближенно равна длине окружности, ограничивающей разбрызгавшуюся каплю, деленной на число оставшихся языков.

Капля, падающая на поверхность воды, может расплескаться, слиться с поверхностью или парить в непосредственной близости от поверхности. Парящие капли, о которых мы говорили в предыдущей задаче, могут образовываться, только если жидкость капает с очень небольшого расстояния. Если капля падает с большей высоты, она выталкивает из-под себя воду, что приводит к появлению на поверхности воды кратера в форме полусферы. Затем вдоль периметра этого кратера образуется корона. Оседая, корона обрушивается обратно в кратер, и быстро набегающая в центр кратера вода струей выбрасывается вверх. Когда струя достигает максимальной высоты, от нее может оторваться одна или несколько капелек. Наконец струя стихает, и расплескивание заканчивается.

В некоторых случаях края короны смыкаются сверху, образуя купол. Тогда любая струя в центре оказывается внутри купола и поэтому не видна. Если при ударе капли о воду корона не образуется, возникает уходящая вниз воронка, форма которой напоминает лежащий бублик. Внутри этого бублика вода по спирали уходит вниз и поднимается вверх по его внешней поверхности. Воронку можно увидеть, добавив в каплю воды

краситель. Капли, отбрасываемые струей в центре кратера, тоже могут привести к образованию воронки. Такую струю легче увидеть, если вода неглубокая и твердая поверхность снизу помогает преобразовать корону в струю в центре. Самая высокая струя образуется в том случае, когда глубина слоя воды равняется радиусу кратера, образованного каплей. (Удивительно: если откачать воздух над слоем воды или заменить его более легким газом, капля может и не расплескаться.)

Бывает, что быстро падающие одна за другой капли отскакивают от поверхности воды. Если первые несколько капель образовали кратер, а следующие за ними капли попали в него именно тогда, когда вода начала затекать в кратер, заполняя его, поток воды может подбросить такие капли вверх.

Капли расплавленного воска, падающие на гладкую поверхность металла, могут расплескиваться наподобие капель воды, но на конечных стадиях процесса они затвердевают. Вокруг расплескавшейся капли воска получается красивый узор, когда капельки отрываются от края кратера или от зубцов короны и затем затвердевают. Интересный рисунок получается и при падении капли расплавленного металла на плоскую металлическую поверхность. Они расплющиваются в лепешку с растекшимися по периметру языками. Некоторые из них отщепляются и становятся отдельными кусочками металла. При увеличении шероховатости поверхности число языков обычно уменьшается, а их ширина увеличивается.

Чтобы определить скорость и размер капли крови, вытекшей из жертвы, криминалисты должны определить не только размер пятна крови, но и количество языков, образовавшихся по периметру пятна. Чем больше скорость, тем языков больше. Однако анализ затруднен тем, что необходимо учитывать характер поверхности, о которую ударяется капля. На более шероховатых поверхностях языки перекрываются, а размер пятна уменьшается. Следовательно, для каталогизации пятен крови, оставшихся на часто встречающихся поверхностях, таких как бетон, бумага или стекло, необходимо провести большое число экспериментов. Если на месте преступления на твердой поверхности была обнаружена кровь, лучше передать в лабораторию кусочек этой поверхности с пятном крови. Там, проводя эксперименты с каплями крови определенного размера, падающими с заданной высоты, можно получить интересные детектива размер и скорость падения капель для данной поверхности.

## 2.76 • ПУЗЫРЬКИ В ГАЗИРОВАННОЙ ВОДЕ, ПИВЕ И ШАМПАНСКОМ

Почему в газированной воде, пиве, шампанском и других газированных напитках пузырьки образуются после того, как открыли банку или бутылку? Почему они образуются в основном на внутренней поверхности сосуда, а не в самой жидкости? Почему они растут, двигаясь вверх, и почему (особенно в шампанском) пузырьки образуют *шлейф*, в котором они следуют друг за другом? Почему в шампанском пузырьки обычно поднимаются быстрее, чем в пиве? Почему, если вымыть стакан жидкостью для мытья посуды и высушить на воздухе, а потом налить в него газированный напиток, образования пузырьков почти не происходит?

Почему, если добавить в стакан только что налитое пиво лед или соль, образуется так много пузырьков, что пиво может вылиться из стакана? Почему, если закрытую бутылку с газированным напитком хорошенько встряхнуть, содержимое фонтаном выльется из бутылки, когда вы ее откроете?

Шенди — смесь пива с каким-нибудь безалкогольным напитком, чаще всего с лимонадом или имбирным пивом. Если пиво наливать поверх лимонада, не произойдет ничего достойного внимания. Но если лимонад наливать поверх пива, вырывающиеся пузырьки могут переполнить стакан. В чем же разница?

Почему, если кружочки лайма положить в стакан с пивом, они несколько раз двигаются вверх и вниз? Когда пиво некоторых марок быстро наливают в стакан, почему по бокам стакана образуются *двигающиеся вниз* слои из пузырьков?

**ОТВЕТ** • Газированный напиток — жидкость, содержащая большое количество растворенного углекислого газа. Воду насыщают углекислым газом под давлением. Шампанское и пиво насыщаются газом в процессе брожения, но и в этом случае давление в бутылке достаточно велико. В бутылке шампанского оно может в шесть раз превышать нормальное атмосферное давление. (Если открывать бутылку шампанского недостаточно аккуратно, давление выталкивает пробку из бутылки, причем скорость пробки может достигать 50 км/ч. Этого более чем достаточно, чтобы серьезно повредить глаз.) Когда бутылку открывают, из нее выходит газ, давление внутри бутылки уменьшается, и весь углекислый газ уже не может удерживаться в растворе. Он выходит из раствора либо непосредственно через поверхность жидкости (если это возможно), либо образуя пузырьки.

Чтобы пузырек рос, его радиус должен быть больше некоторого критического значения. Поверхность пузырьков меньших размеров слишком искривлена, и поверхностное натяжение, стремящееся уменьшить его размер, не позволяет газу внутри пузырька раздуть его. Поверхность пузырьков большего радиуса искривлена меньше, и направленных внутрь сил, действующих со стороны молекул воды, недостаточно, чтобы пузырек схлопнулся. Однако едва ли пузырьки с радиусом больше критического образуются непосредственно в объеме жидкости: маленькие пузырьки не дорастают до нужного размера, а появление пузырьков с радиусом, равным или больше критического, маловероятно. Поэтому *зародышеобразование* (появление) пузырьков происходит только на поверхностях, главным образом на стенках и на дне бутылки (а также на любых твердых частицах внутри жидкости). Со временем количество углекислого газа в жидкости уменьшается настолько, что пузырьки перестают образовываться.

Наиболее часто зародышеобразование пузырьков объясняют так: предположим, на твердой поверхности есть царапина и на ней образовался пузырек-зародыш. Если царапина достаточно широкая, поверхность пузырька не слишком сильно искривлена и он не схлопывается. Более того, углекислый газ из жидкости постепенно наполняет пузырек, он раздувается, и, следовательно, увеличивается действующая на него подъемная сила. В конце концов пузырек увеличивается настолько, что значительная его часть отрывается от царапины и всплывает. А затем из газа, оставшегося в царапине, снова начинает расти новый пузырек.

Современные данные указывают на то, что в стакане с газированной водой *большинство* пузырьков зарождается не на царапинах, а на целлюлозных волокнах, прилипших к поверхности стакана, когда его в последний раз мыли и вытирали бумажным или матерчатым полотенцем. В этих полых волокнах, а также между ними имеется воздух, инициирующий образование пузырьков. Когда бутылку открывают, углекислый газ через открытые концы волокон просачивается в оставшиеся там пузырьки воздуха. Когда такой «объединенный» пузырек становится достаточно большим, часть его отрывается от одного из концов волокна и процесс повторяется. Если стакан не протирают бумагой или тканью или если его моют в посудомоечной машине и высушивают сухим воздухом, целлюлозных волокон, способствующих росту пузырьков, в стакане нет и, следовательно, образование пузырьков затруднено.

В этом случае при первом наполнении стакана пузырьки могут появиться только благодаря турбулентности.

Когда, потянув вверх за петельку, открывают банку с газированным напитком, почти все пузырьки образуются на погружившейся в жидкость поверхности петельки. (Посветив фонариком, загляните внутрь банки.) Вероятно, пузырьки на поверхности петельки начинают расти там, где к ней пристали какие-то соринки. Если из гигиенических соображений верх банки протереть бумагой или тряпкой, «соринками» станут и целлюлозные волокна.

На поверхности кубиков льда, брошенных в газированный напиток, кое-где остается воздух. Поэтому они могут играть ту же роль, что и волокна. Соль действует двояко, она не только инициирует образование пузырьков. Если посолить пиво, соль, попадая в раствор, уменьшает количество углекислого газа, которое может раствориться в этой жидкости, и его излишки быстро выходят наружу.

Пузырьки легче окружающей их жидкости, поэтому под действием выталкивающей силы оторвавшись от стенки или от волокон пузырьки устремляются вверх. Однако молекулы белков быстро налипают на них и, увеличивая гидродинамическое сопротивление, замедляют подъем пузырьков. В пиве, изобилующем белковыми молекулами, пузырьки тормозятся сильнее, чем в шампанском. Поэтому пузырьки в шампанском обгоняют пузырьки в пиве.

Если бутылку с газированным напитком встряхнуть, а затем сразу открыть, газ, обычно скапливающийся над жидкостью, смешивается с ней, образуя маленькие пузырьки. Когда давление уменьшается, углекислый газ наполняет эти пузырьки и может внезапно вырваться из раствора. Рост пузырьков бывает таким интенсивным, что жидкость вслед за пузырьками выливается, а иногда и бьет струей из бутылки. Чтобы не устраивать потоп, бутылку, которую только что встряхнули, надо оставить на какое-то время в покое, давая пузырькам возможность опять подняться к поверхности и лопнуть, а уж затем открывать. (Я не понимаю, как постукивание по бутылке может ускорить этот процесс, разве что каким-то образом это помогает оторвать от ее стенок прилипшие пузырьки.)

Образование пузырьков в *шенди* зависит от того, в каком порядке в кружку наливают пиво, в котором образуются пузырьки, и, скажем, негазированный домашний лимонад. Если пиво налито на лимонад, сначала оно практически все собирается в виде

слоя поверх лимонада. Основная доля пузырьков образуется в этом верхнем слое и может, как обычно, легко подняться на поверхность. Однако если лимонад наливают на пиво, пузырьки образуются в нижнем слое и, чтобы попасть наверх, они должны пройти через слой лимонада. Кроме того, какое-то количество лимонада просачивается вниз в пиво. Взвешенные в лимонаде частички (например, остатки мякоти лимона) становятся местами, где образуются свободные пузырьки. Короче говоря, скорость образования пузырьков увеличивается и все эти пузырьки, чтобы достичь поверхности кружки, должны проскочить через лимонад. В итоге быстро образуется пенная шапка, которая имеет большие шансы вылиться из кружки.

Когда в кружку наливают некоторые сорта пива, в нем с самого начала есть пузырьки. Когда эти пузырьки сталкиваются, они могут прилипнуть друг к другу, образуя плоские *плоты из пузырьков*, замедляющие их подъем. Плоты отделены друг от друга по вертикали на расстояние, величина которого зависит от того, насколько разнятся скорости подъема свободных пузырьков и плотов. (Плоты из пузырьков могут образовываться в базальтовой магме, и лава вытекает, если слои достаточно толстые, чтобы позволить поднимающимся пузырям образовать плоты прежде, чем они достигнут верхней поверхности слоя.)

Бытует мнение, что плоты вниз двигаться не могут. На самом деле это возможно по двум причинам. 1. Пузырьки в середине кружки поднимаются быстрее, чем по стенке, где их движение затруднено из-за трения о стенку и торможения на плотках. Поэтому в середине кружки жидкость вытягивается вверх поднимающимися пузырьками, что приводит к смещению вниз жидкости вблизи стенок. В результате вблизи стенок плоты опускаются. 2. Пузырьки, оторвавшиеся от верхушки плота, устремляются вверх к нижней границе следующего плота, находящегося выше. Значит, каждый плот теряет пузырьки со своей верхней поверхности, но прирастает пузырьками снизу, и поэтому центр плота движется вниз.

## 2.77 • МЫЛЬНЫЕ ПУЗЫРИ И ПИВНАЯ ПЕНА

Почему не лопаются мыльный пузырь, который вы выдуваете через колечко или трубочку, чтобы порадовать себя или ребенка? Зачем нужно мыло или какое-нибудь другое моющее средство? Можно ли выдуть пузыри из воды? Почему мыло с добавлением глицерина пенится дольше? (Смешайте стиральный порошок, воду



и глицерин в соотношении 1:3:3.) Почему жидкость в оболочке пузыря просто не стекает вниз, разрывая верхушку пузыря?

Почему пена на налитом в кружку пиве держится гораздо дольше, чем пена на газированной воде? Почему со временем пена на пиве оседает?

**ОТВЕТ** • Оболочка мыльного пузыря — очень тонкий слой воды с молекулами поверхностно-активного вещества, собирающимися на его внутренней и внешней поверхностях. Один из концов молекулы (*гидрофильный*) погружен в воду. Другой ее конец (*гидрофобный*) торчит из поверхности. Силы, удерживающие мыльный пузырь, обусловлены *поверхностным натяжением* — взаимным притяжением молекул воды. Однако у чистой воды поверхностное натяжение слишком большое, поэтому выдуть пузырь из плоской тонкой пленки воды не удастся. Молекулы моющего средства, собравшиеся на поверхности пузыря, настолько уменьшают поверхностное натяжение, что пузырек не схлопывается. Кроме того, слой этих молекул придает оболочке устойчивость.

Под действием силы тяжести жидкость в оболочке пузыря стекает вниз. Однако, когда верхушка пузыря утончается, взаимное отталкивание молекул мыла на внутренней и внешней его поверхностях замедляет или вообще останавливает этот процесс. Если с какого-то участка вода вытечет вся, на поверхности пузыря образуется отчетливо видимое черное пятно и вслед за этим пузырь лопается. Черное пятно — это область, где вода вытекла вся и есть только два слоя молекул мыла. Этот слой почти не отражает света, и мы его не видим.

Глицерин стабилизирует мыльные пузыри, поскольку благодаря своей большой вязкости (внутреннему трению) замедляет стекание вниз воды в оболочке пузыря и, кроме того, затрудняет испарение воды из пузыря.

В оболочке пузыря пивной пены жидкость стекает медленно, и поэтому оболочка утончается постепенно, до тех пор, пока пузырь не лопнет. Стеkanie замедляют определенные молекулы, притягивающиеся как друг к другу, так и к жидкости. В других газированных напитках, где образование долго держащейся пенной шапки нежелательно, подобные стабилизаторы не используются. Если добавить масла, пена в кружке пива может осесть почти мгновенно. Такое часто случается, если пивом запивают что-нибудь жареное или пьют его с накрашенными губами. Там, где масло касается пузыря, поверхностное натяжение уменьшается и окружающая жидкость буквально разрывает его.

Оболочки пузырей истончаются еще и потому, что жидкость втягивается в искривления в местах контакта нескольких пузырей. Правила, в соответствии с которыми соединяются вместе несколько пузырей, в XIX веке установил бельгийский ученый Жозеф Антуан Фердинан Плато. Их называют *правилами Плато*, а области, по которым пузыри соприкасаются, — *гранницами Плато*. Вследствие поверхностного натяжения давление в жидкости определяется кривизной ее поверхности: чем больше кривизна, тем меньше давление внутри жидкой оболочки. Это значит, что если границы Плато искривлены, давление жидкости меньше, чем при плоской области соприкосновения. Поэтому жидкость оттекает от плоских участков поверхности соприкасающихся пузырей.

Есть по крайней мере две причины, почему протеиновые молекулы оболочек пузырей позволяют стабилизировать пивную пену. 1. Они увеличивают вязкость и тем самым замедляют сток жидкости. 2. Эти молекулы препятствуют сторонам оболочки сблизиться настолько, чтобы порваться при случайном повреждении, что делает возможным объединение (*слияние*) двух пузырей в один.

Даже если оболочки пузырьков стабильны, пена на пиве постепенно меняется, поскольку через них *диффундирует* (проходит) углекислый газ. В результате на верхушке пены из пузырей выходит газ и они уменьшаются в размере. Маленькие пузырьки сжимаются быстрее больших, поскольку их кривизна больше и за счет поверхностного натяжения газ в них сжат сильнее, чем в больших пузырьках. Маленькие пузырьки сжимаются еще и из-за того, что сжатый углекислый газ диффундирует из них в соседние пузырьки большего размера, кривизна которых меньше и, следовательно, они меньше сдавлены. Таким образом, большие пузырьки могут расти за счет соседних маленьких пузырьков.

Один из способов, позволяющих замедлить диффузию и не допустить оседания пены, — использовать газообразный азот вместо углекислого газа. Через жидкую оболочку этот газ диффундирует медленнее, и пена на таком пиве более стойкая. Поэтому, чтобы налить его в кружку и не выплеснуть почти всю пену, надо проявить терпение.

Другой способ замедлить диффузию — охладить пивную кружку. Поскольку пузырьки образуются вдоль ее стенок, пена сверху будет состоять из пузырьков, внутри которых газ холоднее. Понижение температуры замедляет диффузию молекул газа через водяную оболочку.



Иногда пузырьки на верхушке пенной шапки на бокале неожиданно исчезают. Такой процесс называют *каскадный взрыв*. В этом случае пузырьки наверху пены высыхают и становятся хрупкими. Когда один из пузырьков лопаётся, колебания, передающиеся через пену или по воздуху, инициируют разрушение остальных.

Если бутылку крепкого пива резко опрокинуть в бокал, то оно, естественно, начнет вытекать из горлышка. Однако поток пива колеблется, говорят, что пиво *булькает*: с одной стороны горлышка бутылки прерывисто льется пиво, а с его противоположной стороны прерывистый поток воздуха направляется в бутылку. Если горлышко бутылки опустить в пену над налитой жидкостью, воздушный поток захватит пену и начнет втягивать ее в бутылку. Кончится это тем, что бокал будет наполнен пивом, а бутылка — пеной.

### 2.78 • ЛОПАЮЩИЕСЯ ПУЗЫРЬКИ

Почему, когда на поверхности жидкости, например воды, лопаётся пузырек, в воздух взлетают крошечные капельки? Почему, если один из пузырьков в слое пузырьков шампанского лопаётся, соседние пузырьки, словно лепестки, собираются вокруг него, образуя фигуру, похожую на цветок?

Мыльный пузырь, который мы выдуваем через пластиковое колечко или трубочку, прежде чем лопнуть, парит в воздухе. Он исчезает мгновенно? Куда деваются все молекулы мыла и воды?

**ОТВЕТ** • Пузырек на поверхности жидкости лопается из-за того, что жидкость из тонкого слоя, образующего верхушку пузырька, стекает вниз, и в итоге этот слой разрывается. Стекающая вниз жидкость ударяется о нижнюю часть пузырька и в виде струи (столбика воды) отскакивает вверх. Струя нестабильна, и поверхностное натяжение быстро разрывает ее на капли. Это те капли, которые выбрасывает в воздух лопнувший пузырек.

Если лопающийся пузырек окружен другими пузырьками, то, когда он схлопывается, обрушивающаяся внутрь жидкость подтягивает к этому пузырьку соседние пузырьки, растягивает их, придавая им форму лепестков. Кажется, что эти лепестки растут из места, где раньше был лопнувший пузырек.

Парящие в воздухе мыльные пузыри лопаются, когда в каком-то месте рвется их оболочка. Разрыв, образующий круг, расширяется, двигаясь по оболочке со скоростью около 10 м/с. Край разрыва собирает

на своем пути жидкость из оболочки. Все происходит слишком быстро, чтобы это можно было заметить невооруженным глазом. Край разрыва непрерывно разбрасывает вокруг себя тысячи капелек до тех пор, пока пузырек не схлопнется прямо напротив того места, где изначально произошел разрыв оболочки.

### 2.79 • КИТЫ И СЕТИ ИЗ ПУЗЫРЕЙ

Почему некоторые виды китов, питающиеся, например, крилем, во время кормежки выпускают воздух, чтобы образовались пузыри?

**ОТВЕТ** • По всей видимости, киты ловят добычу с помощью сетей из пузырьков, или пузырьковых занавесов. Конечно, рачки или мелкие рыбешки могли бы спастись, просто проплыв через такую сеть, но они обычно на это не осмеливаются. Поэтому для эффективной охоты кит создает сеть из пузырьков вокруг косяка рыб или под ним. Затем, согнав их в кучу, кит заглатывает свою добычу. Похоже, что рыбы не видят этих сетей, поскольку киты устраивают свои облавы по ночам. Скорее, рыбы реагируют на шум, возникающий при разрушении пузырьков.

### 2.80 • ВОДОМЕРКИ

Как водомеркам удается держаться на воде или скользить по ее поверхности? Почему при их движении перед ними и позади них образуются волны? Водомерки не издают звуков и живут на воде. Как же они могут сообщать сородичам, что им нужен партнер или что их соперники должны держаться подальше?

**ОТВЕТ** • Когда водомерка стоит на воде, ее вес приходится в основном на средние и задние ноги, и под ними на воде образуются углубления. Благодаря поверхностному натяжению поверхность воды не прорывается. Иначе говоря, из-за взаимного притяжения молекул воды ее поверхность ведет себя как упругая мембрана. На начальной стадии прыжка водомерка может даже продавить поверхность воды, не повредив ее. Если водоем мелкий, а насекомое ярко освещено солнцем, от этих вмятин на дне образуются овальные тени. Поскольку свет проходит через искривленную поверхность углубления, тени представляют собой тусклые, изогнутые в одну сторону пятна.

Конечно, если бы водомерки были слишком большими, они просто опустились бы на дно и назывались бы не водомерками, а, например, дномерками.

Поверхность воды выдерживает водомерку из-за особых свойств последних члеников ее ног: они *не смачиваются* водой. Если бы эти членики хорошо смачивались, вода поднималась бы по лапкам вверх и насекомое утонуло бы. Концы лапок не смачиваются, поскольку постоянно смазываются воскоподобным веществом, выделяемым специальными железами, что делает их *гидрофобными*. Однако насекомое не тонет главным образом благодаря особому строению этой части лапок. Они покрыты *микроволосками*, вдоль которых имеются крохотные канавки. Эти шероховатые гидрофобные микроповерхности очень эффективны и не позволяют воде покрыть ноги водомерки.

Водомерки бегают, загребая средними и задними ногами. Средние ноги работают как весла, позволяя ей двигаться вперед. Когда нога, отталкиваясь, уходит назад, в воде образуется U-образная вихревая трубка. Вертикальные части буквы U, представляющие собой два близко расположенных, вращающихся в разные стороны завихрения, выходят на поверхность. Под водой они соединяются нижней частью U-образной трубки. Поскольку в вихревой трубке часть воды движется в направлении от головы насекомого, оно продвигается вперед. Группа исследователей, открывших, что водомерки двигаются, используя воронки как весла, построили механическую водомерку. Они назвали ее *robostrider*, что на русский можно перевести как «робомерка». У этой щеголихи были стальные проволочные ноги, алюминиевое тело, а двигалась она с помощью намотанной на шкив упругой нити. Когда робомерка загребала ногами, с обеих ее сторон образовывались воронки. Водомерки, охотившиеся по соседству, приняли ее в свою компанию.

Обычно воронки, созданные средними ногами водомерки, увидеть трудно. Иногда позади насекомого вихревое движение может смениться волновым, но поскольку волны мелкие и с достаточно большой длиной волны, их тоже трудно увидеть. Легче увидеть короткие волны, которые двигающееся насекомое посылает впереди себя. Водомерки используют такие волны, заметные на расстоянии, примерно в шесть-семь раз превышающем их длину, чтобы отыскать добычу, обнаружить препятствие или другую водомерку, когда они зигзагообразно, на большой скорости скользят по поверхности воды. Понаблюдайте какое-то время за водомерками. Вы увидите, что хотя они, казалось бы, беспорядочно носятся по воде, они никогда не сталкиваются.

Водомерки общаются друг с другом, возбуждая на воде примерно 20 раз в секунду волны довольно большой амплитуды. Если муравей упадет в пруд и начнет барахтаться, поднятые им волны перехватит находящаяся поблизости водомерка и пулей помчится прямо к нему, обедать.

Водомерки избегают загрязненных участков поверхности воды, покрытых тонкими маслянистыми пленками: они не могут скользить по таким поверхностям или посылать сигнальные волны. Если водомерки случайно попадают в такие места, выбраться оттуда они могут, только передвигаясь прыжками.

## 2.81 • БУСИНКИ НА ПРУТИКЕ И НА НИТИ ИЗ СЛЮНЫ

Когда никто не видит, запустите пальцы в рот. Большим и указательным пальцем соберите немного слюны с внутренней стороны щеки и поскорее выньте пальцы. Потихоньку разводя пальцы, растяните слюну. Почему на нити слюны образуются шарики, похожие на бусинки (рис. 2.25)?

Погрузите тоненький прутик (или нитку) в стакан с маслом или медом и потяните вертикально вверх. Почему, когда жидкость стекает с прутика, образуются бусинки? Почему одна из бусинок, самая большая, поглощает на своем пути более мелкие бусинки и почему за ней образуется еще больше бусинок?

**ОТВЕТ •** Поверхностное натяжение (то есть взаимное притяжение молекул слюны) стремится минимизировать поверхность вытягиваемой ниточки слюны. Сначала, когда вы только начинаете растягивать слюну, диаметр нити не слишком мал, и цилиндрическая поверхность имеет минимальную площадь, поэтому нить имеет цилиндрическую поверхность. Случайные возмущения, например неизбежное подрагивание пальцев, приводят к возбуждению волн, распространяющихся по ниточке слюны. Эти волны искажают ее цилиндрическую поверхность, которую поверхностное натяжение быстро восстанавливает.

Чем дальше вы разводите пальцы, тем меньше становится диаметр нити, и наконец, когда длина распространяющейся по ней волны оказывается больше ее диаметра, нить становится неустойчивой. Дело в том, что в этом случае искажения уменьшают полную площадь поверхности ниточки. Это значит, что поверхностное натяжение не устраняет возникшее возмущение, а усиливает его. Расширившиеся участки

нити поверхностное натяжение растягивает в бусинки, а те места, где диаметр нити уменьшился, становятся еще уже. Расстояние между бусинками примерно соответствует длине волны, вызвавшей это изменение формы. (Если между бусинками покрупнее есть маленькие бусинки, вероятно, было несколько циклов образования бусинок, причем длины волн, участвовавших в этом процессе, всякий раз были разные.) Конечное расстояние между бусинками может быть таким маленьким, что заметить его будет трудно.

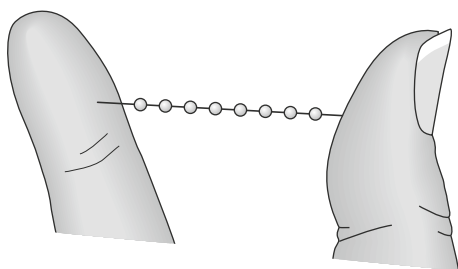


Рис. 2.25 / Задача 2.81. Появление бусинок на нити слюны, которую растягивают между большим и указательным пальцем.

Тонкий слой жидкости на прутике (или нити) не стабилен по тем же причинам: случайные возмущения и поверхностное натяжение меняют его форму и приводят к образованию бусинок. Если прутик опущен вертикально вниз, бусинки, особенно крупные, могут стекать по нему. Встречающиеся на их пути бусинки меньшего размера сливаются с ними, но после того, как крупная бусинка спустилась ниже, оставшийся за ней тонкий слой тоже может разбиться на бусинки. Правда, если пленка слишком тонкая, стекающая вниз жидкость препятствует образованию новых бусинок.

Некоторые пауки, делающие ловчие сети (*тенета*), используют образование бусинок при строительстве паутины. Когда основная паутина построена, они покрывают место, предназначенное для ловли мух, жидкостью, из которой на нити немедленно образуются липкие бусинки. Муха, попавшая в такую ловушку, не сразу может из нее выбраться. Запутавшаяся муха бьется в паутине, по дрожанию паутины паук определяет, что муха поймана, и успевает добраться до нее.

Образование пузырей можно наблюдать и при сварочных работах. Если источник тепла движется вдоль поверхности стали, за ним остается постепенно затвердевающий жидкий след. При определенных значениях скоростей сварочного аппарата на этом

следе можно видеть ряд горбиков (или неровностей). До того как след затвердеет, поверхностное натяжение расплавленной стали может привести к образованию «бусинок». Но если источник тепла движется слишком медленно или слишком быстро, бусинки не образуются.

## 2.82 • СБОР ДОЖДЕВОЙ ВОДЫ ЯЩЕРИЦАМИ В ПУСТЫНЕ

Некоторые живущие в пустыне ящерицы очень хорошо умеют запасаться питьевой водой в тех редких случаях, когда выпадает роса или идет дождь. Например, австралийская ящерица (*Moloch horridus*) собирает воду, усевшись на выпавшую росу, а когда идет даже очень слабый дождик, становится под дождевыми струйками, широко расставив лапки. Как таким образом ящерице удастся запастись хоть глотком воды?

**ОТВЕТ** • Ящерица впитывает воду, как губка для мытья посуды. Между чешуйками на ее коже имеются микроскопические канальчики — капилляры, в которые под действием капиллярных сил (то есть сил притяжения между молекулами воды и между молекулами воды и молекулами на поверхности капилляра) втягивается вода. Этот процесс настолько эффективен, что вода поднимается по коже ящерицы до самой макушки.

Чтобы напиться, ящерица делает повторяющиеся движения нижней челюстью, вытягивая воду из канальчиков вблизи пасти. Когда ящерица пьет, эти канальчики снова наполняются водой, которая поступает с остальных участков ее кожи. Сила тяжести тоже может способствовать притоку воды к пасти, если ящерица опустит морду и высоко задерет хвост.

## 2.83 • КАК КОРМЯТСЯ КУЛИКИ

Налейте воду в широкую миску. Разбросайте небольшие кусочки пенопласта по поверхности воды и попытайтесь поймать один из них, зажав между большим и указательным пальцем. Не исключено, что возникнет проблема: кусочек пенопласта будет отталкиваться от пальцев. Теперь представьте себе кулика, которому надо клювом ухватить плавающий в воде планктон — весьма мелкую добычу. Не возникают ли у птицы те же проблемы, что и у вас, когда вы ловите пальцами кусочки пенопласта?

**ОТВЕТ** • Некоторые кулики, охотясь на мелководье, используют поверхностное натяжение. Они погружают почти сомкнутый клюв в воду, а затем немножко его

приоткрывают. Когда затем они полностью вытаскивают клюв из воды, благодаря поверхностному натяжению (взаимному притяжению молекул воды и молекул на внутренней поверхности клюва) капля воды образует перекрытие между нижней и верхней частями клюва и становится ловушкой для добычи птицы. Чтобы проглотить добычу, кулику надо протолкнуть каплю воды в горло. Для этого он постепенно раскрывает клюв, и капля воды, по-прежнему держащаяся между нижней и верхней частями клюва, растягивается. Чтобы противостоять растяжению, поверхностное натяжение проталкивает каплю вглубь клюва, туда, где расстояние между верхней и нижней челюстями меньше. Это продолжается до тех пор, пока капля не достигнет глотки, где попавшую в ловушку добычу уже можно проглотить.

## 2.84 • КАПЛИ И ЖИДКИЕ ПЛЕНКИ НА ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Почему некоторые жидкости растекаются по твердым поверхностям, например по стеклянной столешнице, а другие образуют на них капельки? Почему иногда капельки удерживаются на наклоненной поверхности, даже свисая с нее?

Почему нижний конец жидкой пленки, стекающей со слегка наклоненной поверхности, как правило, либо неровный либо растекается струйками и образует пятна? Обычно так и происходит, когда резиновым скребком очищают наклонное ветровое стекло машины от мыльной воды или стеклоочистителя. Проведите скребком вниз и остановитесь, не доведя его до конца. Почему жидкость разбивается на стекающие по ветровому стеклу ручейки?

Почему обычно дождевая вода не стекает равномерно по вертикальной бетонной стене жилого дома? Почему, когда вода понемножку просачивается в пещеру, чаще всего образуются конические сталактиты?

**ОТВЕТ** • За то, как жидкость растекается по горизонтальной твердой поверхности, отвечают силы притяжения между молекулами жидкости и молекулами твердого тела. Если притяжение сильное, жидкость растекается по поверхности. В этом случае говорят, что жидкость *смачивает* поверхность. Если притяжение слабое, жидкость стремится образовывать капли. Часто для характеристики смачивания (или капель на поверхности) используют так называемый *угол смачивания*. Если этот угол небольшой, жидкость смачивает

твердую поверхность, при большом угле смачивания на ней образуются капли. Однако угол смачивания — не слишком надежная характеристика, поскольку в реальной ситуации (при реальной жидкости на реальной, микроскопически шероховатой твердой поверхности и с поверхностными загрязнениями) он может варьироваться в широком интервале значений.

Детали процесса растекания жидкости по твердой поверхности до конца неясны, поскольку для их описания необходимо учитывать межатомные взаимодействия. Во многих случаях край жидкости перемещается только благодаря тому, что чуть впереди него течет очень тонкая *пленка-предвестник*: молекулы пленки притягивают молекулы капли, продвигая край капли вперед. Иногда край *цепляется* за какой-то дефект поверхности или точку сильного притяжения и застревает на этих местах. Если капля начинает испаряться, ее передняя кромка стремится сжаться, но опять может где-то зацепиться, и тогда пленка будет сжиматься неравномерно (говорят об *уменьшении смачивающей способности*).

Некоторые вязкие жидкости, такие как масла и глицерин, своеобразно стекают с наклоненной поверхности. Двигающаяся вперед жидкость быстро разбивается на язычки, расположенные на равных расстояниях друг от друга. Эти язычки стекают вниз быстрее, чем области между ними. Язычки образуются из-за того, что край стекающей жидкости нестабилен и случайные возмущения приводят к образованию волн, распространяющихся вдоль него. Одна из таких волн оказывает наибольшее влияние на край стекающей жидкости. Она приводит к образованию расположенных на равном расстоянии сильных, стекающих вниз потоков.

В точках, где текущая по наклонной плоскости жидкая пленка цепляется за поверхность, ее равномерное продвижение вперед нарушается. Результаты этой нестабильности видны на ветровом стекле, с которого скребком сгоняют мыльную воду. Когда дождевая вода стекает по вертикальной бетонной стене, обычно ее передний край движется к земле неравномерно. Из места, где вода может двигаться быстрее, потоки воды устремляются вниз и в стороны.

Сталактиты состоят из карбоната кальция, который осаждается из воды, просачивающейся в пещеру. Вода, поступающая с потолка пещеры, стекает вниз к вершине сталактита. Здесь она задерживается и испаряется, именно здесь происходит самое интенсивное осаждение, и сталактит растет быстрее в длину, чем в ширину. Так образуются широко распространенные



кальцитовые образования, ассоциирующиеся у нас с идеальными сталактитами. Однако, если скорость просачивания воды мала по сравнению со скоростью осаждения, могут образовываться сталактиты других форм, такие как стержни и причудливо ветвящиеся структуры, известные как *геликтиты*.

### 2.85 • ПРИТЯГИВАЮЩИЕСЯ КУКУРУЗНЫЕ ХЛОПЬЯ

Если ваш завтрак — залитые молоком хрустящие кукурузные колечки марки «Чириос», вы заметите, что два плавающих в тарелке недалеко друг от друга колечка притягиваются. Почему так происходит? Почему, если в молоко бросить много колечек, через несколько минут они соберутся в группки? И почему колечки скапливаются и у стенки миски? Все это — проявления так называемого *эффекта «Чириос»*.

**ОТВЕТ** • Благодаря поверхностному натяжению поверхность молока вблизи колечек приподнимается (рис. 2.26). Это значит, что притяжение воды, входящей в состав молока, к краю колечка настолько сильно, что она поднимается вверх, несмотря на направленную вниз силу тяжести. Если два колечка подходят близко друг к другу, поверхность молока между ними искривляется, приводя к появлению сближающей их силы. Сближение колечек можно объяснить и в терминах энергии. Искривленной поверхности соответствует большая энергия. Хлопья сближаются, чтобы уменьшить кривизну поверхности между ними и тем самым понизить энергию.

Из-за поверхностного натяжения вблизи стенки миски поверхность молока тоже изогнута вверх. Поэтому, когда колечко приближается к стенке миски, поверхность молока между ним и стенкой искривляется очень сильно, а значит, возникает сила, подтягивающая колечко к стенке. Если в миску до краев налить молока, а затем добавить еще чуть-чуть, так, чтобы поверхность молока оказалась выше края, поверхность молока вблизи него изогнется вниз. В этом случае колечко, оказавшееся возле края миски, будет отталкиваться от него. Это физическое явление — причина недовольства многих посетителей пабов, заметивших плавающие в стакане воды соринки. Можно ли добиться того, чтобы соринки не прилипали к стенке стакана?

Плоское обоюдоострое лезвие бритвы может плавать, если его осторожно положить на воду. В отличие от кукурузных хлопьев, бритва плавает чуть ниже уровня окружающей воды, так что вблизи нее поверхность

воды искривляется вниз. Но поверхностное натяжение сближает и плавающие рядом бритвы, поскольку при этом поверхность между ними уплощается, а следовательно, понижается энергия.

Обычно материал называют гидрофильным (происходит от древнегреческих слов «вода» и «любовь»), если вода к нему притягивается, и гидрофобным (производное от слов «вода» и «боязнь»), если вода к нему не притягивается. Два плавающих тела из гидрофильных материалов притягиваются, даже если они находятся на довольно большом расстоянии друг от друга. Так же ведут себя два тела из гидрофобных материалов. Однако гидрофильное и гидрофобное тела отталкиваются друг от друга, поскольку, если они сближаются, увеличивается кривизна поверхности, что требует затрат энергии.

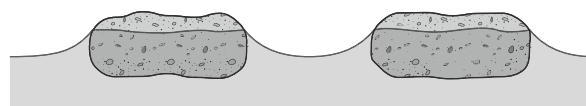


Рис. 2.26 / Задача 2.85. Два плавающих в молоке колечка.

### 2.86 • ЗАМКИ ИЗ ПЕСКА

Почему замки из песка не рассыпаются? Куча песка в песочнице на детской площадке никогда не бывает слишком высокой и крутой, а стены песчаных замков можно сделать вертикальными и украсить башенками с острыми углами. Более того, многие естественные образования из песка, *песчаные обрывы*, имеют почти отвесные стены. Почему вертикальные песчаные стены не разрушаются?

**ОТВЕТ** • Сухой песок сыпучий: отсутствуют силы сцепления, удерживающие вместе песчинки. В песке, находящемся под водой, песчинки тоже не сцеплены, поскольку вода легко протекает между ними и делает песок подвижным. Однако сырой песок — вполне связный грунт. Вода притягивается к песчинкам и *смачивает* их. Вода, находящаяся между двумя песчинками, соединяет их *жидким мостиком*. По форме этот мостик напоминает песочные часы. Около каждой из песчинок он расширяется, а посередине имеется узкая перетяжка. Вода фактически неподвижна, она не утекает от песчинок или не стекает вниз под действием силы тяжести. Силы сцепления обусловлены двумя причинами. 1. Молекулы воды притягиваются друг к другу и к песчинкам. Этот эффект называется



поверхностным натяжением. 2. Поскольку поверхности жидкого мостика изгибаются наружу, давление воды внутри мостика меньше давления воздуха снаружи, и песчинки стремятся туда, где давление меньше.

В насыщенном водой песке песчинки уже не связаны отдельными, затрудняющими движение жидкими мостиками. Наоборот, вода играет роль смазки, и песок уплотняется, превращаясь в компактную массу. Опытные строители песчаных замков сбрызгивают свои творения водой. Песок на поверхности впитывает воду, и создаются отдельные водяные мостики, удерживающие конструкцию. Если оставить песчаный замок сохнуть, вода испаряется с его внешней поверхности, мостики разрушаются и замок осыпается.

У мокрого песка на пляже силы сцепления больше, чем у чистого песка (кварца), поскольку в его состав входят частички глины и органических соединений, обеспечивающие дополнительные связи между песчинками. Кроме того, на пляже слой песка бывает покрыт соляной коркой, что еще увеличивает силы сцепления. В зоне наката, где волны периодически заливают берег, в песок с водой попадают воздушные пузырьки, и его структура становится более рыхлой. Таким образом, *твердость* песка существенно меняется по мере того, как вы спускаетесь на пляж по сухому песку, затем идете к воде по аэрированному (с большим количеством пузырьков воздуха) влажному песку, затем по мокрому песку и наконец заходите в море, где под ногами у вас покрытый водой, насыщенный влагой песок.

### 2.87 • ВНЕШНИЙ ВИД ПЛОХОГО КОФЕ

Предположим, вам налили плохой кофе (вроде того, что часами держат горячим в забегаловках). Почему поверхность кофе выглядит по-разному, когда вы погружаете в стаканчик чайную ложечку, а затем вытаскиваете ее? Без ложки поверхность кофе теряет всякий глянец и выглядит непривлекательно. Еще неприятнее смотреть на такой кофе, когда ложка находится в стакане: на поверхности видны маленькие блестящие кружочки.

**ОТВЕТ** • Как правило, сразу можно заметить, что кофе плохой: его поверхность покрыта маслянистым слоем, который делает напиток тусклым и неаппетитным. На ложке, которую вы опускаете в стакан, может остаться вещество, которое, растекаясь по поверхности кофе, заставит масло в поверхностном слое собраться в капли. Поскольку поверхность капель искривлена, они

становятся маленькими рефлекторами, отражающими свет любого светильника на потолке. Так на поверхности кофе появляется много ярких кружков. Когда ложку вынимают, маслянистый слой восстанавливается и большинство рефлекторов исчезает.

### 2.88 • «СЛЕЗЫ» ВИНА И ДРУГИЕ ИГРЫ ЖИДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Почему в бокале крепкого алкогольного напитка, вина или не слишком крепкой водки над жидкой поверхностью образуются капли (их называют «слезы вина»), которые растут и стекают вниз по стенке бокала (рис. 2.27)?

**ОТВЕТ** • Обычно поверхность воды слегка поднимается по стенкам стакана благодаря тому, что, во-первых, молекулы стекла притягивают молекулы воды (это называется *адгезией*, или сцеплением поверхностей разнородных тел) и, во-вторых, молекулы воды притягиваются друг к другу (это называется *когезией*, характеризующей связность воды). Как результат адгезии и когезии уровень воды вблизи стенки повышается и поверхность воды возле стенки искривляется.

Молекулы на поверхности жидкости притягиваются друг к другу и сближаются, благодаря чему поверхность жидкости находится в напряженном состоянии. Следовательно, *поверхностное натяжение* — характеристика поверхности жидкости. Если в бокал налито вино, жидкая пленка поднимается по его стенке гораздо выше, что связано с разным поверхностным натяжением жидкости в объеме и в поднявшейся пленке. У воды поверхностное натяжение достаточно велико, а у смеси спирта с водой оно меньше. Когда такая смесь начинает подниматься по стенке бокала, спирт быстро испаряется и на стенке остается практически водяная пленка. Поскольку поверхностное натяжение воды больше, чем у смеси спирта с водой, жидкость из объема бокала интенсивно затягивается в слой на его стенке. Слой становится толще, его верхний край подтягивается выше благодаря адгезии между жидкостью и стеклом, так что пленка поднимается выше, чем в стакане с водой.

Высота, на которую поднимается пленка, ограничена силой тяжести. Когда алкоголь испаряется из пленки, поверхностное натяжение стремится собрать оставшуюся воду в капли. Сначала из-за адгезии эти капли, «слезы» вина, продолжают подниматься, но в конце концов они становятся слишком большими,

неожиданно отрываются и сбегает вниз по стенкам бокала. «Слезы» вина образуются, только если вино умеренно крепкое: смесь спирта и воды должна быть подобрана так, чтобы обеспечить нужное соотношение поверхностных натяжений поднимающейся жидкой пленки и жидкости в объеме.



**Рис. 2.27 / Задача 2.88.**  
«Слезы» в бокале над поверхностью крепкого вина.

Движение жидкости, обусловленное отличием поверхностного натяжения в одной области от поверхностного натяжения в другой, называется *эффектом Марангони* в честь одного из его исследователей. Этот эффект объясняет, почему иногда капли широко растекаются по твердой поверхности. Наблюдая за такой каплей, мы не видим, что перед ней имеется тонкий слой жидкости, в котором испарение идет быстрее, чем в остальной капле. Так же, как и в случае «слез» вина, если испарение превышает поверхностное натяжение оставшейся жидкости в этом тонком слое, в него натекает новая жидкость из капли, вызывая растекание капли по поверхности.

### 2.89 • УЗОР НА ЛИКЕРЕ «ТИА МАРИЯ»

Обычно поверх крепкого ямайского ликера «Тиа Мария» («Тетушка Мария») наливают несколько миллиметров сливок. Пьют этот ликер через соломинку. Если этот напиток отставить в сторону на несколько минут, на его поверхности начинается происходить интенсивное движение, приводящее к образованию узоров из ячеек или трубочек, напоминающих червячков. С чем это связано?

**ОТВЕТ •** В одном или нескольких местах спирт диффундирует (медленно проходит) через сливки, уменьшая их поверхностное натяжение, обусловленное взаимным притяжением молекул на поверхности. Жидкая смесь спирта со сливками (у нее поверхностное натяжение небольшое) растекается по поверхности и попадает в те места, где остались сливки без примеси спирта (там поверхностное натяжение больше). В места, откуда эта смесь отошла, поднимается больше

спирта и так далее. Сложно объяснить, почему сливки на поверхности ликера (точнее, их сопротивление движению) запускают процесс циркуляции жидкости, движущейся вверх и затем вниз, но он может привести к образованию на поверхности или одиночных ячеек, если слой сливок толстый, или напоминающих червячков или трубочки, когда слой сливок тоньше.

### 2.90 • УЗОРЫ НА КОФЕ И ДРУГИХ ЖИДКОСТЯХ

Пусть чашка с горячим кофе стоит так, что солнечный свет падает по касательной, почти параллельно его поверхности. Приглядевшись, вы заметите на кофе меняющуюся картинку: непрерывно образуются и перестраиваются светлые области, очерченные темными линиями (рис. 2.28). По имени одного из первых исследователей этого явления такие узоры называют *ячейками Бенара*.

Если налитое на сковородку масло нагревать на слабом огне, его поверхность практически не меняется. Но если огонь постепенно увеличивать, масло приходит в движение и образуются ячейки Бенара в форме многоугольников. (Чтобы увидеть эти узоры, обычно нужен скользящий свет.) Если огонь еще чуть прибавить, многоугольники упорядочиваются и образуется структура из шестиугольников, напоминающая пчелиные соты.

Если в прозрачный стакан с горячим чаем медленно по стеночке доливать молоко, оно будет опускаться на дно стакана. Продолжайте добавлять молоко до тех пор, пока три четверти стакана не смешаются с молоком. Через несколько минут на поверхности стакана, там, где есть молоко, могут появиться горизонтальные полосы.

С чем связаны все эти явления?



**Рис. 2.28 / Задача 2.90.** Светлые области и темные линии на поверхности черного кофе.

**ОТВЕТ •** Когда с поверхности кофе испаряется вода, поверхность остывает и жидкость там становится чуть плотнее. Поскольку в слое вблизи поверхности и на дне

чашки температура (и плотность) кофе разные, возникает циркулирующий поток. Рассмотрим объем жидкости на дне чашки. Вокруг него жидкость имеет ту же температуру и ту же плотность, поэтому этот объем находится в стационарном состоянии. Однако случайное возмущение может отправить его вверх, в более холодный и более плотный слой жидкости. На него действует выталкивающая сила, и поэтому он не тонет, а, ускоряясь, движется вверх, попадая во все более холодную и плотную жидкость, где его направленное вверх ускорение возрастает. Так движение, вызванное случайным возмущением, становится все интенсивнее.

Подобным образом ведет себя и объем жидкости на поверхности. Если случайно он опустился в более теплые и менее плотные слои кофе, он все интенсивнее и интенсивнее, ускоряясь, будет двигаться вниз.

Поскольку у кофе есть открытая поверхность, на движение по ней влияет поверхностное натяжение — взаимное притяжение молекул воды друг к другу. Когда вода на поверхности остывает, поверхностное натяжение слегка увеличивается. Поэтому там, где имеет место нисходящий поток более холодной воды, поверхностное натяжение больше, чем там, где поднимается более теплая вода. Поскольку поверхностное натяжение разное в разных местах на поверхности, оно стремится «перетянуть» воду из поднимающихся областей на поверхности в опускающиеся. На месте этих областей образуется нечто вроде складок, несколько приподнятых относительно областей восходящего потока. Чем-то это напоминает гряды невысоких холмов, окружающих долины. В результате поверхность кофе разбивается на ячейки: широкие большие участки (долины), где поток жидкости поднимается на поверхность, и узкие (холмы) там, где жидкость опускается на дно чашки.

Когда более теплая вода достигает поверхности, часть ее испаряется, но пар быстро конденсируется в насыщенном влагой воздухе. Прямо над теми местами, куда выходят восходящие потоки воды, в воздухе образуются капли. Капли побольше падают обратно в жидкость, очень маленькие капельки уносят потоки воздуха над горячей поверхностью. Однако есть капли промежуточного размера, парящие над чашкой: их поддерживают восходящие потоки воздуха и пара над поверхностью горячего кофе. Когда дневной свет рассеивается на этих каплях, они становятся видимыми, придавая долинам белесый цвет. Холмы — это места, где парящих капель нет, поэтому там кофе

имеет обычный темный цвет. Если к поверхности чашки с кофе поднести какое-нибудь наэлектризованное тело (например, пластмассовую расческу, которой вы только что причесались), электрические силы уничтожат парящие капельки и белесые области исчезнут.

Сходные циркулирующие потоки образуются и в слое масла на стоящей на огне сковородке. Кофе в чашке остывает на поверхности, а масло подогревается снизу, но это различие несущественно. Важно, что между верхней и нижней поверхностями жидкости устанавливается разность температур. Если эта разность температур превышает некоторое критическое значение, конвекционные процессы становятся неустойчивыми относительно случайных возмущений. Благодаря таким возмущениям объемы жидкости к поверхности и от поверхности двигаются в разные стороны. Когда подъемная сила и поверхностное натяжение преодолевают вязкость, образуются области поднимающейся вверх и опускающейся жидкости. В некоторых жидкостях благодаря такому движению на поверхности появляются узоры в виде завитков, с одной стороны которых жидкость поднимается, а с противоположной опускается. Многоугольники, которые можно заметить на поверхности масла, соответствуют обширным областям поднимающегося горячего масла и узким линиям там, где более холодное масло опускается. Как и в горячем кофе, поверхностное натяжение масла больше там, где оно холоднее. Поэтому масло на поверхности перераспределяется, перетекая из тех мест, где оно поднимается, туда, где оно движется вниз.

Полосы, иногда появляющиеся, если добавить молоко в горячий чай, — горизонтальные более холодные и более теплые круговые области на боковой поверхности стакана. В этом случае причиной циркуляции может стать охлаждение, идущее через стенки стакана. Число горизонтальных полос может достигать восьми, но придется потрудиться, чтобы подобрать условия, необходимые для их возникновения. Впервые о них мне рассказал немецкий физик Кристиан Росс в 1987 году.

Ячейки Бенара появляются и в стекающем с большой свечи воске. Поверхностное натяжение более горячего воска меньше, чем более холодного. Значит, изменение поверхностного натяжения от фитиля до внешней поверхности может привести к образованию конвекционных ячеек. Если свечу осторожно загасить, ячейки, возвышения, оставшиеся в остывающем и затвердевающем воске, будут видны.

## 2.91 • УЗОРЫ НА ПЯТНАХ ОТ КОФЕ И КОФЕЙНОЙ ГУЩЕ

Почему, если кофе разлить по горизонтальной поверхности и оставить испаряться, место, где была лужица, отчетливо видно по оставшемуся коричневому кольцу? Почему, когда на тротуаре высыхает лужа соленой воды, ее края отмечены белым кольцом?

Крепкий кофе по-восточному — смесь воды, сахара и большого количества кофе мелкого помола. Его заваривают в *турке*, а затем разливают по маленьким чашечкам вместе с кофейной гущей. Пока кофе остывает настолько, что его можно пить, гуща постепенно оседает на дно чашки. Любитель восточного кофе маленькими плоточками выпивает всю жидкость над слоем гущи и отставляет чашку. Если эту смесь гущи с водой оставить на несколько часов, вода постепенно испаряется, а гуща образует неожиданные узоры, состоящие из темных и светлых линий по краю жидкости. Эти линии, будто нарисованные художником, перпендикулярны стенке чашки, достигают в длину нескольких миллиметров и располагаются на равных расстояниях друг от друга. Как такие узоры образуются?

**ОТВЕТ •** Когда лужица кофе надолго остается на столе, жидкость испаряется, а размер лужицы, теряющей воду, уменьшается. Однако движение ее внешней границы (ее называют *линия контакта* — место, где соприкасаются воздух, жидкость и твердое тело) может быть затруднено каким-нибудь дефектом твердой поверхности, например шероховатостью или локальным отличием химических свойств. Линия контакта закрепляется в дефектном месте и не может с него сдвинуться.

В тонком слое на краю лужицы испарение происходит достаточно быстро, оставляя за собой осадок из *растворенного* в жидкости вещества. Поскольку линия контакта закреплена, кофе из середины лужицы течет в направлении ее края, чтобы заместить испарившуюся воду. Так больше и больше растворенного вещества откладывается по краю лужицы, формируя темное кольцо, которое со временем становится заметным. Когда образуется кольцо, линия контакта закрепляется еще жестче. Однако по мере того, как количество жидкости уменьшается, она может оторваться и неожиданно сместиться в направлении центра лужицы, а затем закрепиться на новом дефекте, образовав новое кольцо меньшего радиуса. Сходным образом формируется белое соляное кольцо вокруг испаряющейся лужи соленой воды.

Если у чашки наклонная стенка и вблизи нее остался мелкий слой кофе по-восточному, движение края испаряющейся области будет определяться аналогичным механизмом. Кроме того, уходящая от края чашки жидкость образует ряд регулярных ячеек: в одних темная мелкая кофейная гуща переносится к краю чашки, а по другим от края отступает жидкость. Направленный к стенке поток уносит растворенные в воде вещества к краю чашки, а поток, направленный внутрь, вымывает их оттуда. В результате образуется регулярная структура из попеременно темных и светлых (без гущи) линий вокруг стенки чашки. Даже если кофе хорошенько размешать, ячейки вскоре восстановятся. Если варить кофе без сахара, ячейки не образуются.

Появление ячеек объясняется просто. Когда вода испаряется из мелкого слоя вблизи стенки чашки, натекающая вместо нее жидкость приносит с собой к краю чашки гущу. Гуща формирует одну из черных линий выстраиваемой структуры. Когда вновь поступившая жидкость достигает края чашки и начинает испаряться, гущи в ней становится больше и ее плотность увеличивается. Эта более плотная жидкость тонет, соскальзывая вниз вдоль искривленной стенки чашки. Направленный внутрь чашки поток уносит гущу от края, расчищая узкую линию — одну из светлых линий будущей структуры. Такой узор получается, только если наклон стенки чашки и не слишком мал, и не слишком велик. Не подойдет ни вертикальная стенка, вблизи которой вообще нет мелкого слоя, ни почти горизонтальная, около которой образуется слишком широкий мелкий слой.

## 2.92 • ФИГУРЫ ДЫХАНИЯ

Почему, если подышать на зеркало или на стекла очков, их поверхности запотевают? Почему запотевают зеркала в заполненной паром ванной комнате?

**ОТВЕТ •** Когда теплый влажный воздух, который мы выдыхаем, попадает на более холодную поверхность, например на зеркало, на нем начинает конденсироваться влага. Скорее всего, на поверхности зеркала есть пыль и отпечатки пальцев. Поскольку взаимное притяжение молекул воды больше, чем их притяжение к молекулам, из которых состоят загрязнения, молекулы воды стремятся собраться в капельки на чистой поверхности между загрязненными участками. Следовательно, вода не покрывает поверхность однородным слоем, а образует капельки.



Сначала это крошечные капельки, но они подрастают и со временем начинается процесс *коалесценции* (слияния капелек), который идет через поверхностную диффузию (миграцию) молекул, но природа которого еще до конца непонятна. Поскольку расстояние между слившимися большими каплями увеличивается, между ними начинают формироваться новые мелкие капельки. При дыхании могут последовательно образоваться три структуры из капель разных размеров: только малюсенькие капельки, капли побольше и наконец большие капли, между которыми находятся маленькие капельки. Общее название всех этих структур — *фигуры дыхания*.

Когда на зеркале образуются фигуры дыхания, изображение становится нечетким, и, поскольку капельки рассеивают белый комнатный свет, кажется, что зеркало покрыто каким-то белесым налетом. Если провести по поверхности зеркала пальцем, а потом снова подышать на него, в тех местах, где был палец, капли могут и не образоваться: кожный жир, попавший на зеркало с вашего пальца, может препятствовать *конденсации*.

Фигуры дыхания бывают опасны, когда образуются на стеклах очков или на ветровом стекле машины и ухудшают обзор. Например, при езде на автомобиле дорогу надо видеть отчетливо. Если же вы видите лишь смутные очертания едущих впереди машин, это может закончиться весьма печально. Некоторые ветровые стекла пользуются дурной славой: на них хорошо удерживаются дождевые капли. А другие ветровые стекла, напротив, быстро сбрасывают воду. Некоторые водители используют домашние или патентованные средства — покрывают ими ветровое стекло, чтобы вода его смачивала, а капли не образовывались.

### 2.93 • ЭФФЕКТ ЛОТОСА

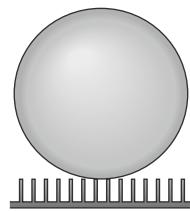
Сбрызнув водой листья лотоса, вы увидите, что капельки воды тут же превращаются в похожие на бусинки шарики, которые скатываются с листьев. По пути они захватывают грязь и пылинки, очищая лист. Говорят, что лист самоочищается. Вода сворачивается в капельки-бусинки и на других поверхностях, например на некоторых растениях, имеющих на поверхности восковой слой. Однако на листьях лотоса процесс образования капель иной. Что же приводит к образованию капель на листьях лотоса?

**ОТВЕТ** • Способность капель воды растекаться по твердой поверхности обычно называют *смачиваемостью*

поверхности. Присмотревшись к капле, можно увидеть, что по периметру она соприкасается с плоской поверхностью под некоторым углом. Этот угол очень мал, если капля легко смачивает поверхность и, растекаясь, уплощается, становясь похожей на блин. Если капля плохо смачивает поверхность, она имеет выпуклую форму, а угол соприкосновения с плоской поверхностью больше. На листьях лотоса форма капелек близка к сферической — они вообще не смачиваются.

В частности, это связано с тем, что листья состоят из молекул, которые практически не притягивают молекулы воды (про такую поверхность говорят, что у нее высокая *гидрофобность*). Поэтому поверхностное натяжение (взаимное притяжение молекул воды) стремится максимально уменьшить площадь поверхности капли, придавая ей сферическую форму. Многие другие твердые поверхности, например некоторые листья, тоже гидрофобные, и на них тоже образуются капельки.

На листьях лотоса капли воды напоминают бусинки еще и благодаря особой микроструктуре поверхности. Листья покрыты микроскопическими выступами, и их поверхность напоминает утыканную гвоздями доску (рис. 2.29). Капля не может провалиться между выступами-гвоздиками, поскольку они состоят из гидрофобного материала и расстояние между ними гораздо меньше размера капли. Не попадая в заполненное воздухом пространство между выступами, капля «садится» на их вершущки. Поскольку контакт с поверхностью листа минимален, поверхностное натяжение может свернуть каплю в практически идеальный шарик. Тогда, если лист хоть чуточку наклоняется, капля не растекается, а скатывается по нему. По пути на нее налипают грязь и пыль. Так скатившиеся капли очищают лист.



**Рис. 2.29 / Задача 2.93.** Капля воды имеет почти идеальную сферическую форму на поверхности листа лотоса с игольчатой микроструктурой.

Самоочищающиеся предметы домашнего обихода основаны на том же принципе. Например, есть оконные стекла, которые не требуют мытья. На поверхности такого стекла имеются микроскопические выступы, и образующиеся при мелком дождичке капли стекают по стеклу вниз и собирают всю пыль, грязь и копоть.



Это очень удобно, особенно если окна, как в небоскребах, находятся высоко над землей. Можно и машины покрыть самоочищающимся под дождем материалом.

## 2.94 • ТЛЯ И ЖИДКИЙ МРАМОР\*

Тля, сидящая внутри галла, должна избавляться от своих экскрементов, медвяной пади, иначе эта жидкость покроет насекомое и станет для него ловушкой, в которой оно утонет. Тля решает эту проблему, вынуждая жидкость выкатываться из галла. Как может жидкость выкатываться?

**ОТВЕТ •** Специальные эпидермальные клетки тли выделяют воскоподобное вещество, которое сначала склеивается, а затем дробится и превращается в порошок, покрывающий внутреннюю поверхность галла. Медвяная падь, выделяемая насекомым, сразу покрывается этим порошком. Кроме того, порошок создает микроскопические шероховатости на поверхности, на которую попадает падь. Как и капли воды на листьях лотоса в предыдущей задаче, медвяная падь собирается в шарики почти идеально сферической формы. Эти маленькие шарики не смачивают поверхность галла и не прилипают к ней и поэтому с легкостью выкатываются из него.

Шарик, обладающий теми же свойствами, можно сделать, смешав каплю воды с сажей или спорами плауна. Поскольку это гидрофобные материалы, их мелкие частички будут собираться на поверхности капли. «Одетая» капля, попав на такие привычные поверхности, как, например, горизонтальное оконное стекло, будет почти сферической. Обычно вода растекается слоем по стеклу, но теперь она собирается на нем капельками. На самом деле капельки «сидят» на микроскопических выступах, покрывающих их поверхность.

## 2.95 • КИСТИ, МОКРЫЕ ВОЛОСЫ И ПЕЧЕНЬЕ К ЧАЮ

Почему кисть удерживает краску? Почему губкой для мытья посуды или бумажным полотенцем можно вытереть разлитую жидкость? Почему длинные мокрые волосы слипаются?

Многим нравится макать печенье (или бисквит) в горячий чай или кофе, потому что при высокой

\* Жидкий мрамор — порошок из шариков липкого полимера, покрытых слоем гидрофобных наночастиц. Этот материал легко сыплется, но при растворении или сдавливании шарики теряют свое покрытие и порошок превращается в клеящий материал. *Прим. пер.*

температуре улучшается их вкус и аромат. Почему печенье становится мягким и разваливается на части, если его держат в чае дольше нескольких секунд? Как надо опускать в чай печенье, чтобы его вкус и аромат стали лучше, но само оно осталось настолько твердым, чтобы его можно было откусывать, а не вылавливать из напитка?

**ОТВЕТ •** Щетинки кисти притягивают молекулы краски, втягивая ее в промежутки между собой. Поскольку в этом случае движение краски аналогично втягиванию жидкости в узкую трубку (капилляр), говорят, что на краску действуют *капиллярные силы*. Благодаря этим силам, когда кисть вытаскивают из банки, на кисти остается большая часть краски. Когда кистью с усилием водят по поверхности (например, по стене или холсту), краска частично просто счищается с кисточки, но, главным образом, она с нее стекает, поскольку щетинки моментально распластываются по поверхности. При этом расстояние, отделяющее щетинки друг от друга, увеличивается, капиллярные силы уменьшаются, и краска вытекает из кисти.

У кухонного полотенца и губки имеется много пор, в которые капиллярные силы втягивают жидкость.

Мокрая прядь волос не распадается благодаря *слою жидкости* с искривленной поверхностью, который соединяет соседние волоски. Если концы волос погрузить в воду, она начнет подниматься между соседними волосками, одновременно изгибая их, чтобы приблизить друг к другу.

Печенье состоит из небольших сухих крупинок муки, удерживаемых вместе каркасом из сахара. Когда печенье погружают в жидкость, капиллярные силы быстро втягивают ее в поры печенья. Горячая жидкость растворяет сахар, разрушая каркас, и крупинки муки распадаются. Если вы хотите пить кофе или чай с мучной гущей, опускайте вертикально печенье в жидкость целиком. Если же вам больше нравится есть печенье, погружайте его на короткое время, под наклоном и не полностью.

## 2.96 • КАРТОШКА ФРИ

Когда нарезанную соломкой картошку (или тортилья — лепешки из кукурузной или пшеничной муки со специями) жарят в масле, на ее поверхности образуется красивая и вкусная корочка, а внутри картошка остается мягкой. Почему ломтики картошки поглощают масло и почему удерживают его большую часть *после того*, как картошку вынули из фритюрницы?

**ОТВЕТ** • Когда тонкие ломтики картофеля касаются масла, энергия, переданная от масла картофелю, повышает температуру его поверхности. После того как температура поверхности картофельных ломтиков достигает температуры кипения воды, вода в порах на поверхности начинает испаряться. Пузырьки пара вырываются из пор, и масло вблизи картофеля начинает бурлить. (Если фритюрница закрыта, начало этого процесса можно услышать.) Теряющая воду поверхность затвердевает. На ней образуется корочка, которая у нас ассоциируется с жареной пищей. Повышенная температура вызывает и некоторые химические реакции на поверхности, которые приводят к появлению характерного для жарящихся продуктов запаха.

При продолжении процесса жарки энергия передается внутрь ломтиков картофеля, которые теперь готовятся изнутри. Однако поскольку внутри ломтиков остается вода, температура не может существенно превышать температуру кипения воды. Таким образом, внутри ломтика картофель варится без дегидратации или образования структуры, похожей на структуру корочки на поверхности.

Однако вблизи поверхности, с глубины порядка одного или двух миллиметров, жидкость продолжает испаряться из пор. Когда ломтики картофеля вынимают из фритюрницы, они покрыты маслом, удерживающим оставшийся в порах водяной пар. Когда пар остывает, он конденсируется, но объем образовавшейся из него жидкой воды гораздо меньше объема, который занимал пар. Поскольку давление газа внутри пор уменьшается, масло из слоя, покрывающего поверхность, втягивается в поры. Втягивание масла могут усилить силы притяжения между молекулами масла и молекулами стенок поры. Это так называемый *капиллярный эффект*. Именно этот эффект доминирует, когда готовят чипсы: тоненькие кусочки картофеля жарят в масле до тех пор, пока в них практически не остается воды.

Если хозяйка хочет уменьшить количество масла, оставшегося после жарки, вынув готовую картошку из фритюрницы, ее надо или встряхнуть, или промокнуть масло бумажным полотенцем.

## 2.97 • КАК УТКИ ВЫХОДЯТ ИЗ ВОДЫ СУХИМИ ИЛИ ПОЧЕМУ «КАК С ГУСЯ ВОДА»

В умеренном климате утки (и другие водоплавающие птицы) должны оставаться сухими: если они намокнут, исчезнет теплоизолирующий слой воздуха между их

перьями и кожей. Тогда птицы будут отдавать энергию воде быстрее, чем метаболизм сможет восполнить ее потери. Но оперение явно не является водонепроницаемым, поскольку перья имеют пористую структуру. Как же утки остаются в воде сухими?

**ОТВЕТ** • Перья — образования из рогового вещества кератина, покрытого смесью воска и сложных эфиров. Этот *гидрофобный* материал отталкивает воду. Значит, капли воды скорее скатываются с перьев, а не смачивают их. Но не это главная причина того, что утки остаются сухими. Ведь когда они плавают, вода должна была бы втягиваться и внутрь перьев, и в пространство между перьями, выдавливая жизненно важный изолирующий слой воздуха и быстро охлаждая кожу утки.

К счастью для уток, поры (пустоты) между перьями и внутри них слишком малы, чтобы туда проникла вода даже тогда, когда давление воды под уткой пытается «протолкнуть» воду в поры или расширить их. Это связано с тем, что вблизи поры из гидрофобного материала поверхность воды становится выпуклой. Поверхностное натяжение (взаимное притяжение молекул воды) стремится вытолкнуть выпуклую поверхность из поры. Поскольку поры в перьях уток крошечные, поверхность воды искривлена очень сильно и поверхностное натяжение не позволяет воде попасть в поры.

Некоторые корзинки для фруктов состоят из переплетенных пластиковых полосок. Возникает ощущение, что держаться на плаву такие корзинки не могут, ведь из полосок не получается цельный каркас. Однако они прекрасно плавают: вода не может попасть в пространство между полосками.

## 2.98 • ПОЛОВИНКА КАРТОФЕЛИНЫ, ПТИЧИЙ ПОМЕТ И АВТОМОБИЛЬ

Если у вашей машины сломались дворники, а дождь не слишком сильный, достаточно протереть ветровое стекло разрезанной картофелиной, чтобы оно стало прозрачным. (Конечно, если у вас в салоне окажется вдруг эта картофелина.) Почему это вам поможет? Если птица «украсила» пометом вашу машину, и машина попала под дождь, когда дождь закончится, место вблизи помета высохнет быстрее, чем остальная машина. С чем это связано?

**ОТВЕТ** • Видимость через ветровое стекло уменьшается, когда на стекле образуются искажающие

изображение капли. Если вы протрете стекло снаружи срезом сырой картофелины, стекло покроется крахмалом, который сильно притягивает молекулы воды. Тогда вода тонким слоем растечется по всей поверхности стекла, и видимость будет вполне сносной.

Птичий помет частично растворяется в воде, и образовавшаяся субстанция слегка растекается вокруг места, куда он попал. На остальных местах дождевая вода образует капли, особенно если поверхность машины отполирована. Когда дождь кончается, тонкий слой, окружающий птичий помет, высыхает быстрее, чем полностью испаряются капли воды.

## 2.99 • КАТАПУЛЬТА ДЛЯ ГРИБНЫХ СПОР

Разные грибы распространяют свои споры по-разному. Однако самым необычным способом это делают так называемые спороболомицеты. Они с такой силой выстреливают своими спорами (их называют баллистоспорами), что из-за высокой скорости движения глаз человека не может за ними уследить. Каждая такая спора сидит на длинном клеточном выросте, который называют стеригма. Перед «выстрелом» у основания споры, там, где она прикрепляется к стеригме, образуется капелька воды. Примерно за 30 секунд размер капельки вырастает до 10 микронов, а затем неожиданно капелька воды вместе со спорой уносится в воздух. Что приводит капельку в движение?

**ОТВЕТ •** Когда баллистоспора созрела, из нее на поверхность выделяется некоторое вещество, стимулирующее конденсацию воды из воздуха. Наиболее быстро конденсация происходит в том месте, где зарождается капля. Также где-то на поверхности споры образуется крепко сцепленная с ней пленка воды. Капля растет, ее диаметр увеличивается, а пленка охватывает все большую часть поверхности споры и вскоре соприкасается с каплей. В этот момент благодаря поверхностному натяжению вода из капли толчком перебрасывается в пленку. При этом воде, устремившейся в пленку, передается такой импульс и такая кинетическая энергия, что спора отрывается от стеригмы и устремляется в воздух. Было посчитано, что ускорение споры при взлете равно 25 000 g (то есть в 25 000 раз больше ускорения свободного падения). Однако благодаря сопротивлению воздуха спора быстро замедляется, так что далеко она не улетает. Поскольку импульс и энергию для полета поставляет поверхностное натяжение, можно говорить

о катапульте, работающей на *поверхностном натяжении*.

## 2.100 • ВОЛНЫ НА ЛЬЮЩЕЙСЯ СТРУЙКЕ ВОДЫ

Подставьте палец под тоненькую (несколько миллиметров в диаметре) струйку воды из крана. Если расстояние от пальца до крана попадает в некоторый интервал значений, на струйке сразу над пальцем появляется рябь (рис. 2.30). С чем связано появление этих небольших волн? Почему, если сначала опустить палец в жидкое моющее средство, волны образуются выше по струе, а не у ее основания?

**ОТВЕТ •** Рябь обусловлена соударением льющейся струйки с пальцем. Это одна из разновидностей так называемых *капиллярных волн*, где колебания возникают благодаря поверхностному натяжению, обусловленному взаимным притяжением молекул воды. В нашем случае капиллярные волны распространяются вверх по струе со скоростью текущей вниз воды, и поэтому мы видим стоячие волны. Если заменить кран сосудом, из которого вытекает вода через дырочку в дне, скорость воды будет уменьшаться при уменьшении уровня воды в сосуде. Уменьшение скорости приводит к увеличению длины волны (расстояния между последовательными всплесками), а затем струя становится неустойчивой и распадается на капли.

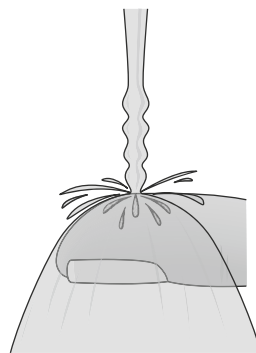


Рис. 2.30 / Задача 2.100. Стоячие волны на льющейся струйке воды.

Такие волны существуют благодаря достаточно большому поверхностному натяжению воды. Добавление жидкого мыла понижает поверхностное натяжение. Если палец сначала окунуть в мыло, а потом подставить под струю, внизу струи часть мыла смешается с водой, уменьшив ее поверхностное натяжение настолько, что волны здесь образовываться не будут. Теперь снизу течение спокойное, как в трубе, а сверху, над этим участком, образуется рябь.

### 2.101 • ВОДЯНЫЕ КОЛОКОЛА, ПЛЕНКИ И ЦЕПОЧКИ

Подставьте выпуклостью вверх ложку или какой-нибудь другой предмет округлой формы под спокойно льющуюся из крана струйку воды. Вы увидите, что, стекая с ложки, вода образует тоненькую пленку. Пойдет и любая плоская поверхность, например откручивающаяся пластмассовая крышечка от бутылки с газированной водой. Вставьте в крышечку два пальца, поднимите их вверх и подставьте под струю. Если вы действовали осторожно, водяная пленка, изгибаясь, почти сомкнется внизу, образуя *водяной колокол* (рис. 2.31). Такие изогнутые водяные пленки, напоминающие скульптуры из воды, украшают многие фонтаны. Как образуются *водяные пленки*?

Когда две тонкие струйки спокойно текут навстречу друг другу, тоже могут образовываться водяные колокола и относительно плоские водяные пленки. Если струйки вертикальны и скорость воды примерно одинакова, столкнувшись, они превращаются в симметричные пленки. Эти пленки могут либо распасться на капли, либо изогнуться, образуя колокол.

Если струйки текут вниз под углом друг к другу, могут образовываться жидкие цепочки, состоящие из ряда петелек с относительно толстым ободком. Следующие друг за другом петли взаимно перпендикулярны и образуют структуру, напоминающую звенья обычной цепи.

**ОТВЕТ •** Вода не растекается благодаря так называемому поверхностному натяжению — взаимному притяжению молекул воды. Пленка изгибается вниз из-за силы тяжести. Если при отрыве пленки от предмета, искривляющего ее поверхность, возникает существенная турбулентность, она становится нестабильной и рвется. Если турбулентность не слишком большая, образуется очень красивый водяной колокол.

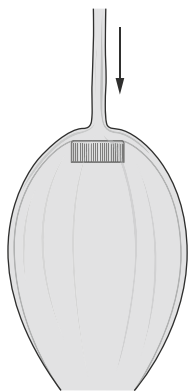


Рис. 2.31 / Задача 2.101. Водяной колокол из пленки воды, искривленной твердой поверхностью.

Иногда в скульптурах из воды используют не цилиндрическую струю, а пускают воду по плоской поверхности широким, неглубоким потоком. Отрываясь от края этой поверхности и стекая вниз, поток изгибается и образует водяной занавес. Однако, если поток слишком слабый, образуется не водяная пленка, а несколько отстоящих на равные расстояния друг от друга цилиндрических струй. Расстояние между ними определяется поверхностным натяжением, собирающим воду в струи.

Тонкие пленки из воды можно получить и тогда, когда две цилиндрические струи, вытекающие из близко расположенных отверстий, текут навстречу друг другу с примерно одинаковой скоростью. При их соударении вода растекается в разные стороны, и образуется пленка. Образование этой пленки и ее поведение существенно зависит от того, как были направлены струйки непосредственно перед столкновением. Если струи были направлены вверх, но не совсем вертикально, а наклонно, под небольшим углом к вертикали, образуется вертикальный диск или эллипс. Он разрушается по периметру, разлетаясь каплями. Если струи были наклонены к вертикали на разные углы, пленка приобретает форму листа.

Струи могут образовывать жидкие цепочки. В этом случае они, сталкиваясь, расходятся в разные стороны, но между ними остается тонкая, соединяющая их пленка. Поверхностное натяжение разворачивает струи обратно в направлении друг к другу. Они опять сталкиваются, а затем опять расходятся в разные стороны, но теперь в плоскости, перпендикулярной той, в которой образовалось первое звено цепочки. Вода продолжает стекать вниз, и сила соударения, как и ширина звеньев цепочки, уменьшается, пока она не превратится в одну цилиндрическую струю.

### 2.102 • ПО МОКРОМУ ПЛЯЖУ И ЗЫБУЧЕМУ ПЕСКУ

Если наступить на мокрый песок (но не настолько мокрый, чтобы в нем образовывались воронки), а затем поднять ногу, песок внутри вашего следа будет относительно сухим, а через несколько минут опять намокнет. Почему так происходит?

С чем связано появление зыбучих песков и как из них выбраться?

**ОТВЕТ •** До того как вы наступили на песок, его песчинки «упакованы» максимально плотно, а вода заполняет пространство между ними. Песок выглядит



мокрым из-за того, что мы видим отражение от воды на песчаной поверхности. Наступив на песок, вы его сдвигаете, перемещая отдельные участки друг относительно друга. В результате таких смещений расстояние между песчинками увеличивается. (Песок иногда даже называют *дилатантным* материалом: при сдвиге его объем увеличивается в сравнении с исходным состоянием, в котором песчинки плотно упакованы.) Вода с поверхности песка стекает в расширившиеся пустоты между песчинками, так что песок выглядит относительно сухим. Через несколько минут либо песчинки вернутся на место, либо в след наберется вода из нижних слоев песка или с окружающей его поверхности, так что поверхность песка внутри следа опять будет выглядеть мокрой.

Если гибкую пластиковую бутылку с песком и водой слегка сплющить, потихоньку сжимая, плотно упакованные песчинки начнут медленно сдвигаться, а вода будет просачиваться во вновь образовавшиеся пустоты, смазывая песчинки. Однако если попытаться сжать бутылку резко, песчинки начинают двигаться слишком быстро, без жидкой смазки. Тогда трение песчинок друг о друга будет настолько сильным, что бутылку вряд ли удастся сплющить.

Зыбучий песок — это песчаный пласт, в который поступает вода, например снизу, из естественных источников. Вода раздвигает песчинки и смачивает их настолько, что они могут скользить друг относительно друга. Наступив на такой «смазанный» песок, в нем можно увязнуть. Если попытаться быстро выдернуть ногу, зыбучий песок мгновенно становится твердым, так что ногой вообще пошевелить не удастся. Дело в том, что резкое движение увеличивает расстояние между песчинками, но их скольжение друг относительно друга приводит к появлению столь значительной силы трения, что они вообще перестают двигаться.

Зыбучий песок — плотная жидкость, и, в принципе, если вы увязли в ней, это еще не значит, что вы утонете. Можно представить себе такую идеализированную ситуацию: согнувшись в поясе, вам удалось на эту жидкость лечь. Тогда вы можете попробовать выбраться и, раскинув по поверхности руки, медленно вытаскивать ноги. Но люди, имевшие дело с зыбучими песками, говорят, что в природе зыбучий песок гораздо опаснее своего идеализированного аналога. Вполне вероятно, что зыбучий песок скрывается под водой (стоячей или текущей), так что ваша голова легко может оказаться под водой. Кроме того, упав в зыбучий песок, вы

оказываетесь ниже уровня, на котором можно плыть. И это совсем не похоже на бассейн, где вы выскакиваете на поверхность, как поплавок. Хуже того, можно изменить направление потока воды, делающего песок зыбучим, и тогда он затвердеет вокруг вас.

Бывалые люди советуют: единственный надежный способ выбраться из зыбучего песка — позаботиться заранее о своем спасении. Если встречу с зыбучим песком нельзя исключить, позаботьтесь, чтобы у вас на груди была веревка с незатягивающейся петлей, а на другом конце веревки был кто-то готовый вас вытащить.

### 2.103 • РАЗРУШЕНИЕ ЗДАНИЙ И ШОССЕ

Именно в тот момент, когда в Окленде должна была начаться третья решающая игра Главной лиги бейсбола, туда докатились сейсмические волны магнитудой 7,1 по шкале Рихтера, вызвавшие ужасные разрушения и гибель 67 человек. Эпицентр землетрясения находился примерно в 100 км от Окленда, вблизи горного пика Лома-Приета. По всему миру разошлись фотографии большого двухъярусного участка шоссе Нимиц, дороги, идущей вдоль залива Сан-Франциско. Сложившиеся вместе верхнее и нижнее полотно дороги стали ловушкой для многих автомобилистов; десятки человек погибли. Очевидно, что причиной этих разрушений были очень сильные вибрации, вызванные сейсмическими волнами. Но почему именно этот участок шоссе разрушился, а другие, почти такие же участки, не пострадали?

Девятнадцатого сентября 1995 года сейсмические волны от землетрясения на западном побережье Мексики привели к масштабным разрушениям в Мехико — примерно в 400 км от эпицентра землетрясения. Почему так пострадал Мехико, но на пути к этому городу разрушения были незначительны? Более того, почему в Мехико обрушились сравнительно невысокие дома, тогда как большинство более высоких и менее длинных зданий не пострадали?

**ОТВЕТ •** Шоссе Нимиц разрушилось на участке, построенном на рыхлом глинистом грунте. При толчках произошло *оживление* (или *флюидизация*) материала грунта. Это означает, что его частицы отошли друг от друга и грунт стал текучим, а не твердым. На такой текучий глинистый грунт сейсмические волны воздействовали гораздо сильнее, чем на соседние участки, где шоссе проходило через скалы. Одна из характеристик,



определяющих опасность сейсмических волн, — максимальная скорость, которую приобретают частицы, колеблющиеся вместе с волной. На глинистом грунте эта максимальная скорость была по крайней мере в пять раз больше, чем на остальных участках. Поэтому здесь шоссе буквально трясло до тех пор, пока не схлопнулись нижнее и верхнее полотно дороги.

Иногда, если происходит оживание, дома засасывает в грунт, как если бы они попали в зыбучий песок. Кроме того, могут образоваться гейзеры, выбрасывающие вверх фонтаны воды с песком.

Землетрясение в Мексике было мощным (магнитудой 8,1 по шкале Рихтера), но достигшие Мехико сейсмические волны были слишком слабы, чтобы привести к масштабным разрушениям. Однако большая часть этого города построена на месте, где когда-то было озеро. Почва там все еще мягкая, содержащая воду. По дороге к городу амплитуда сейсмических волн, распространявшихся в более твердых породах, была небольшой, но в рыхлой почве, на которой стоит Мехико, она существенно выросла. Кроме того, в рыхлой почве некоторые сейсмические волны отражаются от поверхности почвы и от твердого основания снизу (*фундамента*). Волны определенной длины усиливают друг друга, увеличивая движение грунта. Обязанное волнам ускорение составляло 0,2 g (две десятых от ускорения свободного падения), а частота колебалась вокруг значения 0,5 Гц. В результате грунт колебался достаточно сильно и на удивление долго, а собственная (*резонансная*) частота колебаний многих не слишком высоких зданий оказалась равной 0,5 Гц. Многие из таких зданий при толчках разрушились, тогда как более низкие здания (с большей резонансной частотой) и более высокие здания (у которых резонансная частота ниже) устояли.

## 2.105 • ЛЮДСКОЙ ПОТОК, И КАК ИЗБЕЖАТЬ ПАНИКИ

Когда плотность людского потока возрастает, что должны делать пешеходы, чтобы предотвратить хаос и столпотворение? Почему, когда во время чрезвычайной ситуации толпа людей старается выбраться из замкнутого пространства (комнаты, здания, стадиона) или когда в предвкушении чего-то очень интересного возбужденные люди, толпясь, пытаются прорваться куда-то, возникают заторы, грозящие иногда летальным исходом?

**ОТВЕТ** • Движение пешеходов — разновидность течения сыпучих тел или даже жидкостей. Если вы хотите изучать людской поток, найдите возвышение, откуда вы сможете безопасно следить за происходящим.

Когда плотность пешеходов небольшая, каждый человек или группа людей (скажем, семья) обычно выбирают наиболее короткий путь к цели. Это не обязательно будет движение по прямой, ведь человеку предписано ходить по тротуарам и пешеходным дорожкам. Но когда, скажем, на деревенской ярмарке людям разрешено ходить где угодно, то, чтобы добраться до лотка с сахарной ватой, они, скорее всего, пойдут к нему прямоком через поле. Когда плотность людей возрастает, любителю сахарной ваты придется двигаться зигзагом, иногда останавливаясь, чтобы избежать столкновения с другими посетителями ярмарки. Когда плотность станет еще больше, начнется формирование маршрутов, подобно тому, как потоки машин двигаются по улице с двусторонним движением. После начала такого *разбиения на группы или организации полос одностороннего движения*, чтобы избежать столкновений, люди двигаются согласованно, с определенной скоростью и на определенном расстоянии друг от друга. Теперь,

### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

#### 2.104 • ЗЫБУЧЕЕ ЗЕРНО

Упасть в большой контейнер с зерном очень опасно, это чревато даже смертельным исходом. Как-то раз один рабочий упал в зерновой бункер, на несколько метров заполненный зерном. Он быстро погрузился в зерно до подмышек и не мог высвободить даже руки. У рабочего было больное сердце, и давление зерна на грудь могло привести к серьезным последствиям. Поэтому спасатели пытались как можно скорее вызволить его, но преодолеть силу трения им не удавалось. Они пытались откопать рабочего, но зерно сыпалось в открытое пространство, а поднятая пыль мешала дышать и спасателям, и жертве. В конце концов спасатели опустили в бункер цилиндр, окружив им пострадавшего, с помощью промышленного пылесоса откачали из него зерно и лишь тогда смогли наконец освободить беднягу из зернового плена.

чтобы добраться до лотка, любитель сахарной ваты должен двигаться по одной или нескольким выделенным полосам движения, так что его путь может оказаться значительно длиннее, чем если бы он двигался по прямой.

Когда большое количество здравомыслящих людей пытается выбраться из замкнутого пространства через достаточно узкий проход, эти люди обычно, не останавливаясь, медленно двигаются друг за другом. Если же, спасаясь от опасности (например, от пожара), люди начинают паниковать, они скапливаются, образуя вокруг выхода нечто похожее на арки. Давление со стороны людей позади таких «арок» бывает столь велико, что стоящие ближе к выходу не имеют возможности нормально дышать и могут потерять сознание. В экстремальных ситуациях людей внутри «арок» могут просто раздавить, прижав к стенке или к барьеру (это наиболее опасное место). Или стенки и барьеры могут рухнуть, увлекая за собой людей. Люди все равно будут потихоньку просачиваться через проход, и это несколько разрядит ситуацию, но на их спасение потребуется больше времени, чем в случае, когда все спокойно покидают помещение.

Если стремящаяся к выходу толпа собьет кого-то с ног, упавшие будут помехой для бегущих. Груда тел может стать настолько высокой, что будет играть роль барьера, а это, конечно, очень опасно.

Чтобы люди, идущие в потоке, подвергались меньшей опасности, можно открыть дополнительные выходы. Однако если во время паники у одного из выходов образуется толпа, люди могут не сообразить, что другие выходы тоже открыты. На некоторых современных стадионах устроены специальные зигзагообразные проходы, которые постепенно расширяются к выходу. Они позволяют уменьшить вероятность столпотворения и исключают возможность быть прижатым к стене.

## 2.106 • КУЧКА ПЕСКА И САМООРГАНИЗУЮЩИЙСЯ ПОТОК

Потихоньку тоненькой струйкой начнем сыпать песок на горизонтальную поверхность. Кучка постепенно приобретет коническую форму. Она будет становиться все выше, а ее основание все шире. Почему угол раствора этого конуса не может превысить некоторое критическое значение?

Медленно перемешайте оранжевый порошок «Тан», из которого делают апельсиновый напиток, и коричневый порошок растворимого чая «Нести». Затем

медленно, узкой струйкой высыпьте эту смесь. Как и песок, порошинки образуют кучку. Однако порошок «Нести» собирается на дне кучки. Почему происходит такое разделение?

Медленно высыпьте смесь «Тана» и «Нести» с одной стороны узкого прозрачного контейнера. Почему при образовании кучки порошинки образуют чередующиеся полосы «Тана» и «Нести» (рис. 2.32)?

**ОТВЕТ •** Когда из сыплющегося песка начинает образовываться коническая кучка, песчинки на склоне конуса сцеплены благодаря трению. Угол наклона поверхности конуса постепенно увеличивается, пока не достигает некоторого критического значения. Затем какие-то песчинки начинают скатываться под уклон вниз, захватывая и другие песчинки, пока на части боковой поверхности конуса не происходит обвал. После этого угол наклона несколько уменьшается и дальше не меняется. Установившийся угол называют *углом естественного откоса*. Так происходит самоорганизация кучки песка. Это значит, что песок сам «организует» правильную форму — конус с углом наклона, равным углу естественного откоса. Различные пудры и сыпучие материалы (например, бисер, семена, сухой кускус и горох) имеют разные углы естественного откоса, значение которого зависит от формы, коэффициента трения и среднего размера частичек данного материала.

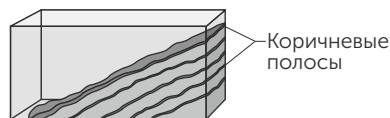


Рис. 2.32 / Задача 2.106. Коричневые и оранжевые полосы в кучке порошинок, насыпанных в контейнер.

Если на горизонтальную поверхность сыпать два порошка, предварительно смешав их, то, скатываясь по боковой поверхности кучки, они, вероятно, как-то разделятся и где-то закрепятся. Когда такую смесь насыпают в узкий контейнер, как описано выше, мы видим эту кучку в сечении. Когда начинается обрушение, порошинки большего размера стремятся занять место у основания склона, а скатывающиеся более мелкие порошинки цепляются за поверхность и образуют слой. Затем начинают тормозиться более крупные порошинки,двигающиеся вдоль поверхности, и тоже образуют слой. Итак, ряд обрушений попеременно формирует слои мелких порошинок (в смеси из «Тана» и «Нести» это порошок «Тана») и слои порошинок покрупнее.

Вертикальная стенка из сыпучего материала одновременно и осыпается лавинообразно, и проседает. Чтобы увидеть это, поставьте на стол открытую с двух концов трубку и заполните ее чем-то сыпучим. Затем резко поднимите трубку. Разрушение столбика порошка будет происходить быстро, так что надо следить внимательно либо снять все на скоростную камеру. Образовавшийся столбик разрушится примерно за полсекунды, но то, как это будет происходить, зависит от отношения высоты столбика к его поперечному размеру. Когда это отношение велико, немедленно осыпается вся верхушка столбика и остается горка с закругленной вершиной, а при малых его значениях сначала проседает наружная поверхность столбика, а за ней следует и его внутренняя часть. В результате получается горка с более острой вершиной.

### 2.107 • ТЕЧЕНИЕ В ПЕСОЧНЫХ ЧАСАХ И ЭЛЕВАТОРАХ

Поставим песочные часы на чувствительные весы. Записят ли показания весов от того, течет песок или нет? Течение песка во многом похоже на течение воды, однако есть существенное отличие — какое?

Если сыпучий материал, скажем, песчинки или стеклянные бусинки, положить на достаточно крутую наклонную плоскость, он ссыпается с нее. Почему, если наклонная плоскость шероховатая, а сыпучий материал состоит из крупинок разных размеров, *фронт потока* (его край) разделяется на языки, тянущиеся вниз по наклонной плоскости?

Предположим, сыпучий материал стекает по наклонной плоскости или желобку и наталкивается на препятствие, которое его останавливает. Почему, если материал поступает непрерывно, его течение периодически то приостанавливается, то возобновляется?

**ОТВЕТ •** На вопрос о песочных часах обычно отвечают так. Вес песочных часов слегка меняется, когда песок начинает течь и когда течение заканчивается, а в остальное время их вес такой же, как при покоящемся песке. 1. Когда песок начинает вытекать и до того, как первые песчинки достигнут доньшка, вес уменьшается, поскольку часть песчинок находится в свободном падении и вклад в вес не дает. 2. После того как песчинки ударяются о доньшко, вес находящихся в воздухе песчинок компенсируется силой соударения с доньшком. Поэтому большую часть времени вес часов остается прежним. 3. Песчинки до конца

продолжают ударяться о доньшко часов, но в конце в воздухе их остается слишком мало, а значит, вес часов слегка увеличивается.

Есть несколько замечаний, показывающих, что не все так просто. 1. Фактически песчинки начинают двигаться еще до того, как достигают горлышка часов, и поэтому, когда они начинают падать, у них есть некоторая начальная скорость. Поэтому перед самым соударением их скорость больше, чем предполагается при обычном рассмотрении. 2. Песок на дне накапливается, поэтому точка соударения песчинок постепенно сдвигается вверх. Этот сдвиг изменяет жесткость препятствия и время соударения, и, кроме того, в каждый данный момент число падающих песчинок меньше. 3. Есть несколько причин, по которым течение песчинок перестает быть плавным. При очень узком горлышке может возникнуть затор, и на короткое время над горлышком образуются скопления песчинок в виде сводов. Такой свод препятствует выходу воздуха из нижней половинки часов, увеличивая там давление воздуха. Это происходит до тех пор, пока воздух не прорывается обратно вверх через горлышко, *слегка* возмущая поток песка. Подобное возмущение может стать достаточно регулярным. В этом случае говорят, что песочные часы «тикают».

Своды могут образовываться и в потоке зерен внутри элеватора. В некоторых случаях прерывистый поток вынуждает колебаться (дрожать) и сам элеватор. Достаточно большие колебания иногда вызывают звуки, так называемую *сигнализацию элеватора*. Колебания, о которых элеватор сигнализирует, могут его повредить и вызвать обрушение.

В водяных часах скорость вытекания воды из верхней колбы зависит от высоты воды в ней: чем больше высота, тем больше скорость потока. Поскольку в песочных часах вблизи горлышка образуются недолговечные своды из песчинок, скорость вытекания песка из верхней колбы в нижнюю не зависит от его высоты. Все время, пока песок перетекает из одной колбы в другую, скорость потока постоянна.

Когда смесь частиц разных размеров скатывается по наклонной плоскости, передние частицы циркулируют в потоке двумя способами. В вертикальном сечении их движение описывается так: они сначала двигаются к поверхности, затем к фронту потока и вниз по наклонной плоскости. Когда поток пронесется мимо них, он их подхватывает, а затем возвращает на поверхность, и цикл повторяется. Между тем,

по ширине потока такие круговые траектории частиц варьируются. Некоторые ориентированы строго вверх и вниз по наклонной плоскости, а другие отклоняются вправо или влево. Из первых формируются вытянутые вниз по наклонной плоскости языки, а из других — промежутки между ними.

Когда на наклонной плоскости поток сыпучего материала наталкивается на препятствие и останавливается, он начинает скапливаться, область, где нет движения, распространяется вверх по наклонной плоскости до тех пор, пока весь поток не останавливается. Затем, если подача материала не прекращается, возникает течение по «наклонной плоскости» из остановившегося материала и цикл повторяется.

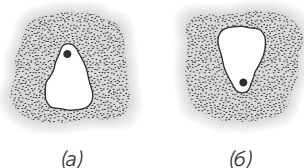


Рис. 2.33 / Задача 2.107. Область обвала: а) в тонком и б) в более толстом слое сыпучего материала.

Если наклонная плоскость настолько шероховата, что при течении по ней сыпучего материала часть его задерживается на ней, слегка увеличив наклон плоскости, можно вызвать обвал, разрушив в какой-нибудь точке этот остаточный слой. (Если этот слой неглубокий, нарушение (скажем, укол карандаша) приводит к обвалу в области, имеющей форму слезы, удлинённой вниз по склону (рис. 2.33а).) Если же слой толще, область обвала тоже имеет форму слезы, но тогда ее удлинённый конец направлен по склону вверх.

## 2.108 • ЭФФЕКТ БРАЗИЛЬСКОГО ОРЕХА И КОЛЕБАНИЯ ПОРОШКА

Положите в банку бразильский или любой другой большой орех и досыпьте в нее до половины арахис (или любые другие мелкие орешки). Потрясите сосуд, держа его вертикально. Почему бразильский орех окажется поверх арахиса?

Закопайте в большой банке с сухой фасолью мячик для пинг-понга, а поверх положите свинцовый шарик. Если заставить фасоль вращаться, раскручивая банку в горизонтальной плоскости, свинцовый шарик исчезнет из виду, а мячик для пинг-понга выскочит наверх. Почему они ведут себя по-разному?

Аналогичный эффект можно наблюдать, когда, замешивая тесто, соединяют жир с мукой. Чтобы избавиться от оставшихся комочков жира, хозяйке достаточно потрясти миску, и комочки жира поднимутся на поверхность муки. Коренные жительницы Австралии раньше использовали специальные мелкие посуды, чтобы отделить от пыли съедобные зерна. Женщины постукивали или слегка потряхивали посудину со смесью зерен и пыли до тех пор, пока зерна не образовывали один слой, а пыль — другой.

В прозрачный стакан насыпьте равные количества оранжевого порошка «Тан» для приготовления апельсинового напитка и темного порошка растворимого чая «Нести», закройте стакан и встряхните смесь. Как бы вы ни старались однородно и равномерно распределить порошок «Тан» по стакану, всегда останутся оранжевые островки «Тана», вкрапленные в «Нести». Почему не удается получить однородную смесь?

**ОТВЕТ •** Есть две причины, по которым бразильский орех может выбраться на поверхность заполненной арахисом банки. Во-первых, когда орехи встряхивают, маленькие орешки арахиса проваливаются в пространство под большим бразильским орехом, и таким образом он поднимается выше при каждом встряхивании. Чтобы большой бразильский орех опустился, освободить ему дорогу должно большое количество более мелких орешков. На практике такое вряд ли возможно, и по теории вероятностей бразильский орех должен продвигаться вверх, даже если плотность окружающих его небольших частиц сыпучего материала несколько меньше его плотности.

Вторая причина, возможно, влияющая на движение ореха, — циркуляция орешков арахиса, вызванная вертикальными колебаниями. Орешки в центре сосуда стремятся вверх, тогда как орешки вблизи стенки тормозятся ею, и восходящий поток в центре вынуждает их двигаться вниз. Этот поток может подхватить бразильский орех и вынести его на поверхность вблизи центра.

Опыт с фасолью и двумя шариками объясняется по-другому. Плотность свинцового шарика гораздо больше плотности зерен фасоли, а трение между гладкими фасолинками меньше, чем между орешками арахиса. Если вы раскручиваете или раскачиваете банку, свинцовый шарик зарывается в фасоль, а фасолинки легко проскальзывают друг относительно друга, освобождая ему путь. Если бы удалось еще больше уменьшить трение между фасолинками, они вели бы



себя практически как жидкость, и тогда уже никого не удивило бы, что свинцовый шарик тонет, а шарик для пинг-понга — всплывает.

Если случайно потревожить, но не раскачивать, смесь двух веществ, где частицы одного вещества существенно больше частиц другого, можно заметить, что частицы большего размера постепенно поднимаются. Такое разделение часто можно видеть в упаковках пищевых продуктов, содержащих два (или более) разных ингредиента, частицы которых различаются по средним размерам. Это смущает производителей продуктов, поскольку им хочется, чтобы при вскрытии упаковки покупатель увидел однородную смесь. Однако любое случайное возмущение при изготовлении, перевозке или покупке такой упаковки приведет к тому, что более мелкие частички провалятся вниз, под более крупные частицы.

Если встряхивать смесь «Тан» и «Нести», в действие вступают два механизма, не дающие получить однородную смесь. Один из них аналогичен тому, который мы уже рассмотрели в случае с бразильским орехом и арахисом. Слипшиеся частицы «Тана» становятся «большими частицами», понемногу выбираются наверх и делаются заметны. Вторая возможная причина — циркуляция частиц в объеме, аналогичная циркуляции орешков арахиса в предыдущем примере. Возможно, что первый механизм доминирует, если амплитуда колебаний велика (сильно встряхните контейнер вверх и вниз), а второй — при малой амплитуде колебаний (постучите по контейнеру ногтем так, чтобы порошок прилипли в движение).

Если слой «Тана» распределен по тарелке, совершающей вертикальные колебания, порошинки стремятся собраться в кучки. Постепенно меньшие кучки сдвигаются к большим, с которыми они объединяются. Возможно, такие смещения обусловлены тем, что под большими и маленькими кучками тарелка колеблется по-разному: под большими горками колебания слабее, чем под маленькими. Большие колебания подбрасывают порошинки в воздух. Порошинки, приземлившись вблизи больших горок, с большей вероятностью останутся на месте, чем оказавшиеся вблизи маленьких кучек. Таким образом происходит движение порошинок в направлении больших кучек. Альтернативная гипотеза — механизм, аналогичный поверхностной диффузии, то есть миграции.

А вот еще одна, последняя, загадка: заполните достаточно узкий кувшин солью до половины, опустите туда шестигранную гайку и кнопку с пластиковой

головкой (для доски объявлений). Если держать кувшин прямо и вертикально встряхивать, гайка останется на поверхности соли, а булавка зароется в нее и скроется из виду. Если же кувшин держать горизонтально и трясти тоже в горизонтальной плоскости, на поверхность соли выйдет булавка, тогда как гайка погрузится в соль.

### 2.109 • ЛАВИННЫЙ ШАР

Для защиты от лавин некоторые лыжники используют *лавинный шар*. Его упаковывают в рюкзак в другом виде. Заметив приближающуюся лавину, лыжник тянет за шнур и освобождает устройство, подающее в шар газообразный азот из баллона. Когда лавина захватывает лыжника, с шаром ему проще выбраться на поверхность движущейся массы снега, и его шансы выжить значительно выше. Почему лыжник движется к поверхности лавины?

**ОТВЕТ** • Фактически лыжник с лавинным шаром в потоке снега — это бразильский орех во встряхиваемой банке с арахисом. Газ в шаре менее плотный, чем несущийся с лавиной снег, и, следовательно, присутствует направленная вверх подъемная сила. Но одной лишь этой силы недостаточно, чтобы вынести лыжника на поверхность снега. Он движется вверх еще и потому, что объем лыжника с прикрепленным к нему шаром увеличивается: бразильский орех (лыжник с надутым шаром) гораздо больше окружающих его орешков арахиса (комков снега).

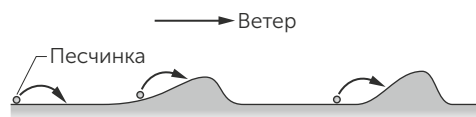
### 2.110 • ПЕСЧАНАЯ РЯБЬ И ДВИЖЕНИЕ

Почему в пустыне или на дне реки образуется песчаная рябь (миниатюрные дюны)? Что в этом случае определяет длину волны, то есть среднее расстояние между отдельными песчаными холмиками? Как растения (например, пучки травы) меняют структуру этих волн? Почему рябь обычно не появляется на снежниках?

**ОТВЕТ** • Сильный ветер, дующий вдоль изначально плоского (и сухого) пласта песка, передвигает песчинки. Песчинки могут двигаться медленно, ползти по поверхности, а могут перемещаться скачками, подпрыгивая и сталкиваясь в потоке ветра. Если песчинка опускается на плоский песчаный пласт, она подскакивает опять, но если поверхность приподнята (случайно образовался холмик), песчинка может на этом месте застрять (рис. 2.34). Когда холмик подрастает, он



собирает все больше песчинок и, кроме того, прикрывает от ветра песчинки с подветренной стороны. Однако песчинки, оказавшиеся чуть дальше от холмика в направлении движения ветра, могут продолжать прыжки до тех пор, пока не застрянут на следующем холмике. Растущий холмик круче с подветренной стороны, а его наветренная сторона более пологая. Пройдя через вершину холмика, воздушный поток разбивается на вихри с его подветренной стороны. Эти вихри направляют воздух вверх, забирают песок с подветренной стороны холмика, делая ее еще круче. Образовавшийся холмик сдвигается в направлении ветра, поскольку песчинки с наветренной стороны могут перескакивать через его вершину. Некоторые холмики двигаются быстрее других, они сливаются или, по крайней мере, сближаются настолько, что влияют друг на друга.



**Рис. 2.34 / Задача 2.110.** Скачки песчинок приводят к образованию песчаной ряби.

Проходят дни, недели, а может быть и годы, и постепенно образуется рябь, которую мы видим на песке. Раз появившись, песчаные холмики продолжают существовать благодаря ветру и скачкам песчинок. Конечно, если существенно изменится направление и сила ветра, структура ряби изменится тоже.

Если над песком спокойно течет поток воды, рябь образуется значительно быстрее. В этом случае холмики можно заметить уже через несколько минут.

Поскольку вблизи растений воздушный поток разбивается на вихри (или небольшие смерчи), ориентация и расстояния между холмиками с наветренной и подветренной стороны, например куста, различны.

Снежинки тоже могут передвигаться по снежной поверхности. Однако есть две причины, по которым в этом случае рябь не образуется (или, по крайней мере, обычно не образуется или не столь заметна). 1. Снежинки обычно остаются там, куда они упали, независимо от того, есть там возвышение из снега или нет. 2. На снежном поле часто, особенно после солнечных дней, образуется ледяная наст, исключаящий скачки. Однако до того, как образовался наст, сильный ветер может привести к появлению на снегу волновой структуры, особенно там, где с подветренной стороны какого-нибудь препятствия образуются вихри.

## 2.111 • ПЕСЧАНЫЕ ДЮНЫ

Почему образуются песчаные дюны? Как они могут двигаться? Когда сталкиваются две песчаные дюны, как могут они сначала объединиться, а потом разделиться? Как песчаная дюна может заставить другую дюну расступиться, чтобы освободить ей проход? На фотографиях со спутников видно, что в некоторых пустынях, например в Ливийской, дюны выстраиваются почти параллельно друг другу. Почему так происходит?

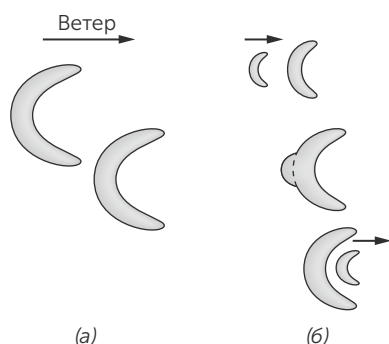
**ОТВЕТ •** Продольные дюны — длинные песчаные валы, ориентированные в направлении господствующих ветров. Барханы — дугообразные дюны, выгнутые в направлении, перпендикулярном ветру, а их «рога» (концы) вытянуты по ветру. Все дюны образуются из простой песчаной ряби и обязаны своим появлением способности ветра перетряхивать песчинки. Многие годы, а может быть и столетия, песчинки сгоняются в растущие холмы. Однажды образовавшийся холмик столь ревностно собирает песок, что рядом с ним другие холмики либо разрушаются, либо вообще не образуются.

Когда речь заходит о дюнах, вы, вероятно, представляете себе бархан (движущуюся дугообразную дюну), хотя они встречаются достаточно редко. Одиночный бархан постепенно движется по пустыне (или вдоль дорог и через небольшие деревушки), поскольку подхваченный ветром песок с наветренной стороны перебрасывается на подветренную сторону. Постепенно подветренная сторона бархана становится слишком крутой, затем происходит обвал, уносящий песок к основанию бархана, уменьшая угол наклона поверхности и так стабилизируя ее. Так год за годом бархан сдвигается в направлении ветра.

Барханы, которые можно видеть на аэрофото-снимках, часто расположены странным образом друг относительно друга: рог одного из барханов находится напротив центральной части другого (рис. 2.35а). Это связано с тем, как дюна, расположенная с наветренной стороны, меняет воздушный поток. По прошествии достаточно долгого времени поменявший направление ветер может изменить форму дюны с подветренной стороны, что и приводит к такой необычной картине.

За время человеческой жизни практически нельзя увидеть, как одна дюна обгоняет другую. Но если миниатюрные дюны образуются в потоке воды, все это займет считанные минуты. Взаимодействие двух дюн

происходит из-за того, что дюна, находящаяся выше по течению, изменяет характер течения воды. Кажется, что вода размывает центр расположенной ниже по течению дюны, чтобы образовался проход. На самом деле маленькая дюна выше по течению сливается с большей дюной ниже по течению, а затем от нее отделяется новая маленькая дюна (рис. 2.35б). Создается впечатление, что маленькая дюна прошла сквозь большую.



**Рис. 2.35 / Задача 2.111.** а) Вид сверху на два бархана.  
б) Создается впечатление, что маленькая дюна проходит через большую.

Расположенные почти параллельно продольные дюны образуются вследствие возникновения вихрей, или так называемой *лэнгмюровской циркуляции*. Там, где ветер дует над бескрайними плоскими песчаными пространствами, воздушный поток разбивается на горизонтальные вихревые трубы. Посмотрев вдоль одной из таких труб в направлении ветра, вы увидите, что проходящий через нее воздух медленно циркулирует либо по часовой стрелке, либо против (то, как движется воздух, можно увидеть с помощью дыма). В соседних вихревых трубах воздух циркулирует в разные стороны. Предположим, что мы смотрим в трубу, где воздух движется по часовой стрелке. Тогда по земле воздушный поток движется влево. В соседней слева трубе воздух циркулирует против часовой стрелки, а значит, на земле этот поток движется вправо. Поскольку такие два потока сходятся, они стремятся перенести песок в место «встречи». Именно там происходит образование продольной дюны. С другой стороны вихревой трубы потоки вместе не сходятся, и дюна не образуется. Поскольку вихревые трубы представляют собой почти прямые линии, продольные дюны тоже образуются вдоль прямых линий на расстоянии порядка удвоенной ширины трубы друг от друга.

## 2.112 • ЯРДАНГИ И ВЫВЕТРИВАНИЕ ПЕСКА

Почему на песчаном пляже большинство камней наклонены в направлении господствующих ветров и почему ко многим камням примыкают песчаные отмели? На некоторых пляжах можно видеть песчаные образования в форме башен: возвышающиеся колонны из влажного песка, на которых заметны разные слои песка. Они напоминают башни замка из многослойного торта. Обычно такие колонны окружены сухим песком.

Самые красивые формации можно увидеть в песчаных пустынях. Это *ярданги* — выступающие из песка скальные образования, напоминающие перевернутые корабли. Некоторые из них не больше ладони, другие же достигают сотен метров в длину. Подобные образования встречаются не только на Земле, но и на Марсе. Как же образуются ярданги?

**ОТВЕТ •** Если на пляже, где дует ветер, есть камень, хоть немного выступающий из сухого песка, ветер выкапывает перед камнем углубление и перебрасывает песок на другую сторону, где формируется песчаный выступ. В результате камни постепенно склоняются в сторону углубления, то есть по направлению к ветру. Если камень сверху плоский, ветер сначала окапывает его со всех сторон. Камень оказывается как бы на пьедестале. Затем ветер выкапывает песок перед подставкой, на которой стоит камень, и в конце концов камень наклоняется в направлении ветра. Там, где песок влажный, ничего подобного не происходит: *жидкие* связки скрепляют песчинки так сильно, что сдвинуть их с места нелегко. Однако ветер постепенно высушивает верхний слой песка, и тогда ветер может легко снести песчинки или их может подхватить летящий песок. Конечно, и потоки воды, например набегающие волны, вымывают песок из-под камней.

Башенки появляются на слипшемся (обладающем когезионной прочностью) песке за счет осадков, водяной пыли или просачивания воды из нижних слоев песка. Если в последних двух случаях увлажнение песка происходит на изолированных участках, именно эти места намокают и здесь песок слипается. Случается, что образовавшиеся возвышения на какое-то время покрывает сухой песок, но постепенно ветер и летящий песок сдувают его. В результате остаются отдельно стоящие башенки или горки.

Итак, ярданги — это скальные образования, обязанные своему появлению ветру и эрозии песка. Ветер

уносит со скал песок, обнажая их, а затем обдувает скалы песчаными струями. Скалы постепенно обтачиваются, превращаясь в узкие, вытянутые вдоль направления господствующего ветра гребни. Многие ярданги напоминают изогнувшуюся кошку. Возможно, именно ярданги в пустынях вблизи берегов Нила вдохновили древних египтян на создание сфинксов.

### 2.113 • СНЕГОЗАЩИТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ И ЭОЛОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ\*

Снегозащитные сооружения — это заборы или лесозащитные полосы вдоль шоссе и железнодорожных путей, призванные обезопасить дороги от снежных заносов. Где они должны быть расположены? Не будет ли сплошная стена более эффективна, чем сквозной забор? Или заборы строят только потому, что они дешевле? Почему снег скапливается вокруг таких препятствий, как валуны и стволы деревьев? А чем обусловлены свободные от снега круговые углубления, которые можно видеть вокруг стволов деревьев?

**ОТВЕТ •** Снегозащитные сооружения возводят для того, чтобы задержать переносимый ветром снег, не дать ему занести дорогу, поэтому с наветренной стороны дороги они должны быть хорошо укреплены. Сплошная стенка не слишком эффективна: в воздушном потоке вблизи нее образуются восходящие вихри, переносящие через нее снег. Гораздо лучше с этой задачей справится приподнятый на несколько сантиметров над землей забор из редких планок, прибитых на расстоянии ширины планки.

Когда начинается сезон снегопадов и снега еще не слишком много, снеговой щит приводит к образованию небольших вихрей по обе его стороны, благодаря которым пространство вблизи забора почти свободно от снега. Сугробы формируются с двух сторон забора, но непосредственно около него снега гораздо меньше. Щель внизу позволяет части воздушного потока образовывать вихри с обратной стороны забора, очищая пространство перед ней.

Когда скапливается достаточно снега, вершушки сугробов с обеих сторон забора начинают отклоняться в сторону забора и в конце концов касаются его. Теперь мы видим сплошной снежный холм, вершина которого

располагается на заборе, но мы не видим, что внутри, с каждой стороны забора, этот холм полый. После того как такой снежный холм образовался, забор становится бесполезным.

Когда ветер отклоняется большим валуном (даже камнем поменьше или каким-нибудь другим препятствием), он намечает снег позади него, сдувая одновременно боку и спереди.

Круговые углубления или свободные от снега кольца вокруг стволов деревьев образуются по двум причинам. Деревья — препятствия для ветра, который кружится вокруг ствола и уносит от дерева снег. Кроме того, в течение дня дерево, поглощая инфракрасное излучение солнца, нагревается. Ветви и ствол дерева переизлучают какую-то часть поглощенной энергии, отдавая ее снегу. Поскольку снег прекрасно поглощает в инфракрасном диапазоне, он поглощает практически всю эту энергию и начинает подтаивать или сублимировать (испаряться) вблизи ствола, где его глубина уменьшается.

### 2.114 • СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

Если вызвать лавину, как масса снега будет соскальзывать со склона горы? Как остановить лавину и предотвратить разрушение поселка у подножия горы?

**ОТВЕТ •** Когда начинается сход лавины, снег, особенно мелкий, поднимается в воздух и движется вперед как турбулентное облако частиц. Это облако быстро начинает захватывать и увлекать за собой воздух, уменьшая концентрацию частиц в потоке. Кроме того, оно собирает снег со склона горы. Быстрее всего двигаются частицы, находящиеся на небольшом расстоянии от склона горы и существенно ниже вершины лавины. Но частицы не спускаются прямо вниз по склону, а движутся по сложным траекториям. Скорость фронта лавины может достигать 100 м/с и более, а ее высота — сотен метров.

Для остановки лавин по склонам гор устанавливают высокие, прочно укрепленные сзади стены. Но прежде чем лавина достигнет стены, необходимо значительно понизить ее энергию. Для этого на склоне горы выше стены устраивают лавинорезы, клинья, насыпи. Их цель — изменить направление движения лавины, подняв снег в воздух, наподобие того, как трамплин подбрасывает лыжника, выполняющего прыжок. Когда снег снова обрушивается на склон горы несколько ниже насыпи, он теряет большую часть своей энергии.

\* Отложения на суше, образованные тонким рыхлым материалом, принесенным ветром. Названы по имени повелителя ветров Эола из древнегреческой мифологии. *Прим. пер.*

### 2.115 • ОПОЛЗНИ ДЛИННОГО ВЫХОДА

Когда склон горы не выдерживает и возникают большие оползни, обломки камней и почвы могут двигаться вниз даже по не слишком крутым склонам, а затем продолжать движение по плоской долине на расстоянии до нескольких километров. Это так называемые *оползни длинного выхода*. Случается, что такие оползни пересекают долину между горами и поднимаются вверх по противоположному склону. Почему трение между соскальзывающей массой и дном долины или склоном горы не приводит к быстрой остановке такого оползня?

**ОТВЕТ** • Большинство специалистов сходятся на том, что большие оползни длинного выхода возникают потому, что оползень соскальзывает вниз по некоторому слою, играющему роль смазки. Есть много гипотез относительно того, что собой представляет этот слой. Распространено мнение, что это слой воздуха. Но представляется, что воздух достаточно быстро будет вытеснен из-под массы соскальзывающей породы. И, кроме того, такой механизм не позволяет объяснить, почему подобные оползни бывают и на Луне.

По-видимому, наиболее правдоподобно следующее объяснение: оползень движется по тонкому слою маленьких колеблющихся осколков, включая и те, которые он сам соскребает с земли на своем пути. Такие колеблющиеся осколки ведут себя подобно шарикам в подшипнике, что позволяет объяснить две отличительные черты этих оползней: 1) почти не нарушается исходная слоистость сошедшей породы; 2) оторванные от земли обломки могут содержать воду, играющую роль дополнительной смазки и обеспечивающую еще большую дальность выхода оползня.

### 2.116 • КАМНЕПАДЫ

Камнепад — падение каменных глыб или массы камней со склона горы, обычно с крутого обрыва. Почему же камни падают и чем определяется место, где они останавливаются? Почему, когда при камнепаде со склона скатывается большое количество камней, они распределяются по размерам: более крупные камни оказываются у подножия горы, а камни меньшего размера останавливаются выше?

В июле 1996 года в национальном парке Йосемити, недалеко от места, которое называется Хэппи-Айлс, последовательно, один за другим, произошли два крупных обвала гранитной скалы. Каждый из обломков,

соскользнув с крутого склона, продолжил двигаться как снаряд и упал на землю примерно в 550 м от скалы. Удар вызвал сейсмические волны, зарегистрированные на расстоянии 200 км от места происшествия. Однако последствия этих обвалов оказались еще удивительнее. Более 1000 деревьев было повалено или сломано на расстоянии 300 м от места падения обломков, мост и закусочная стерты с лица земли, один человек погиб и еще несколько пострадали. Как гранитные обломки могли привести к таким разрушениям?

**ОТВЕТ** • Большинство камнепадов происходит из-за эрозии горных пород. Во-первых, расщелины, в которых вода скапливается, расширяются и углубляются при ее замерзании, поскольку вода, превращаясь в лед, увеличивается в объеме. Во-вторых, эрозия может происходить благодаря химическим процессам, особенно в условиях повышенной влажности. Эрозии подвержены любые скалы, но камнепады случаются только тогда, когда трещина выходит на поверхность крутой скалы. Какое-то время кусок скалы рядом с углубляющейся трещиной продолжает держаться, но наступает момент, когда его связь с остальной скалой оказывается недостаточной, и происходит обвал.

В зависимости от обстоятельств обломок скалы может упасть, пролетев какое-то расстояние по воздуху, несколько раз стукнуться о достаточно крутую скалу, скатиться, переворачиваясь, если крутизна не слишком велика, или соскользнуть вниз по отлогому склону. Во всех этих случаях обломок теряет большое количество энергии при столкновении с землей. Он теряет энергию и при столкновении с деревьями, поэтому для защиты от камнепадов часто устраивают лесополосу.

Когда в камнепад вовлечено большое количество разных обломков, они распределяются по размерам вдоль склона горы: большие обломки скатываются к основанию скалы, тогда как меньшие застревают в трещинах, углублениях и так далее. Обычно вблизи вершины остаются мелкие камешки, а большие валуны останавливаются у подножия горы. При некоторых камнепадах оторвавшиеся первыми обломки приземляются невероятно далеко от скалы, гораздо дальше других камней. По-видимому, это связано с тем, что они получают энергию от удара сзади от других катящихся и летящих обломков.

При камнепадах в национальном парке «Йосемити» падение каждого из обломков вызывало *взрывную воздушную волну*, то есть волну давления,

распространяющуюся по воздуху от места удара. Последствия падения второго, в три раза более тяжелого обломка были катастрофическими. Скорость ветра, бушевавшего среди деревьев, достигала 120 м/с. На самом деле взрывная воздушная волна от второго обломка была сверхзвуковой (ударной) волной, поскольку пыль, поднятая первым обломком, уменьшила скорость звука от нормального значения, равного 340 м/с, примерно до 220 м/с. Вблизи места падения воздушная волна распространялась со скоростью, превышающей 220 м/с, следовательно, быстрее звука.

### 2.117 • РАЗВЕВАЮЩИЕСЯ ФЛАГИ И ЛЕНТЫ

Что заставляет колыхаться флаг на флагштоке даже при умеренном ветре? Почему колыхнется листок, поднесенный к вентилятору?

Почему, если подбросить в воздух частично размотанный рулон туалетной бумаги, его свободная часть быстро приобретает волнообразный вид?

**ОТВЕТ •** Пусть плоскость флага составляет некоторый угол с направлением потока воздуха, так что воздух давит на одну из его сторон. Давление воздуха или расправит флаг, ориентируя его по направлению потока воздуха, или изогнет полотнище. Если скорость воздуха превысит некоторое критическое значение, этот изгиб станет нестабильным и флаг начнет развеваться.

Часто полоскание флага на ветру связывают с образованием вихрей. В самом деле, когда ветер просто расправляет флаг или заставляет его трепетать, свободный конец полотнища порождает вихри. Это означает, что образуются вихри, закручивающиеся попеременно вправо и влево и двигающиеся вместе с потоком воздуха (рис. 2.36). Вихри интенсивнее, когда флаг развевается, но они есть следствие, а не причина колыхания флага. Такие вихри формируются даже в том случае, когда мы имеем не флаг, а жесткий лист, который не развевается.

Другие гнущиеся листы, например лист бумаги, тоже можно заставить трепетать при постоянном ветре, если скорость движения воздуха превышает некоторое критическое значение, величина которого зависит от гибкости и материала листа.

Вероятно, любая падающая гибкая лента, утяжеленная с одного из концов, примет волнообразный вид. Волна распространяется вниз по ленте со скоростью, в два раза меньшей скорости падения ленты. Обычно чем длиннее лента, тем больше расстояния между

выпуклостями на ленте. Скорее всего, волнообразный вид ленты связан с нестабильностью воздушного потока, вынужденного двигаться вместе с лентой, падающей через неподвижный воздух. Попросту говоря, изгибаются и сама лента, и захваченный ею воздушный поток.

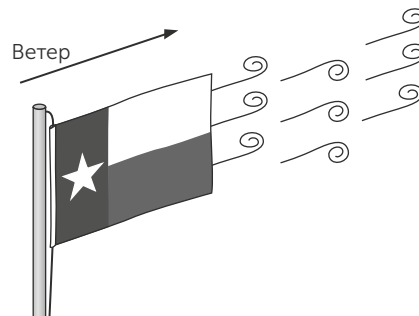


Рис. 2.36 / Задача 2.117. Образование вихрей, закручивающихся попеременно вправо и влево от плоскости флага.

### 2.118 • РАЗВЕВАЮЩИЕСЯ ФОНТАНЫ И ГРОХОЧУЩИЕ ВОДОПАДЫ

У многих фонтанов есть край, через который вода стекает в бассейн в виде полотнища. Почему у некоторых фонтанов такое водяное полотнище трепещет с частотой несколько колебаний в секунду? Эти колебания порождают и колебания воздуха, но их частота несколько ниже той, при которой можно услышать звук.

Более мощные и более высокие струи формируются тогда, когда бурный поток воды выливается через специальные пропускные каналы в запруде или перетекает через нее и свободно падает в бассейн или ручей. Почему такие струи могут создать настолько громкий звук, что он воспринимается как грохот скоростных поездов?

Стоя около высокого водопада, вы ощущаете колебания почвы. Если проанализировать эти колебания, становится ясно, что частота основных колебаний зависит от высоты, с которой происходит свободное падение воды: чем больше эта высота, тем меньше частота. Почему водопад вызывает колебания почвы и почему их частота связана с высотой падения воды?

**ОТВЕТ •** Ключ к объяснению причины трепетания воды в фонтане — слой воздуха позади полотнища падающей воды. Когда небольшое случайное возмущение на верху водяного полотнища заставляет его слегка колебаться, в процессе падения воды это колебание может усилиться. Достигнув дна, колебание вызывает изменение давления воздуха в слое позади падающей воды. Сжимаясь и разжимаясь, слой воздуха передает



это изменение на верх водяного полотнища: это положительная *обратная связь*, когда происходит самовозбуждение, усиливающее колебания. Хотя сначала этот процесс достаточно слабый и, возможно, даже незаметный, периодическое усиление и самовозбуждение поддерживают колебания, которые становятся весьма существенными. Однако такой круговой процесс имеет место только при определенной скорости течения, начальной скорости воды и толщине воздушного слоя. Поэтому не все водяные полотнища фонтанов трепещут.

Перетекающий через дамбу поток вызывает похожие колебания столба воды и воздуха между водой и дамбой. Инженеры-гидравлики называют такое движение воды *колебаниями переливающейся струи*. Часто дамбы строятся со специальными *прерывателями струи*. Они нарушают спокойное течение струи, чтобы предотвратить осцилляции, создавая более равномерную и плотную завесу из падающей воды.

В водопадах колебания и турбулентность воды при соударении с землей приводят к появлению звуковых волн, распространяющихся в объеме падающей воды. При определенных условиях эти звуковые волны входят в *резонанс* (то есть усиливают друг друга), и тогда колебания могут стать достаточно сильными. Это напоминает акустический резонанс в открытой с одного конца трубе, заполненной воздухом. Вблизи закрытого конца трубы молекулы воздуха не колеблются, а около открытого конца амплитуда колебаний максимальна. В звуке, издаваемом трубой, обычно преобладает так называемая *собственная частота* — самая низкая резонансная частота.

В струе водопада молекулы воды вообще не колеблются на вершине — там, где начинается падение воды, — а в самой низкой точке водопада они, наоборот, максимальны. Самые большие колебания соответствуют собственной частоте. Звуковые волны этой частоты распространяются в направлении от водопада по воздуху и по земле. Чем выше водопад, тем ниже собственная частота. Для большинства самых эффектных водопадов собственная частота слишком низкая, и человек не слышит звуковые волны, распространяющиеся по воздуху. Но он может ощутить их своим телом и почувствовать колебание земли под ногами.

### 2.119 • ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ФОНТАНЫ

Во многих декоративных водных устройствах, предназначенных как для улицы, так и для помещений, используются фонтаны, выбрасывающие струи воды вертикально вверх. Почему такие вертикальные струи

воды пульсируют, даже если скорость потока воды постоянна? Вы можете одновременно видеть и слышать эту пульсацию.

**ОТВЕТ •** Когда впервые струя взмывает вверх, вода достигает максимальной высоты, которая определяется силой притяжения и начальной скоростью струи. С этой максимальной высоты вода падает на бьющую вверх струю, сплющивая ее верхушку и разрушая ее. Когда верхняя часть струи распадается на капли, струя восстанавливается и опять достигает максимальной высоты. А затем цикл повторяется: подъем, падение, сплющивание, восстановление. Этот периодически повторяющийся процесс можно устранить, если немного наклонить струю так, чтобы верхняя порция воды не падала обратно на струю, или устроить препятствие, не позволяющее струе достигать максимальной высоты.

### 2.120 • РАЗЛИВАЕМ ЖИДКОСТИ: ПЕРЕВЕРНУТЫЙ СТАКАН И ЯРД ДЛЯ ЭЛЯ

В широкий стакан с отвесными боковыми стенками нальем немного, не до самого края, воды. Вырежем из картона квадрат, которым можно прикрыть стакан сверху. Накроем стакан картонкой и, разведя пальцы как можно шире, прижмем ее одной рукой к краю стакана. Другой рукой быстро перевернем стакан. Теперь уберем руку с картонки. Направленная вниз гравитационная сила действует и на картон, и на воду, но и картонка остается на месте, и вода не выливается. Почему?

Если убрать картон или он сам чудесным образом исчезнет, вода выльется из стакана. Чем эта ситуация отличается от той, когда стакан закрыт картонкой? Почему, если сосуд узкий (например, флакон с духами), вода из него не вытечет?

Ярд для эля — название особого стакана для пива (рис. 2.37) высотой в один ярд, то есть чуть больше 90 см. (Существуют стаканы той же формы, но пониже.) Обычно, когда вы пьете из стакана, вы подносите его к губам и, контролируя процесс, наклоняете стакан так, чтобы немного жидкости вылилось в рот. Почему, если вы попытаетесь проделать то же самое с ярдом для эля, то прольете пиво на себя? Как правильно пить пиво из такого стакана?

**ОТВЕТ •** Когда вы переворачиваете прикрытый картонкой стакан, столб воды немного опускается, благодаря чему понижается давление воздуха, оставшегося

в стакане. Значит, сверху давление на воду в стакане меньше атмосферного давления снизу, и этой разности давлений достаточно, чтобы удержать ее в стакане. Можно быть уверенным, что вода опустилась, поскольку картонка прогнулась вниз. При контакте воды, картона и края стакана возможна еще и адгезия — сцепление поверхностей разнородных тел. Но, чтобы удержать воду, силы сцепления недостаточно. Если попробовать повторить этот опыт, но вместо картона взять какой-нибудь негнущийся материал, столб воды не сможет опуститься и вода просто разольется.



Рис. 2.37 / Задача 2.120. Ярд для эля.

Если картонка неожиданно исчезает, давление воздуха по-прежнему может удерживать воду в стакане. Ничего не меняется в наших рассуждениях о силах, поддерживающих столб воды. Однако теперь система неустойчива относительно любых возмущений, которые возбуждают волны, распространяющиеся вдоль поверхности соприкосновения воды и воздуха. На нижних участках (долинах) таких волн вода стремится опуститься вниз, на участках сверху (гребнях волны) воздух стремится продвинуться вверх. Одна из волн быстро нарастает, и воздух движется вверх по одной стороне стакана, а вода движется вниз по другой.

Двигающийся вверх воздух стремится оторваться от поверхности воды снизу и образовать пузырек, а двигающаяся вниз вода стремится оторваться от верхней поверхности и образовать каплю. Пока пузырек поднимается, а капля опускается, поверхность раздела «воздух — вода» стремится восстановить свою прежнюю форму, но она слишком неустойчива. Поэтому вверх один за другим поднимаются пузырьки воздуха, а вниз из стакана каплют капли. Такой колебательный процесс опорожнения стакана по-английски называют *glug-glug*, используя звукоподражательный термин. На русский это можно перевести как «процесс буль-буль».

В узком сосуде поверхность воды нечувствительна к случайным возмущениям, потому что ее

стабилизирует поверхностное натяжение. Именно сцепление молекул воды на поверхности со стенками стакана способно загасить волны, вызванные возмущением.

Когда пьют пиво из стакана ярд для эля, именно «процесс буль-буль», бульканье, может стать причиной неприятностей. Узкое горлышко стакана не позволяет воздуху легко подняться в стакан, чтобы жидкость могла выливаться. При этом неустойчивость на поверхности раздела «жидкость — воздух» может неожиданно привести к образованию большого воздушного пузыря, который, поднявшись вверх, в стакан, позволит вылиться оттуда слишком большой порции жидкости, которую не удастся ни удержать во рту, ни быстро проглотить. Люди, умеющие мастерски управляться с ярдом для эля, знают, что, наклонив стакан, надо проворачивать его узкое горлышко между поднятыми вертикально вверх руками. При этом образуется воронка, приподнимающая жидкость вблизи стенок горлышка стакана, что позволяет воздуху проходить вдоль центральной оси. Теперь воздух легко попадает в стакан, а пьющий легко контролирует, сколько выливается жидкости.

## 2.121 • КАПЛЯ ЗА КАПЛЕЙ

Когда вода капает из водопроводного крана, как капле удастся оторваться от оставшейся в кране воды? Отрыв капли происходит неожиданно или тянется достаточно долго?

**ОТВЕТ •** На открытом конце крана поверхностное натяжение формирует из стекающей воды искривленную поверхность. Когда количество воды увеличивается, появляется капля почти сферической формы, свисающая из крана. По достижении некоторого критического объема сила тяжести заставляет каплю упасть. Если сделать «замедленную съемку»\* падения капли, можно увидеть, что какое-то время она связана с водой в кране быстро истончающимся цилиндрическим тросиком. Неожиданно на дне этого цилиндра образуется еще более тонкий тросик, который быстро рвется. Сразу после отрыва капля падает, причем ее поверхность осциллирует, а по оставшемуся цилиндру пробегают волны, быстро превращающиеся в крохотные капельки.

\* Это общепринятое, но принципиально неверное название — на самом деле съемка ускоренная. Прим. ред.

Чаще эти капли отделяются от цилиндра и падают, но их может и затянуть обратно в кран.

Если вязкость жидкости больше вязкости воды, может образоваться еще много следующих один за другим все утончающихся цилиндриков, напоминающих толпы зверушек из книги Доктора Сьюза «Кот в шляпе»\*. Это продолжается до тех пор, пока самый нижний и самый тонкий цилиндр не разорвется. Вероятно, этот разрыв вызывает случайное возмущение — движение воздуха, дрожание крана или даже громкий звук.

### 2.122 • ШОУ МЫЛЬНЫХ ПУЗЫРЕЙ

Когда через пластмассовое колечко вы выдуваете мыльный пузырь, мыльная пленка превращается в изогнутую поверхность, которая увеличивается в размере, а затем отрывается от колечка. Внутренность колечка остается пустой. Мыльная пленка — незамкнутая поверхность. Как же из нее после отрыва от колечка образуется сплошной пузырь? Почему свободно парящий пузырь имеет сферическую форму? Если между двумя близко расположенными колечками образуется цилиндрическая пленка, какую форму она примет, если медленно увеличивать расстояние между колечками?

**ОТВЕТ •** Когда вы дуете в мыльную пленку на колечке и начинает расти пузырь, в какой-то момент вблизи ободка на пузыре образуется тонкая шейка, *отрывающаяся* от колечка. При разрушении шейки часть оставшейся на колечке пленки уплощается и затягивает колечко, а оторвавшаяся часть мыльной пленки быстро приобретает сферическую форму. Пузырь имеет форму сферы, поскольку давление внутри него должно быть всюду одинаковым и превосходить атмосферное давление, чтобы поверхностное натяжение не схлопнуло пузырь. Раз давление внутри пузыря одинаковое, везде должна быть одинаковой и кривизна его поверхности, а значит, форма пузыря должна быть сферической. Если пузырь большой, вес его стенок становится существенным и форма может отклониться от сферической.

Если мыльный пузырь растянуть между двумя близко расположенными одинаковыми твердыми дисками, образуется мыльный пузырь цилиндрической формы. Эта форма устойчива, поскольку любое случайное возмущение приводит к увеличению ее площади,

\* Доктор Сьюз (настоящее имя Теодор Гейзел) — самый знаменитый детский писатель в США. Его сказки популярны в Америке так же, как в России — сказки Корнея Чуковского.

а следовательно, поверхностное натяжение опять придает пузырю цилиндрическую форму. Однако когда расстояние между дисками превышает их периметр, цилиндрический пузырь становится неустойчивым. Он лопается в результате любого случайного возмущения и превращается в два пузыря меньшего размера.

Тот же результат получится, если вместо дисков использовать два круглых колечка, полностью затянутых мыльной пленкой. Если пленка на одном из колечек порвется, давление внутри пузыря упадет до атмосферного, уравнив давления внутри и вне пузыря, а значит, кривизна поверхности пузыря должна стать равной нулю. Чтобы выполнить это условие, на пузыре появится шейка, что делает его похожим на песочные часы. Вдоль направления от кольца к кольцу поверхность пузыря вогнутая (кривизна отрицательная); вдоль направления вокруг пузыря поверхность выпуклая (кривизна положительная). Тогда, как и должно быть, суммарная кривизна точно равна нулю. Такой пузырь стабилен, только если расстояние между колечками гораздо меньше длины их окружности. Если колечки раздвинуть чуть дальше, шейка немедленно станет тоньше и разорвется, а пленка на каждом колечке сожмется и станет плоской.

### 2.123 • ТРАЕКТОРИИ ПУЗЫРЕЙ

Кажется, что пузыри, поднимающиеся со дна высоко-го цилиндра с водой, должны двигаться вертикально вверх. Действительно, именно так ведут себя маленькие и большие пузыри. Почему же пузыри промежуточных размеров поднимаются по зигзагообразным или винтовым траекториям?

Поднимающийся в воде пузырек должен иметь сферическую форму. Форма маленьких пузырьков именно такая. Почему же более крупные пузыри уплощаются снизу?

**ОТВЕТ •** До конца не ясно, как поднимаются пузырьки средних размеров. Судя по всему, зигзагообразное или винтовое движение обусловлено вихрями, образующимися под пузырьком, прокладывающим себе путь к поверхности воды. Если вихри поочередно образуются слева и справа, пузырек тоже может отклоняться влево и вправо. Похоже, что образование вихрей и изгибы траектории связаны с колебаниями поднимающегося пузырька.

Если два поднимающихся пузырька оказываются близко друг к другу, их движение меняет потоки воды,

текущей мимо каждого из них. Они могут начать кувыряться, их может разорвать на части, или они сближаются, слегка касаясь друг друга.

Форма любого пузырька определяется поверхностным натяжением жидкости и ее сопротивлением движению. В случае маленьких пузырьков с большой кривизной основную роль играет поверхностное натяжение: пузырек представляет собой сферу, площадь поверхности которой минимальна. Другими словами, энергия минимальна, когда пузырек имеет сферическую форму. Любое возмущение увеличивает его площадь поверхности, на что требуется дополнительная энергия. Кривизна больших пузырей меньше. Для них сопротивление жидкости играет существенную роль, а кильватерный след, остающийся за поднимающимся пузырем, может стать причиной его уплощения снизу.

Если пузырек образуется в очень вязкой жидкости, скажем в сиропе или густом шампуне, он движется вверх долго, а его форма может зависеть от того, как он появился. Так, у пузырька, прижатого жидкостью, например к стенке, после отрыва от нее может образоваться хвост, который сохраняется все время, пока пузырек поднимается.

#### 2.124 • АНТИПУЗЫРЬКИ

Смешайте в миске воду и мягкое моющее средство, а затем втяните немного этой жидкости в мягкую пластмассовую бутылку или медицинскую пипетку. Поместите горлышко бутылки или пипетки непосредственно над поверхностью жидкости и впрысните под поверхность чуть-чуть жидкости обратно в миску. У вас получатся обычные пузырьки, а также несколько пузырьков наоборот, или *антипузырьков*, которые и выглядят, и ведут себя иначе. Что же такое антипузыри и почему они образуются?

**ОТВЕТ •** Обычные пузырьки — это сферы из воздуха, на поверхности которых есть молекулы воды и мыла. Как и в случае мыльных пузырей, выдуваемых ребенком, молекулы мыла помогают стабилизировать поверхность пузырька. Антипузырьки представляют собой тонкую сферическую оболочку из воздуха, внутри которой находится вода, а молекулы воды и мыла распределены по обеим поверхностям оболочки. Поскольку антипузырьки почти целиком состоят из воды, выталкивающая сила, обеспечивающая движение вверх обычных пузырьков, на них не действует, и поэтому антипузырьки не рвутся вверх, а висят в воде.

Антипузырьки можно получить и другим способом. Сначала добейтесь того, чтобы у вас образовались три плавающих на поверхности и касающихся друг друга обычных пузырька. Затем капните водой с жидким мылом так, чтобы капелька попала в углубление между касающимися пузырьками. Под углублением образуется антипузырек.

В обычном мыльном пузырьке жидкость стекает с верхушки вниз, верхушка истончается до тех пор, пока не разорвется. В антипузырьке воздух внутри оболочки движется вверх, нижняя часть оболочки истончается до тех пор, пока ее не прорвет вода. Все это происходит очень быстро, поэтому антипузырьки живут так недолго.

#### 2.125 • РИС НА ПАЛОЧКЕ

Воткнем палочку в банку с сырым рисом или какими-нибудь другими зернами. Почему, когда мы пытаемся ввести палочку поглубже, требующееся для этого усилие быстро возрастает? И почему, когда палочка приближается к дну банки, приходится просто вколачивать ее, чтобы продвинуть чуть дальше?

Когда палочка достигнет дна, несколько минут слегка постучите по стенкам банки или потрясите ее. Почему, если вы затем потянете за выступающий из банки конец палочки, то поднимете банку вместе с рисом?

**ОТВЕТ •** Этот эффект заметили давно, когда купцы и покупатели заталкивали жердь в мешки с зерном, проверяя их содержимое. Если втыкать палку, например, в рис, трение возрастает по двум причинам. Во-первых, чем глубже продвигается палка, тем больше зерен к ней прижимается. Во-вторых, чем глубже зерна, тем больше вес давящих на них зерен и тем сильнее они сами давят на жердь. Поэтому полное трение, препятствующее движению жерди, возрастает с глубиной.

Трение возрастает еще быстрее, когда палочка доходит почти до самого дна банки. Этот эффект еще не до конца понятен, но можно предположить, что большое сопротивление перемещению зерен, которое необходимо для продвижения палочки, обусловлено формированием арок из зерен: зерна, заблокированные в арках, не пускают палочку дальше. (Арки из зерен могут быть столь же прочными, как и арки, возведенные архитекторами.)

Если после того, как палочка достигнет дна, постучать по банке или потрясти ее, зерна риса плотно упаковываются. В частности, они плотно прилегают



к палочке. Когда вы тянете за нее вверх, трение между зернами и палочкой крепко держит ее. Зерна, окружающие палочку, плотно подогнаны друг к другу, а зерна вблизи стенок банки крепко связаны со стенками. Таким образом, всё — палочка, рис и банка — соединено в одно целое. Однако если либо палочка, либо банка очень скользкая или если вы своими постукиваниями и потряхиваниями не добились плотной упаковки риса, вам придется немало повозиться, собирая рис с пола.

Если достаточно сильно тянуть за палочку, медленно вытаскивая ее, можно заметить, что необходимое для этого усилие меняется периодически. Хотя не вполне ясно, с чем это связано, вероятно, вблизи палочки происходит выстраивание и разрушение арок из зерен.

### 2.126 • МЕТАНИЕ ДИСКА

Когда при умеренном ветре бросают диск, он полетит дальше, если бросить его по ветру или против ветра? Под каким углом надо запускать диск и как его наклонять? Почему диск следует закручивать?

**ОТВЕТ** • Обычно угол стартовой траектории диска составляет  $35^\circ$ . Одни спортсмены утверждают, что и угол наклона диска должен быть таким же. Другие считают, что полет продлится дольше, если угол наклона диска примерно на  $10^\circ$  меньше. Они основываются на том, что при меньшем угле наклона подъемная сила, действующая на диск при спуске, больше, а следовательно, в воздухе он будет находиться дольше. Если диск запускают, не закручивая, он начинает вибрировать и легко теряет необходимую ориентацию. Закрученный диск более стабилен, он напоминает гироскоп: на протяжении всего полета ось, относительно которой он вращается, остается ориентированной примерно в одном и том же направлении.

Однако поскольку сила сопротивления движению диска со стороны воздуха распределена неравномерно вдоль его поверхности, во время полета ориентация диска все-таки слегка меняется. Если считать, что метатель диска правша и использует стандартную технику броска, вращательный момент неоднородной силы сопротивления слегка задирает диск спереди, а его левую сторону слегка опускает.

Если бросок выполняется против ветра, причем при умеренном ветре, давление воздуха на нижнюю сторону диска больше, чем на верхнюю, и возрастает подъемная сила, которая увеличивает дальность полета в сравнении с броском в безветренный день. Это

преимущество сохраняется до тех пор, пока скорость ветра не превышает примерно 15 м/с. Более сильный ветер нарушает ориентацию диска, который теперь быстрее падает. Если диск бросать в направлении ветра, эффект становится противоположным и дальность полета уменьшается.

### 2.127 • МЕТАНИЕ КОПЬЯ

При метании копья важную роль играют два угла, отсчитанные от горизонтальной поверхности земли. Это угол наклона стартовой траектории и угол наклона древка копья. Каким должно быть значение этих углов, чтобы дальность полета была максимальна? В частности, должны ли эти углы быть одинаковыми?

**ОТВЕТ** • Обычно считается, что оба эти угла должны равняться  $35^\circ$ . Это значение — итог многочисленных попыток. Хотя на их результаты может влиять большое число разных переменных, традиционная манера броска представляется вполне оправданной. Когда изначально древко копья направлено вдоль стартовой траектории, копье хорошо обтекается воздухом. Если древко наклонено выше или ниже, сопротивление воздуха больше, а полет короче. Однако, согласно некоторым теоретическим расчетам, копье полетит еще дальше, если угол наклона стартовой траектории увеличить до  $42^\circ$ , а угол наклона древка оставить равным  $35^\circ$ . При этом отдельные исследователи указывают, что на практике достичь оптимальных результатов не удастся: при увеличении угла наклона стартовой траектории запуск копья усложняется, и, скорее всего, спортсмен не сумеет придать копью достаточно большую скорость. Согласно другим расчетам, угол наклона стартовой траектории должен составлять  $32^\circ$ , а угол наклона древка — порядка  $17^\circ$ . Конечно, если наконечник копья направлен вниз, сила сопротивления воздуха увеличивается, но одновременно может увеличиться и подъемная сила (благодаря давлению воздуха на копье снизу) во время завершающей части полета. При большей подъемной силе копье может оставаться в воздухе дольше.

Обычно во время полета наконечник копья поворачивается вниз и утыкается в землю. Этот поворот происходит благодаря действующим на древко силам. Вес древка — это сила, сосредоточенная в *центре масс* (в центре распределения масс). Подъемная сила сосредоточена в *центре давления* (в центре распределения давления), расположенном обычно позади центра



масс. Во время полета подъемная сила поворачивает копье вокруг центра масс, так что оно втыкается в землю. После поворота копье становится более обтекаемым, и действующая на него подъемная сила становится меньше. Время полета, когда действует достаточно большая подъемная сила, можно увеличить, изменив форму древка так, чтобы приблизить центр давления к центру масс. Такое смещение уменьшит угол поворота древка, и подъемная сила будет действовать и во время снижения копья.

## 2.128 • ДВЕ СБЛИЖАЮЩИЕСЯ ЛОДКИ

Почему две лодки, плывущие рядом вверх по течению, стремятся сблизиться?

**ОТВЕТ •** Когда вода течет через ограниченное пространство между лодками, ее скорость увеличивается. Единственный способ получить энергию, необходимую для увеличения скорости, — отобрать ее у запасенной внутренней энергии. Внутренняя энергия зависит от давления, и поэтому давление воды между лодками уменьшается. Это уменьшение подчиняется уравнению Бернулли. С внешних сторон обеих лодок давление остается прежним, поэтому уменьшение давления между ними приводит к их сближению. Эффект увеличивается, если лодки плывут с той же скоростью относительно берега, но против течения, потому что их скорость относительно воды оказывается больше.

## 2.129 • АЭРОДИНАМИКА КАБЕЛЕЙ И ПРОВОДОВ

Сильный порыв ветра раскачивает тросы и провода линии электропередачи, толкая их в направлении ветра. Почему же некоторые тросы и линии электропередачи *пляшут* на ветру, иначе говоря, колеблются в направлении, перпендикулярном их длине и направлению ветра? Иногда такие колебания могут вызвать короткое замыкание, привести к обрыву проводов или разрушить опоры линии электропередачи. Обрыв проводов и разрушение опор случаются чаще, когда на провода налипают снег.

Колебания тросов стали причиной неприятностей после открытия в 1995 году вантового моста Нормандии — одного из самых длинных (2350 м) подвесных мостов в мире. Хотя пляска тросов не привела к разрушению моста, с ней было связано быстрое старение тросов, что привело к их незапланированной преждевременной замене.

В чем причина пляски тросов и проводов?

**ОТВЕТ •** Когда над тросом проносится ветер, с подветренной стороны воздушный поток разбивается на вихри. Если трос подвешен горизонтально, вихри срываются с троса попеременно то сверху, то снизу. В местах, где образовались вихри, давление уменьшается. Следовательно, давление сверху и снизу троса периодически меняется. Образование вихрей и периодические изменения распределения давления происходят с определенной частотой, зависящей от скорости ветра и диаметра троса. Если эта частота совпадает с собственной (*резонансной*) частотой колебаний троса, трос начинает раскачиваться, как говорят, входит в *резонанс*. Это и есть пляски проводов. Провода различной длины колеблются с разными частотами, но порывы ветра могут привести к колебаниям нескольких линий с разными резонансными частотами.

Чтобы спасти мост Нормандии от разрушения, строившие его инженеры наняли скалолазов, которые подтянули тросы и связали их веревками. Поскольку соседние тросы были разной длины, их резонансные частоты не совпадали. Связав в определенных точках тросы с разными резонансными частотами, удалось остановить пляску тросов. Связанные тросы гасили колебания друг друга.

## 2.130 • СКИМБОРД — ДОСКА ДЛЯ КАТАНИЯ НА МЕЛКОЙ ВОДЕ

Чтобы прокатиться на скимборде, бросьте на пляже округлую доску на кромку воды, так, чтобы она начала скользить, и вспрыгните на доску. Если все сделать правильно, можно продвинуться по воде на целых 10 м. Почему доска не останавливается сразу под действием веса скимбордера?

**ОТВЕТ •** В отличие от машины, тормозящей на мокрой дороге, в этом случае вода не играет роль смазки. Здесь при движении по воде скимбордер использует относительное движение воды.

Чтобы прокатиться на скимборде, на нем надо стоять так, чтобы передний конец доски был задран вверх. Тогда при достаточной скорости движения, давление воды снизу обеспечивает поддержку доски, позволяя ей оставаться над песком на дне. Однако сделать это не так просто. Если передний край доски задран слишком высоко, лишь малая часть дна доски будет погружена в воду и силы, действующей на доску со стороны воды, не хватит, чтобы удержать доску на плаву. А если ее передняя часть поднята меньше, чем нужно,

то площадь контакта достаточна, но нет роста давления под доской и в итоге доска не удержится на плаву. И конечно, катание тут же закончится, если передний край доски опустится в воду.

Сила сопротивления воздуха, действующая на скимбордера, может его затормозить, однако он может продлить катание, если согнется и уменьшит площадь поверхности тела, обдуваемой воздухом.

### 2.131 • ПОДЪЕМНАЯ СИЛА ПРИ ПОВОРОТЕ ЗА УГОЛ

Представьте, что в вашем автомобиле, окна которого закрыты, парит наполненный гелием шар. Почему при резком повороте положение шара относительно потолка меняется? Куда шар сдвинется: в направлении поворота или в противоположном направлении? Если машина поворачивает в холодную погоду, но с включенным обогревателем, почему меняется распределение теплого воздуха в кабине? В какую сторону перемещается теплый воздух?

**ОТВЕТ •** Если автомобиль делает резкий левый поворот, вас как будто отбрасывает в направлении, противоположном повороту, то есть вправо. Дело в том, что верхняя часть вашего туловища стремится продолжить движение в прежнем направлении, тогда как на нижнюю его часть со стороны сиденья действует сила трения, при повороте тянущая вас влево. Поэтому вы отклоняетесь в сторону, противоположную направлению поворота. Воздух внутри машины тоже стремится продолжить движение в прежнем направлении, но правая стенка машины заставляет воздух поворачиваться, что приводит к увеличению плотности воздуха внутри машины справа. Гелий легче воздуха, поэтому шар сдвигается в ту сторону, где плотность воздуха меньше. Следовательно, он отлетает влево, в сторону, противоположную отклонению вашего тела. Шар, наполненный газом тяжелее воздуха, например аргоном или углекислым газом, будет, естественно, вести себя противоположным образом.

Теплый воздух менее плотный, чем холодный, и при повороте влево он смещается влево. Если вентилятор не направляет воздух прямо в лицо водителю, во время поворота он может почувствовать на своем лице дуновение теплого ветерка.

### 2.132 • ОТРАЖЕНИЕ ВОЛН ПЕСЧАНЫМИ ОТМЕЛЯМИ

Каким образом скрытая водой песчаная отмель вблизи берега может отражать набегающие океанские волны?

Почему при определенном расположении отмелей (или искусственных препятствий под водой) океанские волны отражаются очень сильно?

**ОТВЕТ •** Океанскую волну мы видим распространяющейся вдоль поверхности воды, но движение продолжается и под ее поверхностью. Маленькие объемы воды совершают движение по вертикально ориентированным овальным орбитам, плоскость которых параллельна направлению движения волны. Отмель, расположенная не слишком далеко от поверхности, может заблокировать такое орбитальное движение. Большинство волн пройдет над отмелью, но какая-то их часть отразится и уйдет обратно в океан.

Если имеется несколько длинных, взаимно усиливающих отражение друг от друга отмелей, отражение от такой системы отмелей гораздо сильнее. Это так называемое *резонансное*, или *брэгговское*, отражение. Резонансное отражение имеет место в том случае, когда направление распространения волн перпендикулярно линии, вдоль которой вытянуты отмели, а их длина в два раза больше расстояния между отмелями. Представьте себе незатухающую волну, отражающуюся от двух следующих друг за другом отмелей. Часть волны, прошедшая через первую отмель, отражается от второй и затем проходит над первой отмелью (но уже двигаясь в обратном направлении), пройдя дополнительное расстояние, равное удвоенному расстоянию между отмелями. Если это дополнительное расстояние равно длине волны, то при попадании на первую отмель фаза волны будет равна (или кратна) фазе волны, отражающейся в то же самое время от первой отмели. Поэтому обратно в океан уходят две волны с одинаковой фазой, формируя результирующую отраженную волну большой амплитуды.

Короче говоря, когда отраженные, уходящие в океан волны совпадают по фазе, отражение является сильным, поскольку только малая часть первоначальной волны продолжает двигаться к берегу. Этот механизм отражения помогает защитить от волн берег и прилегающую к нему акваторию. Там, где вначале были одна или две отмели, волны, размывая и унося песок со стороны насыпи, обращенной в океан, могут переносить его через отмель. Этот песок осаждается, и ближе к берегу образуется новая отмель. Так волны «строят» отмели, находящиеся друг от друга на расстоянии, равном половине длины волны, что обеспечивает резонансное отражение.

Дело осложняется тем, что волны, накатывающие на берег, существенно различаются как по направлению, так и по длине. Поэтому для большинства волн условия резонансного отражения не выполняются.

### 2.133 • ДОЖДЬ И ВОЛНЫ

Насколько справедливо утверждение бывалых моряков, что дождь успокаивает океанские волны?

**ОТВЕТ** • Доля истины в этих словах есть, при условии, что дождь сопровождается не слишком сильным ветром. Когда капли дождя ударяются о воду, образуются небольшие, уходящие под воду вихри, капли вызывают колебания поверхности воды и иногда даже водяные брызги. Все это приводит к турбулентности верхнего слоя океанской воды, гасящей или уменьшающей амплитуду волн малой длины. Однако при сильном ветре, отклоняющем дождевые струи почти горизонтально, дождь может эти волны даже усиливать.

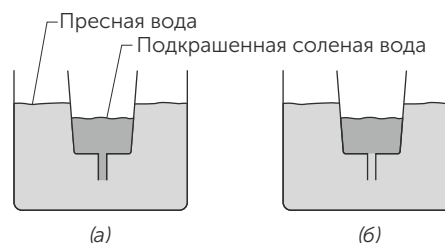
### 2.134 • СОЛЯНОЙ МАЯТНИК

Налейте воду в прозрачную кружку не до самого верха. Возьмите бумажный стаканчик, сделайте в его доньшке маленькое отверстие. Частично погрузите стаканчик в кружку, закрепите его на месте зажимом или положите сверху на кружку два столовых ножа. В отдельном сосуде приготовьте подкрашенный пищевой красителем раствор соли (лучше — насыщенный раствор) и медленно вливайте его в стаканчик до тех пор, пока уровень раствора в стаканчике не окажется чуть ниже уровня воды в кружке. Через отверстие потечет струйка подкрашенной жидкости. Затем струйка чистой воды поднимется через отверстие вверх. Такое циклическое попеременное движение жидкостей будет повторяться в течение нескольких минут, а может и часов. Что же приводит в действие этот своеобразный *соляной маятник*?

**ОТВЕТ** • Во-первых, представьте, что отверстие — это короткая узкая трубочка, заполненная изначально подкрашенной соленой водой (рис. 2.38а). Снизу этой трубочки поверхность раздела отделяет пресную воду от соленой. Будем считать, что вначале поверхность раздела находилась в равновесном состоянии. Это значит, что давление пресной воды под этой поверхностью равнялось давлению соленой воды над ней. Поскольку соленая вода плотнее, равновесие достигается тогда, когда высота столбика соленой воды над

поверхностью раздела меньше высоты пресной воды в кружке на том же уровне.

Хотя эта система находится в равновесии, она неустойчива относительно случайных возмущений, которые неизбежны. Предположим, результатом возмущения стало проникновение *небольшого* количества пресной воды в трубочку. Поскольку трубочка узенькая, высота жидкости в бумажном стаканчике заметно не изменилась. Однако изменилось давление, поскольку в части трубочки теперь более легкая жидкость. Поэтому в трубочке давление над поверхностью раздела стало меньше, чем раньше. В результате еще больше чистой воды пройдет по трубочке вверх. Это будет продолжаться до тех пор, пока уровень воды в бумажном стаканчике не повысится настолько, что давления на поверхности раздела опять сравняются. В этот момент трубочка будет заполнена пресной водой (рис. 2.38б).



**Рис. 2.38 / Задача 2.134.** а) В результате случайного нарушения равновесия пресная вода начнет выталкиваться вверх в трубочку. б) Вследствие нарушения равновесия подкрашенная соленая вода начнет притекать вниз в трубочку.

И опять установившееся равновесие на нижнем крае трубочки неустойчиво. Когда благодаря случайному возмущению небольшое добавочное количество соленой воды оказывается в трубочке, вес соленой воды в ней увеличивается, вызывая еще больший приток соленой воды в трубку. Через какое-то время система вернется в исходное состояние, когда трубочка будет заполнена только соленой водой. А дальше цикл повторяется много раз, пока вода не перемешается. На ход процесса, кроме собственно перемешивания, влияют еще диффузия и передача импульса, которая замедляет колебания.

Галилей описывал сходный опыт. Наполним водой шарик с узким отверстием и опрокинем в бокал красного вина. Вино будет втекать в шарик до тех пор, пока шарик не заполнится вином, а бокал водой. Галилей не упоминал о колебаниях, но можно предположить, что он их видел.

### 2.135 • СОЛЕВЫЕ ПАЛЬЦЫ И СОЛЕВОЙ ФОНТАН

Чтобы увидеть так называемые *солевые пальцы*, налейте в сосуд не до краев холодную чистую воду. Затем осторожно долейте теплую, слегка подсоленную воду, подкрасив ее, чтобы сделать заметной. Постарайтесь, насколько возможно, не вносить возмущений в систему, для чего соленую воду надо лить с небольшой высоты или на какой-нибудь плавающий предмет. Теперь сверху вода в сосуде легче, чем снизу: хотя в верхний слой воды добавлена соль, но наверху она теплее, а значит, легче. Казалось бы, если сверху вода легче, вся система должна быть устойчивой. Почему же тогда через несколько минут в холодную пресную воду от поверхности раздела начнут опускаться «пальцы» из подкрашенной соленой воды, а в нее потянутся «пальцы» из пресной воды (рис. 2.39а)?

Чтобы устроить *солевой фонтан*, наполните сосуд холодной чистой водой. Затем в дне бумажного стаканчика проделайте дырочку, переверните стаканчик и опустите его в воду (рис. 2.39б). Теперь долейте в сосуд теплую воду так, чтобы вода начала сочиться через дырочку в дне стаканчика. После этого добавьте в сосуд еще слой горячей соленой воды. И наконец, чтобы можно было наблюдать потоки воды, добавьте в сосуд рядом с дырочкой несколько капель пищевого красителя. Почему вода непрерывно выливается из дырочки? Теоретически «вечный» солевой фонтан можно «включить» в океане. Если он начнет работать, струя воды будет безостановочно подниматься из длинной трубы, опущенной почти на дно океана, где вода холоднее и не такая соленая, как на поверхности.

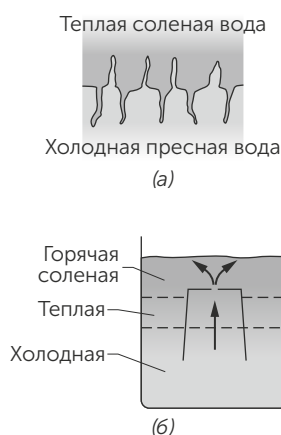


Рис. 2.39 / Задача 2.135.

а) Тонкие пальцы, отходящие вертикально вверх и вниз от поверхности раздела теплой соленой и холодной пресной воды. б) Течение воды в соляном фонтане.

**ОТВЕТ •** Система, состоящая из слоя соленой теплой воды поверх слоя холодной пресной воды, нестабильна по двум причинам. 1. Тепло достаточно быстро

передается через поверхность раздела от теплой воды к холодной. 2. Случайные возбуждения генерируют волны малой амплитуды, деформирующие поверхность раздела. Однако амплитуда одной из этих волн быстро нарастает, что приводит к образованию пальцев.

Чтобы понять, как развивается неустойчивость, рассмотрим нарастание одной из волн. Там, где волна выступает над поверхностью раздела (вблизи гребня волны), более холодная пресная вода поднимается в теплую соленую воду, а во впадинах (между гребнями волны) более теплая соленая вода опускается в холодную пресную воду. Выступающие области просто выровнялись бы, но тепло передается от теплой соленой воды (во впадине) вверх к гребню, где вода холоднее. Нагреваясь, вода в области вблизи гребня становится легче, а следовательно, поднимается выше. А вода во впадинах, охлаждаясь, продолжает опускаться. Амплитуда возмущения нарастает из-за передачи тепла, а из случайно возникшей волны формируются длинные пальцы.

Сходным образом образуются пальцы, если слой менее плотного раствора сахара находится выше более плотного раствора соли. И соль, и сахар перемещаются (диффундируют) через поверхность раздела между слоями, но соль диффундирует быстрее. Случайные деформации поверхности раздела могут просто исчезнуть, но соль продолжает распространяться вверх от поднявшихся участков и поступать в опустившиеся участки подслащенной воды. В результате возмущение развивается и приводит к образованию пальцев.

В солевом фонтане холодная вода, поднимаясь вверх через стаканчик, нагревается: тепло от более теплых слоев передается через его стенки. Таким образом,двигающаяся вверх вода становится легче и продолжает подниматься вверх. Когда она достигает дырочки, оказывается, что окружающая ее горячая соленая вода гораздо тяжелее, поэтому вода бьет из отверстия фонтанчиком. Подобным образом может работать и гипотетический солевой фонтан в океане. Если его один раз включить, поднимающаяся вверх по трубе вода будет нагреваться и становиться легче, поскольку при уменьшении глубины вода вокруг трубы становится теплее. Следует учесть, что соленость воды с приближением к поверхности увеличивается. Поднимающаяся по трубке из глубины вода остается менее соленой, а значит, поднявшись наверх, она оказывается легче окружающей ее воды и бьет из трубы фонтаном. Так в океане может работать «вечный» солевой фонтан — за счет перепада температур и соленостей.



### 2.136 • КАК ЖИДКОСТЬ ПОДНИМАЕТСЯ ПО СТВОЛАМ ДЕРЕВЬЕВ

Каким образом удастся деревьям, особенно таким высоким, как гигантские секвойи, поднимать воду к листьям кроны?

**ОТВЕТ** • До сих пор нет окончательного ответа на этот, казалось бы, простой вопрос. Общепринятый ответ иллюстрирует так называемая *модель сцепления-растяжения*: вода, испаряющаяся с поверхности листьев, понижает давление в непрерывной водяной нити, идущей от корней к листьям. Говорят, что на нить действует *отрицательное давление*, поскольку при подъеме вода растягивается. Конечно, воду можно сдавить, но идея о том, что ее можно растянуть, долго представлялась сомнительной. Считалось, что силы сцепления воды (взаимное притяжение молекул воды) растяжения не выдержат. Однако похоже, что растяжение и отрицательное давление реализуется в капиллярах (сосудах) дерева. Проще говоря, когда с листьев испаряются молекулы воды, на их место из корня поступают другие молекулы воды, поднимающиеся вверх по стволу благодаря большим межмолекулярным силам.

Однако споры вокруг модели сцепления-растяжения продолжают. Возможно, у некоторых растений кроме этого механизма реализуется еще один: подъем воды происходит поэтапно, напоминаядвигающийся через систему шлюзов корабль. Не исключено, что экологическая ситуация, например засуха, может влиять на способ, которым влага доставляется листьям.

### 2.137 • ВЕТРОВЫЕ ПОЛОСЫ НА ВОДЕ

Почему, когда над водоемом дует не слишком сильный ветер, пена, водоросли, листья и всякий плавающий мусор выстраиваются параллельными линиями?

**ОТВЕТ** • При определенных скоростях ветра в верхних слоях водоемов развиваются особые упорядоченные циркуляции, образующие длинные горизонтальные циркуляционные ячейки. Такие циркуляции называют *ленгмюровскими* по имени открывшего их ученого-химика Ирвинга Ленгмюра: во время плавания через Атлантический океан Ленгмюр наблюдал похожие полосы из коричневых саргассовых водорослей. Благодаря циркуляциям вода движется в направлении ветра по спирали. В соседних ячейках направления циркуляции противоположны. Предположим, вы смотрите вдоль ячейки, где вода движется по часовой стрелке (рис. 2.40). Тогда

в ячейках слева и справа от нее циркуляция воды происходит против часовой стрелки. Это значит, что на поверхности воды мусор из ячейки с циркуляцией по часовой стрелке сближается с мусором из правой ячейки с циркуляцией против часовой стрелки, но отдаляется от мусора из ячейки слева. Собранный таким образом мусор образует линию справа от выбранной ячейки. Другие линии формируются по сторонам других ячеек, а расстояние между линиями равно удвоенной ширине ячейки. Если на воде ничего не плавает, но на поверхности есть тонкая пленка какой-то примеси (например, масла или нефти), можно заметить ленгмюровские циркуляции, поскольку они превращают эти пленки в линии или узкие полосы. Поскольку тонкие пленки успокаивают волнение на поверхности воды, они отражают свет иначе, чем области, свободные от пленки.

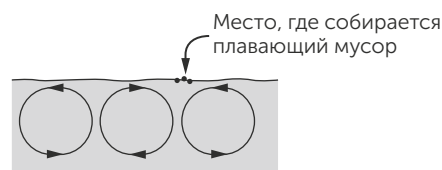


Рис. 2.40 / Задача 2.137. Циркуляционные ячейки собирают плавающий мусор.

### 2.138 • УЛИЦЫ ОБЛАКОВ И ПОЛОСЫ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Почему иногда из облаков формируются длинные тонкие линии, которые называют *улицами облаков*? Их трудно заметить с земли, но на фотографиях со спутников видно, что эти структуры настолько регулярны, что выглядят искусственными. Иногда они видны из самолета.

**ОТВЕТ** • В нижних слоях земной атмосферы крупномасштабные воздушные потоки часто приводят к образованию длинных параллельных вихревых трубок в направлении ветра. Глядя в этом направлении, можно заметить, что внутри трубки воздух движется по спирали. Как и в ячейках на рис. 2.40, в соседних трубках направления циркуляции противоположны: если в одной трубке воздух движется по часовой стрелке, то в ячейке рядом с ней — против часовой стрелки. Полосы облаков образуются там, где соседние вихри направлены вверх, а расстояние между ними равно удвоенной ширине трубок.

Ветер над охваченным пожаром лесным массивом тоже может стать причиной образования вихревых трубок, а разнонаправленные циркуляции в соседних



ячейках могут изменить картину горения. Там, где в соседних трубках поток воздуха нисходящий, менее вероятно, что деревья загорятся: такие циркуляции сбивают огонь в направлении мест с восходящими потоками. Так при устойчивом ветре огонь может распространяться по лесу параллельными полосами, а лес между ними остается нетронутым.

### 2.139 • УПАКОВКА M&M'S

Если наполнить банку круглыми конфетками или шоколадным драже M&M's, что будет весить больше: банка с драже M&M's или банка с круглыми конфетками? Плотности драже и конфеток одинаковы.

**ОТВЕТ** • Круглые конфетки упакованы в банке плотно (они занимают 74,08% объема), но между ними все же довольно много свободного места. Поскольку драже M&M's имеют форму сплющенного яйца, при их плотной упаковке свободного места останется меньше и банка M&M's будет весить больше.

### 2.140 • ГРУДА ЯБЛОК

Если сложить пирамиду из яблок или насыпать кучу песка, в каком месте такая структура сильнее всего давит на пол?

**ОТВЕТ** • Все просто, если построенная пирамида состоит, скажем, из блоков, уложенных в строго вертикальные столбики без всяких перемычек между ними. Тогда наибольшее давление на пол будет под самым высоким столбиком, то есть в центре пирамиды. Это давление уменьшается по мере того, как, продвигаясь к периметру, вы переходите от одного столбика к другому.

Однако если речь идет о куче яблок, песчинок или других тел неправильной формы, выстроить пирамиду из строго вертикальных, не связанных между собой столбиков не получится. Вместо этого каждый элемент кучи опирается на смещенные в сторону другие элементы под ним. В такой структуре сила реакции со стороны пола сдвигается к краю. Согласно экспериментам, максимальное давление на пол обычно достигается не в центре, а на окружности, расположенной между центром и периметром кучи.

### 2.141 • УЗОРЫ ИЗ ПОРОШКА

Узоры, которые называют *фигурами Хладни* в честь описавшего их немецкого физика Эрнста Хладни, образуются из беспорядочно рассыпанного песка

на горизонтальной достаточно долго вибрирующей металлической пластинке. Пластинку можно заставить колебаться, проводя смычком по одной из ее сторон или положив ее на громкоговоритель, подключенный к генератору. Почему образуются такие узоры? Почему узоры будут другими, если песок заменить мелкодисперсным порошком (например, меловой пылью)? Почему, если смешать песок и пыль, компоненты смеси разделятся?

Распределите мелкий порошок по возможности ровным слоем на горизонтальной стеклянной пластинке. Затем пластмассовой палочкой начните легонько постукивать по краю пластинки или проведите по нему смычком. Через некоторое время из порошка образуются небольшие конические кучки. Почему так происходит?

**ОТВЕТ** • В некоторых точках (их называют *пучностями*) металлическая пластинка колеблется наиболее сильно, а в некоторых точках (их называют *узлами*) не колеблется вовсе. Узлы располагаются рядом, образуя линии на пластинке (линии узлов). Песчинки, находящиеся вначале вблизи пучности, при колебании подпрыгивают и смещаются в сторону. После ряда прыжков они собираются в узлах (местах, где они могут оставаться в покое), делая линии узлов видимыми. Так образуется фигура Хладни. Какая именно из фигур Хладни образуется, зависит от формы пластинки и от способа, которым удерживают пластинку на месте (например, в местах зажимов колебания пластинки исключены).

Криминалисты, выясняя, сработал ли детектор дыма при пожаре, используют фигуры Хладни. Если при пожаре образуется копоть, ее частицы стремятся собраться на линиях узлов поверхностей, начавших вибрировать при включении звука детектора, предупреждающего о пожаре. Можно утверждать, что детектор дыма работал, если на таких поверхностях обнаружатся фигуры Хладни. Если их нет, вероятно, детектор был неисправен.

Если постукивать по пластинке, покрытой мелкой пылью, она совершает небольшие вертикальные колебания, поднимающие вверх пыль и вызывающие движение воздуха. Предположим, что в точке А собралось чуть больше пыли, чем вокруг нее. Лишняя пыль в точке А может так изменить колебания пластинки и потоки воздуха, что взлетающая вверх пыль вокруг нее будет стремиться переместиться к точке А. Хлопья пыли, опустившиеся на пыльное место, прилипают к нему,

тогда как на чистом месте они не задерживаются. Таким образом, пыль в точке А накапливается до тех пор, пока в этой точке не соберется вся пыль, находящаяся вокруг. Случайно образовавшиеся места, где накапливается пыль, распределены примерно на равном расстоянии друг от друга по всей пластинке.

### 2.142 • ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ОСЦИЛЛЯТОР

На рис. 2.41 изображена U-образная трубка с водой и двумя широкими входными отверстиями. Снизу центр трубки подогревается, а сверху ее колена охлаждаются. Устройство симметрично. Почему после начала нагрева и охлаждения вода в трубке начинает колебаться туда-сюда, переходя из одного колена в другое?

**ОТВЕТ •** При нагревании плотность воды уменьшается, так что теплая вода стремится вверх. Охлаждение увеличивает плотность воды, поэтому холодная вода стремится вниз. Хотя вначале все симметрично, в результате случайного малого возмущения в одном из колен вода может подняться чуть выше. Предположим, что возмущение направило теплую воду вверх по правому колену трубки. Это позволило холодной воде в левом колене опуститься. Теперь плотность воды в колене справа меньше, чем в колене слева, так что разность плотностей позволяет еще большему количеству теплой воды подняться по правому колену, а в левом колене холодная вода опускается еще ниже.

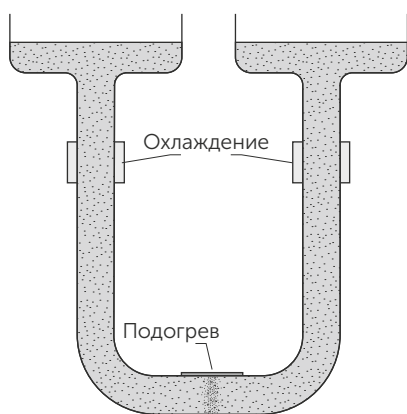


Рис. 2.41 / Задача 2.142. Вода колеблется из стороны в сторону.

Постепенно столб воды справа станет существенно выше столба воды слева, так что движение замедлится, остановится и продолжится в обратном направлении. Тем временем вода на дне трубки подогреется.

Поскольку теперь движение происходит в обратном направлении, теплая вода будет подниматься по левому колену. Затем цикл повторится.

### 2.143 • МАСЛЯНЫЕ КАПЛИ, ДВИГАЮЩИЕСЯ В ГЛИЦЕРИНЕ

Налейте глицерин в банку почти до краев, а затем долейте ее доплна более легким и менее вязким силиконовым маслом. Оставьте банку на ночь, чтобы дать этой смеси жидкостей отстояться (чтобы вышли все пузырьки), а затем закройте ее и переверните. Почему на дне банки (теперь дном стала крышка) в практически однородном слое масла образуются капельки, которые затем непрерывным потоком устремляются вверх? Этот эффект используется в некоторых современных игрушках, где капли одной жидкости двигаются не смешиваясь сквозь другую жидкость.

**ОТВЕТ •** В исходном состоянии (до переворачивания банки) система стабильна: масло плавает поверх глицерина. При обратном расположении жидкостей система неустойчива (это один из случаев так называемой неустойчивости Рэлея — Тейлора), и случайное возмущение, связанное, например, с переворачиванием сосуда, возбуждает волны на поверхности раздела между глицерином и маслом. Точно так же в ванне можно возбудить волны на поверхности воды (поверхности раздела «воздух — вода»). Одна из волн, нарастающая быстрее других, будет управлять всем процессом. Там, где расположены гребни этой волны, масло выталкивается вверх в глицерин и устремляется вверх, а в низких местах волны (долинах) глицерин проникает вниз в масло. Из масла, попавшего в глицерин, образуются движущиеся вверх капельки, а масло, выталкиваемое опустившимся глицерином, поддерживает образование новых капелек. Приблизительно равные расстояния между поднимающимися ручейками капелек дают представление о примерной длине волны — той, которая нарастала быстрее других.

А вот еще один похожий опыт. Оставьте на ночь банку с кукурузным сиропом. Вставьте в банку маленькую трубочку, через которую в банку с сиропом вблизи ее дна можно вливать смесь сиропа с водой. Эта смесь, вытекая из трубочки, образует капли. Поскольку смесь «вода — сироп» легче сиропа, капли устремляются вверх. Поднимаясь, они оставляют за собой след, играющий роль канала для подъема новых капель, выходящих из трубочки.

### 2.144 • ШАР В СТРУЕ ВОЗДУХА

Чтобы привлечь внимание покупателей, в некоторых универмагах демонстрируют шар, висящий в струе воздуха. В этом нет ничего удивительного, если воздушная струя направлена вертикально вверх: давление воздуха на шар снизу уравнивает силу тяжести. Однако покупателей больше привлекает устройство, в котором струя воздуха направлена под углом порядка  $45^\circ$  к вертикали. Как при этом удается удерживать шар? Почему, если толкнуть шар, он, частично выскочив из струи, возвращается обратно?

**ОТВЕТ •** Шар, висящий в струе воздуха, устойчив, поскольку он меняет направление воздушного потока. Если шар дергается вниз, будто пытается выскочить из струи, воздух обтекает шар сверху и устремляется вниз сначала вдоль поверхности шара, а затем струя отрывается и под некоторым углом устремляется вниз. Поскольку струя движется вниз, шар направляется вверх, обратно в струю. Неважно, что заставило шар попытаться покинуть струю, он отклоняет струю в том же направлении и, следовательно, вталкивается обратно. Чем легче шар, то есть чем меньше роль гравитации, тем под большим углом может быть наклонена струя.

Шар может висеть и в направленной вертикально вверх струе воды. Хотя шар прыгает и пытается выскочить из струи, он возвращается обратно. Единственное отличие в том, что теперь это струя воды, а не воздуха. Но и такую струю шар отклоняет, что объясняет его устойчивость.

Однажды мне попалась игрушка, состоящая из U-образной трубочки, одно из колен которой было коротким и узким. В узкое колено надо было дуть, и тогда легкий мячик, подхваченный струей воздуха, двигался вдоль всей трубки. Поднявшись, мячик проходил через другой открытый конец буквы U и втягивался обратно благодаря циркуляции воздуха. Цель игры — на одном дыхании как можно больше раз заставить мячик двигаться по всей трубочке туда-сюда.

### 2.145 • КОРАБЛЬ ФЛЕТТНЕРА

В 1925 году Атлантический океан пересек корабль, построенный немецким инженером-конструктором Антоном Флеттнером. Движителем корабля был не стандартный гребной винт в воде, а два больших вращающихся в воздухе цилиндра. Как вращающиеся цилиндры могли заставить корабль двигаться по воде?

**ОТВЕТ •** Если цилиндр неподвижен, воздух обтекает его симметрично с двух сторон. В каком-то месте зади цилиндра воздушный поток отрывается от него и распадается на вихри. Это обеспечивает некоторое воздействие на цилиндр, поскольку с наветренной стороны давление воздуха больше, чем с подветренной стороны (давление в вихрях ниже).

Однако сила, действующая на вращающийся цилиндр, существенно больше. С той стороны, где направление вращения цилиндра совпадает с направлением ветра, воздушный поток дольше не отрывается от цилиндра, а там, где вращение происходит против ветра, воздух отрывается от цилиндра раньше, чем с противоположной стороны. Суммарный эффект состоит в том, что вращающийся цилиндр отклоняет поток воздуха, направляя его в сторону вращения. Цилиндр (а следовательно, и корабль) получает импульс в противоположном направлении.

Таким образом, корабль может, в принципе, двигаться по воде, если менять направление вращения в соответствии с изменением направления ветра. На практике путешествие через Атлантику должно было оказаться сущим кошмаром: ведь требовалось, двигаясь зигзагообразно, непрерывно согласовывать ориентацию корабля с направлением ветра. Хотя, возможно, гребной винт корабля использовался чаще, чем об этом сообщалось.

### 2.146 • ГИБРАЛТАРСКИЙ ПРОЛИВ, МЕССИНСКИЙ ПРОЛИВ И СИЦИЛИЙСКИЙ ПРОЛИВ

Почему, когда корабль входит в определенный фарватер Гибралтарского пролива, он может неожиданно начать вращаться вокруг вертикальной оси или заваливаться набок? Давно известно, насколько вероломны воды Мессинского пролива, отделяющего Сицилию от Италии. У Гомера, назвавшего воды этого пролива свирепыми, олицетворением всепоглощающей морской пучины стали два чудовища — Сцилла и Харибда. С другой стороны этого острова, между Сицилией и Тунисом, находится Сицилийский (или Тунисский) пролив. Иногда во время больших приливов его воды наступают на большой сицилийский рыбачий порт Мадзара-дель-Валло: водяные волны устремляются вверх по старому устью реки. Чем можно объяснить странности течений в этих трех проливах?

**ОТВЕТ •** Причина странного течения в Гибралтарском проливе — *внутренние волны*, возникающие в приливно-отливном течении воды в проливе. Появление

таких волн обусловлено тем, что вода в Средиземном море солонее воды в Атлантическом океане, поскольку из Средиземного моря вода активнее испаряется. Когда более плотная соленая вода вытекает через пролив в океан, она преодолевает *подводный хребет* (возвышение на дне) моря, направляющий морскую воду вверх. Теперь морская вода покрывает поступающую (более легкую) воду из океана. Система, где более плотная вода движется поверх более легкой, нестабильна, и это приводит к появлению волн. На поверхности можно заметить только след этих волн в форме полос пенящейся воды, но амплитуда волн так велика, что они могут подхватить и перевернуть корабль.

Внутренние волны ответственны и за «свирепость» вод Мессинского пролива. Здесь подводная гряда разделяет более плотные и более соленые воды Ионического моря на юге и более легкие, менее соленые воды Тирренского моря на севере. Приливно-отливные колебания в Средиземном море, вообще говоря, невелики (всего несколько сантиметров), но в этих двух разделенных проливом морях такие колебания не совпадают по фазе (колебания не синхронны). Поэтому, когда в одном из них прилив, в другом — отлив, и вода перетекает через подводную гряду. Поскольку плотности воды разные, возбуждаются внутренние волны. На поверхности эти волны проявляются в виде пенных полос, напоминающих волны при сильном порывистом ветре. Таким образом, источник неприятностей для рыболовных судов в этом районе не чудовища из поэмы Гомера, а внутренние волны.

Странное поведение воды в Сицилийском проливе связано с *сейшмами* — стоячими волнами в замкнутых или частично замкнутых водоемах. В проливе возникают резонансные колебания, напоминающие колебания воды в кастрюле, которую вы переносите через комнату. Колебания воды в проливе могут быть так велики, что вверх по устью реки идет поток воды — аномально высокая приливная волна, которую называют *гидравлический прыжок*, или *бор*.

### 2.147 • РАЗБРЫЗГИВАНИЕ ГРАНУЛ

Почему, если тяжелый твердый шар бросить на слой твердых шариков гораздо меньшего размера, вверх брызнут узкие, очень интенсивные струйки мелких шариков?

**ОТВЕТ** • Когда тяжелый шар зарывается в слой из маленьких шариков, образуется цилиндрическая полость. Маленькие шарики выталкиваются на поверхность

по периметру полости. Скатываясь обратно и засыпая полость, они ударяются друг о друга, и некоторые из них отклоняются вверх, образуя струйки.

### 2.148 • НЕБОЛЬШАЯ МОРЩИНКА НА ТЕКУЩЕЙ ВОДЕ

Почему при правильном освещении на поверхности медленно движущейся воды небольшой речки или ручья можно заметить тонюсенькие линии? Обычно для этого требуется, чтобы солнце было низко и свет падал косо, но даже тогда надо тщательно выбирать угол наблюдения.

**ОТВЕТ** • На поверхности большинства небольших речек и ручейков имеется слой грязи. Он может образоваться в результате загрязнения окружающей среды или в силу естественных причин: например, из-за растительности на берегу. Обычно такой слой очень тонкий, и его трудно заметить. Иногда слой бывает толщиной всего в одну молекулу, и тогда его называют *монослоем*.

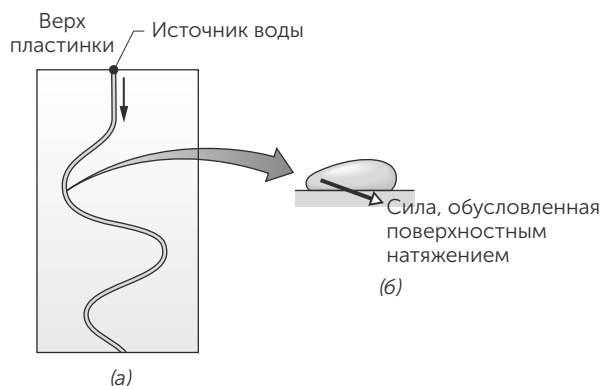
Прежде чем медленно текущей воде, натолкнувшейся на монослой, удастся продолжить движение под этим слоем, она скапливается перед ним, образуя небольшую морщинку. При правильном освещении эту морщинку, которую обычно называют *гребнем Рейнольдса*, можно увидеть благодаря различию между текущей водой с одной стороны и застойному слою с другой. В 1900 году это явление одним из первых исследовал английский физик Осборн Рейнольдс. Правда, не он был первым, кто обратил на него внимание. В 1774 году появление тонкой линии наблюдал Бенджамин Франклин\*, а начиная с 1854 года им занимался Генри Дэвид Торо\*\*. Гребень Рейнольдса можно заметить и на пруду или на открытой воде, если не слишком сильный ветер нагнетает чистую воду поверх загрязненного слоя.

### 2.149 • ИЗВИВАЮЩИЕСЯ ТОНКИЕ СТРУЙКИ

Если тонкая струйка воды стекает по гладкой стеклянной поверхности, наклоненной под углом, не превышающим 30°, она течет ровно. Если наклон больше 30°, струйка по-прежнему может течь ровно, а может отклоняться влево и вправо: она либо просто изогнется, либо будет петлять (рис. 2.42а). С чем это связано?

\* Бенджамин Франклин (1706–1790) — американский изобретатель, ученый, политик, дипломат, философ.

\*\* Генри Дэвид Торо (1817–1862) — американский писатель, натуралист, общественный деятель.



**Рис. 2.42 / Задача 2.149.** а) Вид сверху на наклонную пластинку; струйка воды изгибается. б) Поперечное сечение изгиба. С левой стороны кривизна больше, что приводит к появлению силы, направленной вправо.

**ОТВЕТ •** При низкой объемной скорости потока (количестве жидкости, проходящем через поперечное сечение потока в единицу времени) сила тяжести, действующая на воду, стремится направить струйку строго вниз по наклонной плоскости. Поверхностное натяжение (обязанное взаимному притяжению молекул воды) стремится уменьшить площадь поверхности воды. Действуя как упругая мембрана, оно поддерживает прямолинейный поток. Наверху пластинки сила тяжести ускоряет поток воды. Когда скорость воды увеличивается, площадь поперечного сечения струйки уменьшается: вода движется быстрее, и, следовательно, чтобы пропустить то же самое количество воды за одну секунду, требуется меньшая площадь. Однако при увеличении скорости потока трение воды о пластинку увеличивается до тех пор, пока сила трения не уравнивает проекцию силы тяжести на плоскость. После этого ни скорость, ни площадь поперечного сечения меняться не будут.

При несколько большей объемной скорости потока струйка становится нестабильной — скорость в поперечном сечении потока перестает быть постоянной. Из-за непостоянства скорости форма струйки перестает быть симметричной: с той стороны, где кривизна больше, больше и направленная к центру изгиба сила, обязанная поверхностному натяжению. Эта сила обеспечивает ускорение, направленное по радиусу, и, соответственно, движение по окружности.

Предположим, что струйка случайно слегка изогнулась. Ее изгиб станет заметным, только если обязанная поверхностному натяжению сила будет достаточно велика, чтобы, направить стекающую струйку

по диагонали пластинки. Рассмотрим рис. 2.42б, где изображено поперечное сечение изогнутой струйки. Слева его кривизна больше, чем справа, так что поверхностное натяжение приводит к появлению слева большей силы. Одна из составляющих этой силы направлена вправо, так что после поворота струйка потечет по диагонали направо и изгиб станет более явным.

Если объемная скорость потока станет еще больше, быстро движущаяся вода способна противостоять поверхностному натяжению. Струйка может проскочить изгиб, переместив его вниз. Или могут образоваться новые, текущие по диагонали струйки, так что изгиб вообще не будет, поскольку вода потечет по новому маршруту. Оставшаяся часть струйки затем спокойно стекает вниз по наклонной плоскости.

## 2.150 • СБРИТЫЕ ВОЛОСКИ И ЛОДКА НА КАМФАРЕ

Если коротенькие волоски из электрической бритвы вытряхнуть в воду (обычно так и происходит, если бреются в ванной), они, достигнув воды, разбегутся в разные стороны. Почему так происходит?

Лодка,двигающаяся с помощью камфары, — старая, сейчас почти забытая игрушка. Из алюминиевой фольги сделайте лодочку с клинообразным углублением на корме. Осторожно поставьте ее на воду, а небольшой комочек камфары поместите в углубление, так чтобы он чуть-чуть был погружен под воду. Лодочка немедленно начнет двигаться вперед. Что приводит ее в движение?

Если в тазик налить немного воды и выжать туда немного бытового клея, столбик клея, попав в воду, начнет покачиваться и вертеться. С чем это связано?

**ОТВЕТ •** На волосах обычно имеется очень тонкий слой жира. Когда обрезки волос падают в воду, они не смачиваются водой, и поэтому при приближении одного волоска к другому возникает сила, отталкивающая их друг от друга.

Камфара, приводящая в движение игрушечную лодочку, уменьшает поверхностное натяжение воды за кормой за счет того, что молекулы камфары замещают некоторые молекулы воды. Поверхностное натяжение воды перед носом лодочки не меняется. И нос, и корма лодочки притягиваются примыкающей к ним водой, но на носу это притяжение сильнее, поэтому лодочка движется вперед. Когда лодочка плавает, камфара постепенно уходит в воздух, переходя в газообразное



состояние, или распространяется по объему воды. Поэтому вся поверхность воды камфарой не покрывается, что привело бы к остановке лодочки.

Попавшие в воду кусочки клея очень похожи на камфару: они двигаются из-за того, что изменяют поверхностное натяжение воды вокруг себя.

### 2.151 • МАСЛЯНЫЕ ПЯТНА НА ДОРОГАХ

Почему масляные пятна на дорогах обычно напоминают овалы с длинной осью вдоль направления движения? Часто встречаются и пятна в форме колец.

**ОТВЕТ** • Когда капля масла отрывается от движущегося автомобиля, сначала она несется по воздуху со скоростью автомобиля. Если скорость автомобиля превышает некоторое критическое значение, капля раздувается и становится похожей на готовый оторваться от круглого пластмассового колечка мыльный пузырь. Надутая часть пузыря быстро рвется, а ободок разлетается в виде капелек, которые, ударившись о дорогу, образуют овальное кольцо. Отдельные капельки различимы, если взглянуть на пятно сразу после того, как оно образовалось.

По той же причине ограничен размер дождевых капель. Если падающая капля становится слишком большой, воздушный поток раздувает ее, превращая в пузырь, а затем этот пузырь лопається.

### 2.152 • КАПЛИ ВОДЫ И УЗОРЫ НА ГЛИЦЕРИНЕ

Почему, когда капля воды падает на тонкий слой глицерина, постепенно образуется фигура, напоминающая цветок?

**ОТВЕТ** • Этот цветок лучше заметен, если в воду добавить пищевой краситель. Падающая на глицерин капля воды разбрызгивается. Сначала в месте ее удара о воду в центре образуется небольшая выпуклость, а затем по периметру поднимается напоминающий чайную чашку ободок. Из-за неустойчивости сам ободок уже может быть не однородным, а с выступами. Разлетевшись от места падения капли, вода смешивается с глицерином и начинает двигаться вдоль поверхности раздела с воздухом. Движение обусловлено разным поверхностным натяжением на поверхности. Так как поверхностное натяжение воды больше, чем глицерина, смесь воды с глицерином оттягивает в радиальном направлении обратно к воде. Поскольку глицерин снизу тормозит нижние слои этой жидкой смеси, радиальное

движение приводит к образованию циркуляционных ячеек в слое «вода — глицерин». По периметру области, где произошел всплеск, случайные изменения формы границы, отделяющей воду от глицерина, усиливаются благодаря различию поверхностных натяжений. Примерно через 15 секунд образуется фигура, напоминающая цветок.

### 2.153 • ЛУЧИКИ ОЛИВКОВОГО МАСЛА НА ПОКРЫТОЙ ТАЛЬКОМ ВОДЕ

В мелкую миску нальем немного воды и сверху насыплем небольшое количество талька (детской присыпки). Слегка подуем, чтобы распределить тальк равномерно (поверхность воды должна выглядеть пыльной: частички талька очень маленькие и по отдельности незаметны). Выпрямим канцелярскую скрепку и ее кончиком сначала дотронемся до оливкового масла, а затем очень быстро где-то посередине покрытой тальком поверхности воды.

Если талька совсем мало и расстояние между его частичками велико, масло просто разгонит тальк и образуется практически круглое, свободное от талька пятнышко. Если талька много, масло не сможет растолкать его частички и останется каплей на поверхности воды. Однако если талька и не слишком много, и не слишком мало, образуются лучики, исходящие из точки, где скрепка коснулась воды. Почему так происходит?

**ОТВЕТ** • Масло стремится растечься по поверхности тонким слоем, возможно, даже монослоем толщиной в одну молекулу (когда-то на этом основании были получены данные о размере молекул). Если на пути масла талька мало, оно легко расталкивает его частички. Если талька слишком много, его частички образуют затор и не могут двигаться, и тогда масло остается на месте в виде капельки. Однако в промежуточной ситуации талька не так много, чтобы образовался затор, но достаточно, чтобы благодаря взаимодействию его частичек среда стала очень вязкой. В этом случае менее вязкое масло стремится проложить себе путь через более вязкую смесь талька с водой.

Граница между жидкостями с разной вязкостью нестабильна относительно случайных возмущений, приводящих к появлению волн вдоль этой границы. Каждая из таких волн — чередующиеся небольшие области внедрения масла в смесь талька с водой и талька с водой в масло. Одна из этих волн является доминирующей, и соответствующие ей внедрения быстро

нарастают, образуя узкие лучи. Когда эти лучи удлиняются, они очищают поверхность от талька, оставляя в покрытой тальком воде видимые чистые следы.

Подобные лучеобразные нестабильности часто изучают в ячейке Хеле-Шоу (названа по имени английского изобретателя Генри Хеле-Шоу). Это две пластины из прозрачной пластмассы, отделенные друг от друга тонкой резиновой прокладкой. Ячейку заполняют жидкостью. Вторая жидкость вводится шприцем в центр ячейки через маленькую дырочку в одной из пластин. Видно, что вторая жидкость растекается по первой наподобие лучей. Некоторые из них напоминают папоротники или лепестки цветов.

### 2.154 • ОСЦИЛЛЯТОР ИЗ КУРИНОГО ЖИРА

В середину узкого блюда, куда налиты аммиак и средство для мытья посуды, поместим капельку жидкого куриного жира от приготовленной курицы. Почему эта капелька пульсирует?

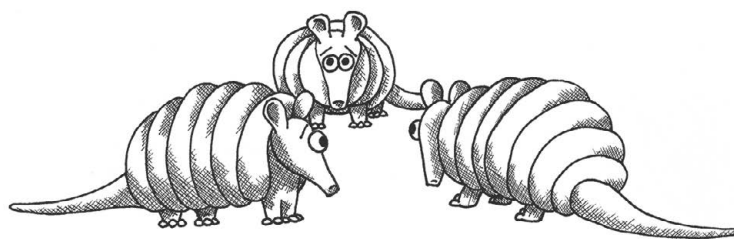
**ОТВЕТ** • В середине 1970-х годов этот эффект открыл Джеффри Мэй, преподаватель химии средней школы в Уэстоне. Он пытался отмыть сковородку, на которой жарил курицу. Мэй налил в сковородку горячую воду, а затем добавил нашатырный спирт и жидкое мыло. На поверхности воды образовались *масляные линзочки* (островки), начавшие пульсировать. Когда, чтобы приостановить испарение аммиака, он закрыл сковородку крышкой, пульсации прекратились. Мэй объяснил это явление, предположив, что благодаря

взаимодействию молекул мыла и масла каждая линзочка имеет «мембрановидное» покрытие.

В других сходных системах тоже проявляются колебания поверхностного натяжения. В нашем случае аммиак медленно смывает масло с куриного жира, после чего оно диффундирует (постепенно распространяется) по воде. Наличие масла уменьшает поверхностное натяжение вокруг капли. Поскольку вдали от капли поверхностное натяжение больше, жидкость вокруг капли оттягивается от нее в радиальном направлении, заставляя саму каплю расширяться.

Однако растекающееся масло наталкивается на молекулы мыла на поверхности воды. Теперь частички масла окружены молекулами мыла, образующими похожую на пену структуру, которая называется *афрон*, где гидрофобные (отталкивающие воду) концы каждой молекулы мыла направлены в масло, а гидрофильные (притягивающие воду) концы выставлены в воду. Когда масло «попадает в ловушку», поверхностное натяжение воды возрастает, что заставляет каплю вернуться в исходное состояние.

Затем цикл «расширение — сжатие» повторяется, поскольку движение растекающегося по поверхности воды масла приводит к притоку в это место воды и аммиака. Следовательно, новая порция аммиака попадает на капельку жира, и начинается новый цикл. Закрытие крышки прекращает испарение аммиака с поверхности капли, стабилизирует его концентрацию и закрывает цепь обратной связи и, следовательно, колебания.



## Глава 3

# Акустика

## Шорохи и звуки в ночной тишине

### 3.1 • ЗАВЫВАНИЕ ВЕТРА

Когда темной ночью за окном завывает ветер, нам кажется, что вокруг дома бродит кто-то большой и страшный. Почему?

**ОТВЕТ** • Когда поток воздуха обтекает препятствия, особенно выступающие края крыши или углы дома, он разбивается на вихри, которые уносятся потоком воздуха. В вихрях возникают перепады давления, и они разбегаются в стороны в виде звуковых волн — это и есть вой ветра. На улице вы полностью в его власти, но и в доме он вас достанет, поскольку может проникнуть и через оконное стекло, и через двери и стены. Он может настичь вас даже под одеялом (рис. 3.1).



Рис. 3.1 / Задача 3.1

### 3.2 • ГУДЕНИЕ ТЕЛЕФОННЫХ ПРОВОДОВ И ШЕЛЕСТ СОСНОВЫХ ИГОЛОК

Когда сильный ветер дует поперек телефонных линий или линий электропередачи, вы слышите, как гудят провода. Если же ветер налетит на сосновый лес, слышно, как шелестят сосновые иголки. Откуда появляются эти звуки? Если вы окажетесь осенним днем в сосновом бору, этот шелест, приходящий и уходящий вместе

со случайными порывами сильного ветра, успокоит ваши нервы.

**ОТВЕТ** • Когда ветер обдувает тонкий цилиндр, например провод или сосновую иголку, за ним ниже по течению воздушного потока образуются вихри. Говорят, что с цилиндра срываются вихри — сначала с одного бока, потом с другого, потом опять с первого и так далее. Образование вихрей изменяет давление воздуха, и цепочка изменений давления распространяется вниз по течению потока от цилиндра и образует звуковую волну — так называемый *тон золотой арфы*. Когда вы слышите какой-то звук, на самом деле вы чувствуете изменения давления воздуха из-за отрыва вихрей. Чем быстрее движется поток воздуха, тем чаще возникают эти изменения и тем выше частота звука.

Как и гитарная струна, цилиндр может колебаться на так называемых резонансных частотах. Если частота изменений давления случайно совпадет с одной из резонансных частот цилиндра, он тоже начнет колебаться на этой частоте. И тогда колеблющийся цилиндр сам будет излучать звуковые волны, и эти его колебания могут стабилизировать частоту отрыва вихрей и поддерживать ее на постоянном уровне, даже если скорость потока воздуха слегка изменится. Когда провода в телефонных линиях и линиях электропередачи колеблются, говорят, что они *пляшут*. Это довольно опасно, поскольку сильная вибрация может сорвать крепления проводов к столбам или опорам, особенно если провода обледенели.

Гудение телефонных проводов бывает особенно пронзительным и громким в очень холодные дни, когда из-за низкой температуры длина проводов уменьшается и они сильнее натягиваются между опорами. Если провода начнут плясать, их колебания могут передаться опорам, те тоже начнут вибрировать, и шум усилится.

### 3.3 • СВИСТ И СВИСТКИ

Каким образом человек издает свист, иными словами, как производится свистящий звук? Как при кипении свистит чайник со свистком? Люди изобрели множество разных свистков, в число наиболее известных входят английский полицейский свисток, американский полицейский свисток и многочисленные музыкальные инструменты, издающие звуки так же, как при свисте.

**ОТВЕТ** • Свист включает в себя три фазы: 1) поток воздуха встречает на своем пути препятствие и разбивается на вихри; 2) вихри вызывают периодические изменения давления воздуха, и это способствует распространению звуковой волны, которую мы и слышим, причем либо сами вихри, либо перепады давления в звуковой волне соединены обратной связью с набегающим на препятствие потоком воздуха; 3) если поток воздуха нестабилен (то и дело меняет направление или скорость), эта обратная связь еще больше усиливает нестабильность потока, а значит, увеличивается и количество возникающих на препятствии вихрей. Как только процесс образования вихрей и процесс обратной связи переходят в установившийся режим, мы слышим устойчивый звук, то есть свист.

Если вы свистнете, вытянув губы трубочкой, раздается так называемый звук *сопла* — вихри формируются, когда воздух с силой проталкивается через узкое отверстие, образованное губами. Их возникновению способствует то, что скорость потока в центре отверстия выше, чем по периметру — у губ. Часть звуковых волн, образованных вихрями, возвращается в рот (в *вокальный тракт*). Частота этого возвратившегося звука зависит от скорости, с которой вихри вылетают наружу через губы. В вокальном тракте на некоторых частотах, называемых *формантами*, звук может попасть в резонанс с собственными частотами тракта. Это означает, что волны будут усиливать друг друга, а не гасить. Если резонанс возникает на какой-то частоте — это и есть та частота, которую мы услышим.

Можно поменять резонансную частоту и, следовательно, частоту свиста, изменив форму вокального тракта — обычно, двигая язык вперед или назад. Повысить частоту свиста можно и сильнее выдувая воздух, тогда и частота возвращенного звука станет выше, то есть ближе к более высокой резонансной частоте.

Кипящий чайник со свистком издает так называемый звук *отверстия*. Свистящая деталь чайника состоит из цилиндра, в каждом основании которого

проделаны отверстия. Когда внутри чайника закипает вода, то есть ускоряется образование пара, воздух и водяной пар выходят через нижнее отверстие и образуют воздушный поток, который обдувает края второго, верхнего, отверстия, в результате в цилиндре образуются вихри. Перепады давления, возникающие при прохождении струи пара через второе отверстие, генерируют звуковую волну. Звуковые волны, вышедшие из цилиндра наружу и достигшие наших ушей, — это и есть свист чайника. Внутри цилиндра звуковые волны идут внутрь к первому отверстию и образуют обратную связь с поступающим внутрь цилиндра потоком. Обратная связь поддерживает турбулентность входящего потока и образование вихрей на втором отверстии.

Полицейский свисток производит так называемый *краевой звук* (*краевой тон*). Струя воздуха направляется на край отверстия, при этом поток разбивается на вихри, те срываются с края отверстия и порождают звуковые волны. Частота звука определяется резонансными частотами полости полицейского свистка подобно тому, как частота свиста через вытянутые трубочкой губы определяется собственными частотами полости рта. Но американский полицейский свисток устроен сложнее: в его внутренней полости скачет маленький шарик, он меняет ее конфигурацию (и, следовательно, резонансную частоту). Иногда он на мгновение затыкает отверстие, через которое полицейский выдувает воздух, и тогда поток воздуха прерывается. В результате свисток *издает трели* — и частота, и громкость свиста то нарастают, то спадают.

Подобным же образом издает звук флейта. Флейтист вдывает в нее воздух, и поток проносится через отверстие, огибая его край. Образовавшиеся вихри создают звук внутри камеры флейты, главным образом на резонансных частотах камеры. Часть энергии этих резонансных волн перекачивается обратно и идет на образование новых вихрей, так что вихри продолжают образовываться, резонанс — поддерживаться, и звук, который мы слышим, не прекращается.

Одно из самых любопытных устройств, издающих свист, — перуанская свистящая бутылка — керамическая бутылка для воды, которая изготавливалась перуанскими индейцами до прихода испанских завоевателей в 1532 году. В коллекциях сохранилось всего несколько экземпляров, однако ныне подобные устройства изготавливаются массово — в качестве сувениров. Бутылка состоит из двух камер, трубки,

выходящей из одной из них, а также свистка. В одной из камер находится вода, и, если наклонить устройство, вода переливается в другую камеру, вытесненный воздух проходит через свисток и мы слышим свист. При этом вихри входят в резонанс с собственными колебаниями малой воздушной камеры.

Самые громкие свисты издают сирены, предупреждающие об опасности. Они до сих пор используются на некоторых автомобилях экстренных служб, их можно увидеть и в городе, на крышах домов. В современных полицейских автомобилях предупреждающий звуковой сигнал обычно создается с помощью электронных устройств, а вот на некоторых пожарных машинах до сих пор устанавливаются механические сирены, поскольку они издают очень громкие и пугающие звуки. Во время Второй мировой войны для предупреждения населения о воздушных налетах и во время холодной войны при проведении учений применялись специально сконструированные для этого мощные сирены. (Если вы встанете рядом с такой сиреной, громкость звука может превысить болевой порог.) Хотя существует множество разных видов сирен, большинство из них издают звук отверстия, продувая сжатый воздух сквозь две цилиндрические соосные сетки, одна из которых вращается вокруг общей оси. Сирена издает звук, когда отверстия на двух сетках совпадают. Частота звука, издаваемого сиреной, зависит от скорости вращения сетки.

### 3.4 • РЕЧЬ И ПЕНИЕ

Каким образом вы говорите и поете? Что нужно сделать, чтобы произнести что-то шепотом? Почему так трудно разобрать слова, когда арию на сцене исполняет сопрано?

**ОТВЕТ** • Звук производится с помощью мускулов, которые называются голосовыми связками и находятся в гортани. Сначала связки с противоположных сторон горла сжимаются, и горло остается перекрытым, пока давление воздуха в легких возрастает. В какой-то момент связки мгновенно раздвигаются, воздух из легких проходит через них, в результате возникает турбулентность, которая заставляет связки колебаться. Эти колебания меняют давление воздуха, в результате чего вверх, в вокальный тракт, включающий в себя гортань, рот и носовую полость, поступают звуковые волны. Частоты этих звуковых волн соответствуют колебательным частотам голосовых связок. Самая низкая частота называется фундаментальной, или основной, частотой

голосовых связок. Другие частоты получаются умножением основной частоты на целое число. Например, если основная частота равна 70 Гц, другие частоты будут равны  $2 \times 70 = 140$  Гц,  $3 \times 70 = 210$  Гц и так далее.

Вокальный тракт представляет собой трубку, у которой один конец закрыт (со стороны гортани), а другой открыт (со стороны рта и ноздрей). Если звуковая волна имеет правильную частоту, в этой трубке может возникнуть резонанс. Эта частота называется *частотой форманты*, или просто *формантой*. Однако форманты — это не одиночные частоты, каждая из них — это участок спектра, в центре которого лежит частота, получаемая умножением самой низкой частоты на нечетное число. Например, если центр самой низкой форманты лежит на частоте 500 Гц, центры других формант будут лежать на частотах  $3 \times 500 = 1500$  Гц,  $5 \times 500 = 2500$  Гц и так далее.

Когда звук от голосовых связок поступает в вокальный тракт, колебания голосовых связок могут возбудить там какие-то форманты. Это означает, что звуковые волны на частоте формант внутри вокального тракта усиливаются настолько, что та их часть, которая покинула вокальный тракт, имеет достаточную мощность и ее можно услышать. По сути, вокальный тракт работает как фильтр на пути всех частот, генерируемых голосовыми связками. Этот фильтр можно перенастроить, изменив положение языка, открывая и закрывая рот, зажав нос или изменив высоту гортани по отношению к горлу, — все это изменяет частоту формант. Профессиональные оперные певцы не любят менять положение гортани, поскольку это мешает контролировать натяжение голосовых связок. Обычно они учатся удерживать гортань на месте с помощью мышц. Можно изменить частоту звуковых волн, направляемых в вокальный тракт, изменив натяжение голосовых связок: чем больше натяжение, тем выше частота. На первый взгляд это кажется сложным, хотя большинство из нас проделывает это уже в двухлетнем возрасте без всякой специальной подготовки.

Многие животные также могут извлекать звуки с помощью своей гортани. Некоторые даже умудряются контролировать частоту и амплитуду издаваемого ими звука, управляя мышцами гортани или размером вокального тракта. Некоторые, например говорящие попугаи и скворцы, могут столь мастерски управлять мышцами гортани, что им удается подражать человеческому голосу. Но только человек способен издавать такую богатую гамму звуков.



При шепоте голосовые связки расслаблены, так что поток воздуха проходит, не вызывая в них колебаний. Легкая турбулентность потока приводит к образованию звуков, которые возбуждают некоторые форманты в вокальном тракте. Для того чтобы говорить шепотом, нужно контролировать вокальный тракт и менять его размер и форму, главным образом с помощью языка и губ.

Чтобы сопрано, исполняющую арию в сопровождении оркестра, могли услышать в большом концертном зале, она должна громко петь на частотах значительно выше обычной нижней форманты ее вокального тракта. (Ей необходимо издавать звуки в том диапазоне частот, где оркестр обычно звучит тише, а человеческое ухо слышит лучше всего.) Конечно, она может напрячь свои голосовые связки, чтобы извлечь звук на высокой частоте, и потом подстроить эту частоту под высоко-частотную форманту своего вокального тракта, но при этом громкого звука не получится.

И громкость будет выше, и тембр пения богаче, если певица сдвинет нижнюю форманту в сторону более высоких частот и уже затем возбудит эту форманту. Для того чтобы сдвинуть форманту, она опускает нижнюю челюсть, открывает рот и раздвигает губы как будто в улыбке. Это эффективно уменьшает длину вокального тракта, то есть увеличивает частоту форманты, и тогда более высокие частоты из гортани могут возбудить первую форманту в вокальном тракте, что означает, что певица сможет петь громко на более высоких частотах. Однако за это придется заплатить: певица уже не сможет артикулировать определенные звуки, и поэтому слушателям будет непросто разобрать слова арии.

### 3.5 • КАК ГЕЛИЙ МЕНЯЕТ ГОЛОС

Я опишу один фокус, но только обещайте не проделывать его — он не просто опасен, а смертельно опасен. Если вдохнуть гелий и попытаться что-то сказать, то голос будет звучать неестественно высоко — точь-в-точь как у утенка Дональда Дака. Почему?

**ОТВЕТ •** Как объяснялось в предыдущей задаче, звук речи человека зависит от возбуждения различных формант в его вокальном тракте звуковыми волнами, производимыми колеблющимися голосовыми связками. Когда частота колебаний звуковых связок попадает внутрь частотного спектра определенной форманты,

звук с частотой этой форманты включается в голос человека. Частота (как центр частотного спектра, так и его диапазон) каждой форманты зависит от двух факторов. Первый — это длина и форма вокального тракта, их человек может контролировать, сдвигая язык и открывая и прикрывая рот. Второй фактор — скорость звука в вокальном тракте.

В обычном состоянии вокальный тракт заполнен воздухом, а скорость звука в воздухе — около 340 м/с. Однако если воздух заменить на воздушно-гелиевую смесь, скорость распространения звука значительно повысится (до 900 м/с). Это изменение скорости сдвинет все частоты формант вверх. Колебания голосовых связок будут происходить примерно так же, как и в воздухе, но теперь более высокие частоты этих колебаний возбуждают сдвинутые в область более высоких частот форманты вокального тракта. Относительная интенсивность формант тоже может измениться. В результате голос будет содержать более высокие частоты и изменится до неузнаваемости.

Опасность этого эксперимента очевидна: человек жив, пока он вдыхает воздух (точнее, кислород, содержащийся в воздухе). Но если вы заполните свои легкие гелием, то уже не сможете вдыхать кислород, и тогда организм начнет гонку со смертью. Уровень кислорода в крови станет падать, и ваша жизнь будет зависеть от того, успеете ли вы выдохнуть из легких гелий и вдохнуть вместо него кислород, пока не наступило удушье и не возникло кислородное голодание мозга.

### 3.6 • ГОРЛОВОЕ ПЕНИЕ

В Туве, республике на юге Сибири, есть певцы, которые могут одновременно выпевать две ноты: это называется *горловым*, или *обертонным*, пением. Один тон — монотонный низкочастотный звук, другой — высокочастотный, напоминающий звук флейты. Как может человек одновременно выпевать две ноты?

**ОТВЕТ •** И в обычной речи, и в пении гармонические частоты колебаний голосовых связок возбуждают в основном первую форманту в вокальном тракте (см. две предыдущие задачи). Возбуждаются и некоторые более высокие форманты вокального тракта, но они почти бессознательно воспринимаются слушателем не как отдельные ноты, а как окраска голоса (говорят, что они образуют *тембр* — спектральный состав звука,

параметры нарастания громкости звука и ряд других характеристик).

При горловом пении в монотонном низкочастотном гудении, возбуждаемом колебаниями голосовых связок, нет ничего особенного. Фокус в высокочастотном звуке, который кажется отделенным от монотонного низкочастотного звука (или «плавающим по его верхам»). Искусство в том, чтобы подстроить (по возможности точно) частоту одного из высокочастотных колебаний голосовых связок к одной из высоких формант вокального тракта. Если это удастся сделать, на этой форманте возникнет резонанс, и звук, издаваемый певцом, станет громким. Однако, чтобы подстроить частоту колебания под эту форманту, певцу требуется настроить и режим работы голосовых связок (время, в течение которого голосовая щель держится сначала в открытом, а потом в закрытом состоянии), и форму вокального тракта (путем сдвигания языка). Почти каждый может научиться так петь, но, чтобы добиться музыкального звучания, нужно долго практиковаться.

### 3.7 • ХРАП

Многие люди во сне храпят, чем доставляют неудобство членам семьи, а иногда наносят вред собственному сну и здоровью. Что вызывает храп?

**ОТВЕТ •** Человек храпит в основном когда втягивает воздух в легкие либо только через нос (а рот закрыт), либо и через нос, и через рот. Поток воздуха проходит через мягкое нёбо, расположенное в верхней задней части рта (его можно увидеть, заглянув в горло). Если воздух прошел только через нос, он проходит в горло вдоль верхней части мягкого нёба. Если скорость воздушного потока выше некоторой критической величины, он может притянуть мягкое нёбо к задней части горла, и поток воздуха частично перекроется. Нёбо сначала притягивается к языку, а потом возвращается в прежнее состояние. Если же поток идет и через нос, и через рот, он проходит и через верхнюю, и через нижнюю часть мягкого нёба. В этом случае мягкое нёбо колеблется между задней частью горла и языком, перекрывая доступ воздуху то через нос, то через рот. Можете и сами изобразить храп, резко вдохнув воздух через рот и нос (это «театральный храп» — так его изображают на сцене). Перекрытие путей для потока воздуха из-за колебаний мягкого нёба заставит

воздушный поток пульсировать, соответственно, будут пульсировать и ваши ноздри.

Движение мягкого нёба и турбулентность, которую это движение создает, в горле вызывает звуковые волны. Если частота этих волн совпадет с собственными частотами горла (или всей полости горло — рот — носоглотка) и возникнет резонанс, тогда звук может стать весьма громким.

Еще одна возможная причина храпа — периодическое сужение глотки (гибкой, сжимаемой верхней части горла, находящейся над гортанью). Сжатие и последующее раскрытие глотки перекрывает поток воздуха, приводит к появлению турбулентности, которая порождает звуковые волны.

### 3.8 • МУРЛЫКАНИЕ И РЫЧАНИЕ

Почему кошка мурлычет, а лев рычит?

**ОТВЕТ •** Кошка мурлычет примерно так же, как мы говорим, и этот механизм был объяснен в предыдущих задачах. Единственное отличие в том, что когда воздух проходит через голосовые связки кошки, они колеблются и производят гудение в ее вокальном тракте (горло — рот — носоглотка) на частотах примерно 25 Гц. Это, возможно, слишком низкая частота, и человек вряд ли услышит такой звук. Однако он возбуждает в вокальном тракте более высокие гармоники, издаваемые ртом и носом кошки, и их человек уже может услышать. Этот звук, раскатистое «р», обычно говорит о том, что кошка всем довольна.

Некоторые исследователи считают, что способность мурлыкать и рычать определяется состоянием подъязычной кости, которая расположена у основания языка и связана с гортанью. Если кость полностью окостенела (то есть она очень твердая), как у кошки, животное может мурлыкать. Если, наоборот, она не совсем окостенела (то есть она не очень твердая), животное будет рычать. Это, возможно, означает, что животное с более гибкой подъязычной костью, например лев, может сдвигать гортань вниз по горлу и значительно увеличивать длину вокального тракта, а это понижает частоту звука, который издает лев. Гортань льва отличается от гортани большинства других животных еще и тем, что у него голосовые связки толстые и состоят из эластичной ткани, которая может колебаться на низких частотах с поразительно большой амплитудой. Это и позволяет льву рычать!

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 3.9 • РЕВ ДИНОЗАВРА-ПАРАЗАУРОЛОФА

Внутри гребня на черепе динозавров-паразауролофов имелись носовые каналы в форме длинных изогнутых трубок, открытых с обоих концов. Возможно, динозавры использовали эти носовые каналы для того, чтобы издавать звуки с помощью колебаний голосовых связок, частота которых совпадала с самой низкой (основной) частотой этих каналов. (Примерно так же человек издает звук, когда колебания голосовых связок входят в резонанс с собственными частотами полости горло — рот — носоглотка). Черепа ископаемых животных, у которых носовые каналы короче, принадлежат, по-видимому, самкам паразауролофов, и они, вероятно, издавали звуки на более высоких частотах.

### 3.10 • РЫЧАЩИЙ ТИГР, ТРУБЯЩИЙ СЛОН

Часть звуков, издаваемых тиграми, находится за пределами диапазона, воспринимаемого человеческим ухом, а именно — в области *инфразвука*. Какая польза тигру от того, что он издает звуки на таких низких частотах?

Хотя слоны лучше всего слышат в области 1000 Гц, когда они зовут друг друга, особенно если нужно, чтобы их зов был услышан на больших расстояниях, они довольно много энергии затрачивают на испускание звуков на частотах 14 и 35 Гц, а это уже граница области инфразвука. Если вы окажетесь рядом с призывно трубящим слоном, вы скорее почувствуете эти звуки, чем услышите их. Чем этот низкочастотный зов, на который тратится так много энергии, лучше высокочастотного? Известно, что в саванне в ночное время слоны издают вдвое больше звуков, призывающих самку или отпугивающих соперников от их территории, чем днем. Есть ли какой-то смысл в том, чтобы издавать эти звуки именно по ночам?

**ОТВЕТ** • Тигры живут преимущественно в лесу, а расстояние, на которое звук распространяется в лесном массиве, зависит от длины волны: длинноволновые (низкочастотные) звуковые волны меньше поглощаются деревьями, кустами, листьями и травой, чем коротковолновые (высокочастотные). Поэтому для привлечения самки или для отпугивания других самцов тигр должен издавать низкочастотное рычание — его слышат на большем расстоянии, чем высокочастотное,

да и звучит оно более устрашающе. Другие животные, обитающие в джунглях или лесах, тоже объясняются друг с другом с помощью низкочастотных сигналов. Например, казуары — самые большие лесные птицы в мире — издают гудение на частоте всего 20–30 Гц, что близко к минимальным частотам, которые может воспринимать человеческое ухо. А частота некоторых призывных криков суматранских носорогов, напоминающих рев с присвистом, лежит в инфразвуковом диапазоне.

В воздухе над саванной в ночное время часто возникает инверсия, когда слой более теплого воздуха находится над слоем более холодного воздуха. При инверсии низкочастотные звуковые сигналы отражаются от границы слоев и вместо того, чтобы затухнуть в вышине, возвращаются вниз. В результате звук может распространиться над саванной на гораздо большие расстояния, чем в дневное время, когда инверсии нет (до 10 км ночью, но меньше 2 км днем). А вот более высокочастотные звуки, возможно, не будут отклоняться вниз и будут сильнее поглощаться воздухом. Так что высокочастотные призывные крики слонов, тем более по утрам, так далеко не разнесутся.

Лучшее время для слонов потрубить, если они хотят, чтобы их призывы были услышаны как можно дальше, — через час или два после заката, когда еще почти нет ветра, а инверсия уже успела установиться. Позже в ночи может усилиться ветер, и хотя зов в направлении ветра может разнестись дальше, но зато в других направлениях ветер будет препятствовать распространению звука.

### 3.11 • КВАКАНЬЕ ЛЯГУШКИ-БЫКА

Самец лягушки-быка квакает (его кваканье напоминает скорее мычание) и для привлечения самок, и для отпугивания других самцов. Как может некрупное животное с небольшим ртом издавать столь громкое мычание?

**ОТВЕТ** • Лягушка-бык испускает большую часть звуков не через рот, а через барабанные перепонки. Исследователи обнаружили это, когда приложили пальцы к ушам лягушки и убедились, что громкость звука сильно уменьшилась. Позже они повторили эксперимент, используя «лягушачьи беруши» (кусочки поролона, закрепленные над барабанными перепонками с помощью пружинки).

Звук возникает в голосовых связках лягушки точно так же, как это происходит у млекопитающих.

Но потом он направляется к барабанным перепонкам, резонирующим на определенных частотах так, как это делает барабан. При наступлении резонанса уровень звука на этих частотах многократно усиливается и звук разносится по окрестностям. До того, как выяснилась роль барабанных перепон, многие считали, что у лягушки резонанс возникал в *голосовом мешке* — области горла, которую лягушка при мычании надувает. И действительно, у жаб, лягушек-поросят и некоторых других видов лягушек резонанс, усиливающий громкость их призывов, возникает в голосовых мешках, но у лягушки-быка это происходит иначе.

### 3.12 • СВЕРЧКИ И ЛАНГУСТЫ

Как сверчки стрекочут, а лангусты скрежещут?

**ОТВЕТ •** Самец сверчка, призывая самку, стрекочет, приподнимая крылья и накрывая правым передним крылом левое. Когда крылья смыкаются, твердый «смычок», расположенный на верхней поверхности левого крыла, трется о «струну» (ряд загнутых зубчиков) на нижней поверхности правого крыла. «Смычок» касается одного за другим зубчиков струны, в результате чего обе эти структуры начинают вибрировать, а вслед за ними вибрирует большая часть обоих крыльев. Эти колебания, особенно в области арфы — тонкого участка крыла с перемычками-жилками, приводят к колебаниям давления воздуха, которые распространяются от крыльев во все стороны в виде звуковых волн, образующих стрекот сверчка. Частота звука зависит от скорости, с которой «смычок» захватывает и отпускает зубчики «струны». Вероятно, эта скорость определяется частотой колебаний, которые возникают в арфе каждого крыла, то есть имеет место обратная связь.

Призывный стрекот самца сверчка может дорого ему обойтись: он привлекает не только самок, но и паразитических мух, которые могут по звуку отыскать сверчка и отложить в него яйца. Эти яйца со временем превращаются в личинки, которые вгрызаются в тело сверчка и убивают его. (Поиск подруги часто приводит к неприятностям у особей мужского пола, причем не только у сверчков.)

Лангуст тоже трет лопастью своей антенны по микроскопическим неровностям-зубчикам костяной пластинки, расположенной у него под глазами, но механизм генерации звука здесь другой. У лангуста лопасть состоит из мягких тканей, и звук возникает не потому, что она бьет по зубчикам, а потому, что она при трении

об эти зубчики зацепляется (поочередно за каждый из них) и натягивается, прежде чем оторваться от одного зубчика и перейти к следующему. Сразу после того, как лопасть отрывается от зубчика, оба они начинают колебаться, при этом возникает звук, похожий на скрежет. Лангуст использует этот звук, чтобы напугать хищников, и способен издавать его даже во время линьки, когда его наружный скелет становится мягким.

### 3.13 • КАК ЛЯГУШКА ИСПОЛНЯЕТ МЕЛОДИЮ НА ДЕРЕВЕ, А СВЕРЧОК — В НОРКЕ

Почему самец узкоротой квакши *Metaphrynella sundana* с острова Борнео, призывая самку, стрекочет, сидя в дупле дерева? Почему громкость стрекота самца полевого сверчка усиливается, а сам звук становится чище по мере того, как сверчок зарывается в норку?

**ОТВЕТ •** Самец метафринеллы обычно уютно устраивается в частично заполненной водой полости в стволе дерева — в дупле или выдолбленной в пеньке ямке. Когда он хочет объявить во всеуслышание о том, что ищет женского общества, он начинает экспериментировать с частотой своих призывных криков, увеличивая и уменьшая ее до тех пор, пока не найдет частоту, соответствующую самой низкой *резонансной частоте* полости. Это самая низкая из собственных частот полости, на которых звуковые волны усиливают друг друга, так что громкость результирующей звуковой волны становится очень большой. Когда самец нащупает эту частоту, из полости дерева далеко по округе разнесется его громкая жалоба на свое одиночество.

Цель полевого сверчка схожая — выкопать полость, в которой частота его стрекота войдет в *резонанс* с собственными частотами полости. Сверчок строит свою норку поэтапно, выкапывая ямку в форме луковицы с похожим на рог каналом, соединяющим ямку с внешним миром. Такое строение норки напоминает открытый раструб некоторых музыкальных инструментов, позволяющий звуку выходить наружу. Заканчивая каждый этап строительства, сверчок останавливается и стрекочет, проверяя, есть ли уже в норке резонанс. В конце концов резонанс возникает, и из норки наружу через отверстие слышится громкий стрекот.

### 3.14 • АТАКИ АВСТРАЛИЙСКИХ ЦИКАД

Если вы спите и где-то поблизости самец австралийской цикады (*Cyclochila australasiae*) испустит свой призывный клич, он будет таким громким (100 дБ

на расстоянии 1 м), что вы подскочите от испуга. Как такое маленькое (всего 6 см в длину), но самое громкое из известных насекомых может быть источником столь мощного звука?

**ОТВЕТ** • С каждой стороны у цикады имеется что-то вроде маленького барабана с четырьмя вертикальными ребрами-жилками, выгнутыми наружу, — так называемые цимбалы. С помощью мышц цимбалы втягиваются внутрь таким образом, что их жилки резко изгибаются внутрь одна за другой, причем с небольшой задержкой, и при этом каждая жилка испускает звуковой импульс — щелчок. Последовательность щелчков входит в резонанс с собственными частотами воздушной полости в брюшке цикады. Это значит, что звуковые волны складываются и усиливают друг друга, в результате образуется волна большой амплитуды. Частота этой усиленной волны примерно равна 4300 Гц, а громкость — 150 дБ (это даже громче того, что приходится слышать на концертах тяжелого рока). Эти звуки испускаются брюшком через перепонки резонаторов на боках цикады. Почему при этом цикада не глохнет, неясно.

### 3.15 • ГОЛОСА ПИНГВИНОВ

После того как императорский пингвин нанярыется и наестся, он должен вернуться домой на льдину к своей самке. Однако зимой эта самка находится в окружении тысяч других пингвинов, прижимающихся друг к другу, чтобы не замерзнуть в суровом антарктическом климате, где температура опускается до  $-40^{\circ}\text{C}$ , а ветер дует со скоростью 300 км/ч. Кроме того, все пингвины кажутся похожими друг на друга, наверное, даже самим пингвинам, то есть визуально опознать свою самку нашему пингвину сложно. Как же тогда он найдет ее среди тысяч других птиц?

**ОТВЕТ** • Большинство птиц издают звуки, пользуясь только одной стороной своего специального двустороннего органа, который предназначен для вокализации и называется *сиринкс* (нижняя гортань). Однако императорский пингвин использует одновременно обе стороны этого органа. Каждая половина сиринкса совместно с ротовой полостью и горлом образует резонаторы, подобно тому как резонатором является труба с двумя открытыми концами. Это означает, что звуковые волны в резонаторе усиливают друг друга, в результате возникает мощная звуковая волна.

Частота результирующей звуковой волны, излучаемой одной половиной сиринкса, отличается от частоты волны, излучаемой второй половиной. Ухо воспринимает не только среднее значение этих двух частот, но и то, как этот усредненный звук «плавает», то есть меняется от громкого к тихому с определенной частотой — частотой биений, равной разности частот, возбуждаемых в двух половинах сиринкса. Пингвины слышат эти частоты биений. Таким образом, крики императорских пингвинов различаются не только основной частотой, но и частотой биений, что, возможно, помогает им отличить голос одного сородича от голоса другого.

### 3.16 • ЩЕЛЧКИ КИТОВ

Кашалот (самый крупный из зубатых китов) издает звуки в виде серий щелчков. В действительности кит щелкает только один раз, причем этот звук производится в передней части головы, порождая всю серию. Откуда же берутся остальные щелчки? Как ученые определяют длину кита по этой последовательности щелчков?

**ОТВЕТ** • Часть звуковой волны, возбужденной в передней части головы кита, излучается в воду и становится первым зарегистрированным щелчком в последовательности. Оставшаяся часть звуковой волны отправляется назад через спермацетовый мешок (называемый еще жировой подушкой) в голове кита, отражается от фронтального мешка (воздушной полости) в задней части головы и опять идет вперед через спермацетовый мешок. Когда звук достигает дистального мешка (еще одной воздушной полости) в передней части головы, часть звуковой волны снова уходит в воду и формирует второй щелчок, а остальной звук идет обратно через спермацетовый мешок. Этот цикл повторяется несколько раз, в результате возникает целая серия щелчков. Временной интервал между двумя последовательными щелчками пропорционален расстоянию между фронтальным и дистальным воздушными мешками, а длина кита пропорциональна этому расстоянию. Таким образом, измерение этого временного интервала помогает ученым определить длину кита.

### 3.17 • ОТРАЖЕННЫЙ ТОН

Попробуйте пригнуться и опустить голову в тот момент, когда самолет пролетает над вами достаточно низко, чтобы его можно было услышать. Почему, когда вы опускаете голову, частота звука от летящего самолета повышается?



**ОТВЕТ** • Звук, который вы слышите, складывается из звука, идущего от самолета, и звука, который отражается от земли и приходит снизу. Эти две звуковые волны интерферируют, и вы в первую очередь слышите волны, которые усиливают друг друга, а не ослабляют. Высота от поверхности земли, на которой возникает усиление волн при их сложении, зависит от длины волны — более длинные волны усиливаются на большей высоте. Когда вы опускаете голову, высота уменьшается, и на этой высоте при интерференции усиливаются более короткие волны (с большей частотой). Так что когда вы наклоняетесь, вы слышите звук большей частоты.

Похожий эффект можно наблюдать, если вы находитесь вблизи водопада и идете от него к вертикальной скале, которая отражает звук падающей воды. Отраженный от скалы звук водопада интерферирует со звуком, идущим к вам прямо от водопада. По мере того как вы приближаетесь к скале, частота звука, который вы слышите, возрастает.

### 3.18 • ЗВУКИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИЕСЯ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

Мой дом расположен в холмистом пригороде Кливленда, который носит название Кливлендские высоты. Они возвышаются над равнинной местностью, раскинувшейся вокруг озера Эри, по ней у подножья Кливлендских высот проходит железная дорога. Я заведомо не вижу поездов не только потому, что железная дорога далеко, но еще и потому, что ее закрывают и горный хребет, отделяющий наш район от равнины, и тысячи деревьев и домов. Тогда почему иногда по ночам в моем доме так хорошо слышен шум поездов?

Иногда грохот повторяющихся взрывов, например артиллерийскую стрельбу, можно слышать лишь в некоторых зонах вокруг места взрывов. Если вы будете удаляться от этого места, в первой (центральной) зоне громкость звука будет падать, во второй звук исчезнет, но в третьей зоне звук опять появится. Почему возникают такие зоны?

Когда в 1980 году в штате Вашингтон произошло извержение вулкана Сент-Хеленс, при этом выделилась энергия, эквивалентная нескольким мегатоннам в тротиловом эквиваленте. Почему взрыв не был слышен ближе ста километров от места извержения?

Во время Первой мировой войны близ Мессин, к югу от бельгийского города Ипр, британские солдаты целый год копали тоннели под линией немецких укреплений на глубине 30 м. Когда 21 тоннель был

готов, в них заложили около 45 т взрывчатых веществ и в полночь 7 июня 1917 года взорвали 19 из 21 закладок (две не сработали), что было на тот момент самым мощным рукотворным взрывом. Взрыв услышали в Лондоне и даже в Дублине, то есть за сотни километров от взрыва. Как мог звук от взрыва распространиться на такое расстояние? (Одна из двух невзорвавшихся закладок неожиданно сработала во время грозы в 1955 году, к счастью, убив лишь одну корову. Оставшаяся закладка, местоположение которой известно приблизительно, еще может взорваться, и для местных жителей это источник постоянной тревоги.)

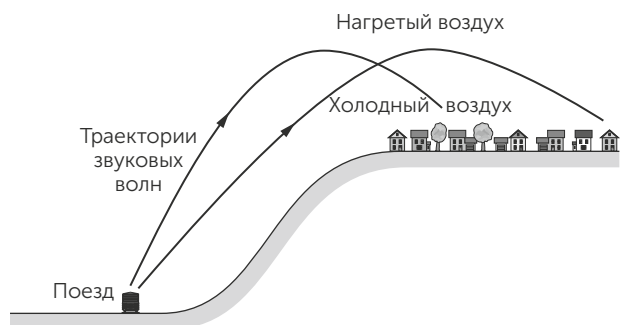
**ОТВЕТ** • Распространяющаяся под углом к вертикали звуковая волна изменяет направление своего распространения, если по дороге меняется температура воздуха. Говорят, что звуковая волна подвергается *рефракции*. Если температура уменьшается, волна будет распространяться под меньшим углом к вертикали. Если температура повышается — угол по отношению к вертикали увеличится, волна даже может развернуться и направиться обратно к земле. Я отчетливо слышу шум проходящего вдали поезда в те ночи, когда слои воздуха высоко над железной дорогой нагреты больше, чем воздух в низине. Такое явление называется *инверсией*. В такую ночь некоторые звуковые волны, испускаемые поездом, отражаются от нагретых слоев и направляются вниз к Кливлендским высотам, и тогда все местные жители отлично слышат их (рис. 3.2).

В старину этот эффект — распространение звуковой волны на большие расстояния при инверсии — был хорошо известен. Например, зулусы знали, что они смогут переговариваться, находясь на разных берегах долины шириной до 2 км, если дождутся вечера, когда воздух в низине станет более холодным, чем наверху.

Когда звуковые волны от места взрыва распространяются по воздуху вверх на большие расстояния, они могут направиться обратно к земле из-за повышенной температуры в нижних слоях стратосферы\* (ниже стратопавзы, находящейся на высоте 42 км) и в нижних слоях термосферы (выше мезопавзы,

\* Стратосфера — слой атмосферы, находящийся на высоте от 11 до 50 км. Мезосфера — слой атмосферы, располагающийся на высотах от 40–50 до 80–90 км. Отделяется от нижележащей стратосферы стратопавзой, а от вышележащей термосферы — мезопавзой. Термосфера — слой атмосферы, следующий за мезосферой. Начинается на высоте 80–90 км и простирается до 800 км. *Прим. пер.*

располагающейся на высоте 85 км). Звуковая волна тогда может вернуться на землю поразительно далеко от источника звука — гораздо дальше, чем если бы она распространялась вдоль поверхности земли, где ей мешают деревья, дома и другие препятствия. Таким образом, звук можно услышать в более удаленных зонах, чем первая (центральная). Если этот вернувшийся на землю звук отразится от земли, он может испытать еще одно отражение наверху и вернуться на землю в другой, еще более отдаленной зоне.



**Рис. 3.2 / Задача 3.18.** При инверсии, то есть при увеличении температуры с высотой, траектории звуковых волн искривляются и направляются вниз к земле.

Когда извергался вулкан Сент-Хеленс, колебания давления (которые возникают, в частности, из-за вылетающих из вулкана продуктов взрыва) были слишком медленными, чтобы человек мог их услышать. Поэтому в Толедо, расположенном на расстоянии 54 км от вулкана, волна сжатия не была слышна (и не причинила никакого вреда стеклам и другим хрупким предметам). Однако, отразившись от стратосферы, волны направились обратно к земле. Они вернулись на землю на расстоянии больше 100 км от вулкана, и тогда колебания давления в волнах сжатия происходили уже достаточно быстро (возможно, из-за отражения от движущихся слоев в атмосфере), чтобы человеческое ухо их уловило.

Звук от взрыва близ Мессин тоже дошел до стратосферы, а затем спустился обратно на землю. Однако, в отличие от взрыва вулкана Сент-Хеленс, колебания давления в месте взрыва происходили быстро, и находившиеся поблизости солдаты слышали звук оглушительной силы.

Направление распространения звука зависит также от ветра. Если волна движется вверх от земли с подветренной стороны, направление ее распространения

меняется и она возвращается на землю где-то «ниже по течению ветра». Иногда этот звук возвращается на землю невероятно далеко от источника звука.

### 3.19 • АКУСТИЧЕСКАЯ ТЕНЬ

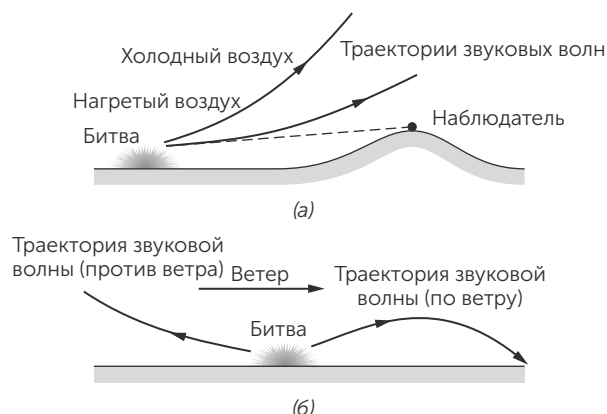
В Гражданской войне в США (1862–1865) командующие обеих сражающихся армий — федеральной и армии конфедератов — очень зависели от сигналов, оповещающих о начале сражения и местах дислокации войск. В некоторых случаях для того, чтобы атаковать неприятеля с двух разных направлений, командующие делили войско на две части. Скоординировать действия этих частей в то время можно было единственным способом — обеспечить, чтобы звуковой сигнал начала атаки одной части войска был услышан другой. Расчет на такой способ коммуникации казался разумным, поскольку эти части обычно располагались на расстоянии не больше нескольких километров друг от друга. Но иногда в решающие моменты он подводил.

Этот странный эффект был отмечен в июне 1862 года военным министром конфедератов и одним из его советников, наблюдавшими за битвой при Гейнс-Милл с вершины холма, находившегося не далее 2 км от поля сражения. В битве участвовало не менее 50 000 человек и более 100 артиллерийских орудий, издававших ужасный грохот, буквально оглушавший сражавшихся. Но оба наблюдателя, в течение двух часов следившие за этой битвой, не слышали ровным счетом ничего. Как такой ужасный шум сражения могли не услышать на расстоянии всего нескольких километров?

**ОТВЕТ •** Существует три главные причины того, почему эту невероятно шумную битву могли не услышать на расстоянии всего в несколько километров. 1. Густой лес мог мешать распространению звука, поглощая звуковые волны. 2. Звуковые волны, испущенные с уровня земли, вместо того чтобы пойти по более-менее горизонтальной траектории, шли по искривленной траектории вверх — из-за изменения температуры воздуха с высотой. 3. Траектория звуковой волны могла искривиться из-за ветра.

Поскольку первая причина не имела места, рассмотрим вторую и третью причины. Если температура воздуха уменьшается с высотой, звуковые волны, испущенные даже под небольшим углом к земле, в конце концов пойдут по более крутой траектории вверх и, следовательно, не достигнут наблюдателя, находящегося

на земле в нескольких километрах от источника звука (рис. 3.3а). Но скорость ветра обычно увеличивается с высотой, и если звук распространяется в направлении ветра, его траектория изогнется уже в направлении земли, и тогда звук будет слышен (рис. 3.3б). Однако, если звук испускается против ветра, траектория звуковой волны изогнется вверх от земли, и звук услышан не будет.



**Рис. 3.3 / Задача 3.19.** а) Наблюдатели не слышали шума битвы из-за искривления траектории звуковой волны при падении температуры воздуха с высотой. б) Искривление траектории звуковой волны под действием ветра.

В некоторых сражениях Гражданской войны командующий оказывался с наветренной по отношению к месту сражения стороны, а скорость ветра в месте сражения значительно возрастала с высотой. Говорят, что командующий находился в акустической тени. Но еще более странные ситуации возникали, когда из-за температурного эффекта звуковая волна направлялась вверх, а потом под влиянием ветра отклонялась вниз, так что у земли она оказывалась далеко от места битвы. И тогда солдаты, находящиеся далеко от этого места, слышали шум битвы, а те, которые были совсем близко, ничего не слышали.

### 3.20 • ПРОСЛУШИВАНИЕ СОВЕТСКИХ ПОДЛОДОК

Во время холодной войны США наблюдали за движением подводных лодок СССР, прослушивая их через сеть подводных акустических антенн, которые могли записывать шумы работающих гребных винтов подлодок. Любопытно, что антенны при этом были установлены в средних широтах, а подлодки плавали на расстояниях в 1000 км от них — в полярных широтах. Как можно было услышать шум гребного винта на таких расстояниях?

**ОТВЕТ •** Некоторые звуки, излучаемые, например, работающими гребными винтами, фактически попадают в трубу — *подводный звуковой канал*, который соединяет полярные и средние широты. Канал проходит на глубине, где скорость звука в воде наименьшая. Скорость звука сложным образом зависит и от глубины, и от температуры воды. Если мы будем измерять ее при погружении, то заметим, что сначала доминирует температурный эффект и по мере падения температуры скорость уменьшается. Но при дальнейшем увеличении глубины начинает перевешивать влияние усиления гидростатического давления и скорость возрастает.

Таким образом, в каком-то диапазоне глубин скорость звука минимальна. Если звук запустить на этой глубине, он попадет в «канал» и распространится по нему примерно так, как свет по оптоволокну. Если звук направится, например, вверх, за верхнюю границу канала, где скорость звука больше, его траектория из-за изменения скорости искривится и он направится обратно в канал (рефракция звуковой волны). А если звук пойдет вниз и выйдет за нижнюю границу канала в область больших скоростей, изменение скорости на границе опять искривит траекторию и направит ее вверх — обратно в канал. Шум от советских подлодок, плававших в полярных широтах, попадал в акустический канал и доходил по нему до средних широт.

### 3.21 • МЕГАФОН И СИРЕНА

Если лидер группы поддержки (чирлидер) выкрикнет что-то в большой шумной толпе на стадионе, никто в толпе не услышит его. Но если он скамандует через мегафон (рупор), его легко услышат все. Как рупор преобразует звук?

Почему вертикальный размер отверстия сирены часто делается больше горизонтального? Не значит ли это, что большая часть звука уйдет вверх?

**ОТВЕТ •** Если звук испускается из отверстия, сравнимого по размеру с длиной волны звука, звуковые волны дифрагируют, то есть огибают края отверстия, и пространственный угол, в котором распространяются звуковые волны, увеличивается. Чем меньше отверстие, тем больше дифракция. Когда чирлидер выкрикивает команду в толпе, дифракционное расширение звука, исходящего изо рта, велико, то есть его крик распространяется и влево, и вправо, и вверх, и вниз, следовательно, существенно уменьшается интенсивность

звука (громкость) в каждом данном направлении. Но когда чирлидер выкрикивает команду через мегафон, имеющий форму конуса с большим выходным отверстием, звук испускается из значительно большего отверстия, и расплывание направлений (дифракция) значительно меньше. Поэтому звук идет в первую очередь вперед, и его максимальная интенсивность оказывается значительно больше. Так что мегафон используется для того, чтобы понизить дифракцию.

Предупреждающий об опасности звук корабельной сирены должен распространяться в как можно большем интервале углов в горизонтальной плоскости, чтобы каждый, кто приближается к кораблю по любому направлению, мог услышать предупреждение. Для этого нужно горизонтальное расплывание сделать как можно большим, а вертикальное — меньшим, поэтому отверстие сирены делается большим по высоте и маленьким по ширине.

### 3.22 • ГДЕ МОЖНО УСЛЫШАТЬ ШЕПОТ

Проделайте такой опыт: на открытом месте (где мало что отражает звук) попросите приятеля, стоящего к вам лицом на некотором удалении, говорить негромко и монотонно (не меняя громкости) и в это же время поворачиваться вокруг своей оси до положения, когда он будет стоять спиной к вам. Скорее всего, вы будете слышать все, что он говорит, практически при любом его повороте. А теперь попросите его проделать то же самое, но уже произнося слова шепотом, сохраняя постоянным уровень громкости. Почему при повороте от вас шепот становится неслышимым гораздо быстрее, чем обычный голос?

**ОТВЕТ** • Есть два объяснения. Вот простейшее: как мы выяснили в предыдущей задаче, когда звук проходит через отверстие, размер которого сравним с длиной звуковой волны, он дифрагирует (расширяется угол, в котором распространяются волны). Дифракция тем меньше, чем короче длина волны. Шепот содержит более короткие длины волн (высокие частоты), чем обычный голос. Таким образом, шепот распространяется в более узком диапазоне углов, и для того, чтобы вы слышали, как кто-то говорит шепотом, он должен стоять к вам лицом.

Расчеты распространения звука, впервые проделанные лордом Рэлеем в 1896 году, очень сложные. Рэлей предположил, что маленький источник звука расположен на поверхности сферы, и обнаружил, что звуковые

волны огибают сферу, причем волнам с меньшей длиной труднее изогнуться, чем волнам с большей длиной. Поэтому шепот, состоящий из волн с более короткой длиной волны, не так хорошо огибает голову, как звук обычного голоса.

Такой же эффект проявляется на театральном представлении под открытым небом, где нет специальных поверхностей, которые бы отражали голоса исполнителей. Мужские голоса хорошо слышны, даже если актеры стоят к вам спиной, а актрисы, чтобы их было слышно, должны стоять к вам лицом, хотя они и говорят так же громко, но на более высоких частотах.

### 3.23 • ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Если вы встанете на железнодорожном переезде, когда поезд будет проноситься мимо и при этом гудеть, вам покажется, что частота гудка меняется. Почему? Будет ли она меняться от высокой частоты к низкой или наоборот?

**ОТВЕТ** • Движение источника звука относительно наблюдателя (в данном случае — слушателя, а им можете быть как вы, так и любой другой детектор звука) меняет частоту звука. Этот эффект называется *эффектом Доплера*. Главная причина этого сдвига частоты в том, что звук — это волна. Если источник звука неподвижен относительно вас, области высокого давления в звуковой волне проносятся мимо вашего уха с постоянной скоростью (частотой) — той, с которой они производятся источником. Так что вы слышите ту же самую частоту звука, которую производит источник, и никакого сдвига нет. Если, напротив, источник движется на вас, он излучает волну, которая направляется на вас, скорость полета областей высокого давления мимо вас теперь больше, чем их скорость относительно источника, и вы слышите более высокую частоту. Если же источник звука движется от вас, эффект обратный: вы слышите звук более низкой частоты, чем та, на которой он испущен источником. Так что движение источника на вас сдвигает частоту вверх, а от вас — вниз, и величина сдвига зависит от скорости источника. Если источник звука движется под углом к линии, соединяющей источник и вас, эффект (величина сдвига) меньше, а если этот угол прямой, сдвига вообще нет.

Если вы поместите детектор звука между железнодорожными рельсами, вы сможете измерить доплеровский сдвиг гудка поезда. Частота гудка будет сдвинута на определенную величину вверх в течение



всего времени движения поезда к детектору (пока поезд не окажется почти прямо над ним), а затем она сдвинется вниз на определенную величину, и пока поезд будет удаляться от детектора, гудок будет все время звучать на этой частоте.

Если же вы поместите детектор на некотором безопасном расстоянии, скажем, 20 м от железнодорожного пути, измерения покажут другое значение, и вот почему. Когда поезд *приближается* к детектору, его скорость относительно детектора будет постепенно уменьшаться, поэтому будет уменьшаться и доплеровский сдвиг. В результате большую часть пути при приближении поезда к детектору он будет гудеть на той же высокой частоте, которую регистрировал детектор, установленный на путях. Но когда он подъедет ближе, начнет сказываться то, что детектор расположен на расстоянии от рельсов, и частота будет резко падать, пока движение поезда не станет перпендикулярным направлению на детектор, и тогда частота прекратит меняться. А потом частота вновь начнет резко уменьшаться, пока не достигнет определенной низкой частоты, которая останется постоянной все время, пока будет слышен гудок.

Однако на наблюдения влияет и ваша психофизиология. Представьте себе, что вы детектор и стоите близко к железнодорожным путям, так что геометрический эффект не влияет. Вы должны слышать звук постоянной высокой частоты, когда поезд движется на вас, и звук постоянной низкой частоты, когда он движется от вас. Но, как ни удивительно, этого не происходит. Вместо этого вы слышите *постепенное увеличение частоты* при приближении поезда и *постепенное уменьшение частоты* при его удалении от вас. Такое восприятие частоты часто объясняют психоакустическим эффектом *восприятия высоты тона (пич)*. В этой ситуации тон, который воспринимается мозгом, зависит от громкости звука. Поскольку, когда поезд приближается к вам, гудок постепенно становится громче, вам кажется, что частота звука повышается, но это ошибка. А когда поезд удаляется, звук постепенно становится тише, а вы ошибочно считаете, что частота понижается.

### 3.24 • КАК НАСЕКОМОЯДНЫЕ ЛЕТУЧИЕ МЫШИ НАХОДЯТ НАСЕКОМЫХ

Когда летучая мышь отправляется на поиски насекомых (своей добычи), она больше полагается на слух, чем на зрение, ведь зрение у нее слабое, к тому же охотится она по ночам. Некоторые виды летучих

мышей могут обнаружить и поймать, например, ночную бабочку, когда оба они находятся в полете. Хотя летучие мыши летают быстро, они ухитряются нацеливаться на насекомое и схватить его. Как летучие мыши определяют не только местонахождение насекомого, но еще и скорость его полета?

Почему летучие мыши успешнее охотятся на мотыльков вблизи ламп на парах ртути (обычно используемых в качестве источников уличного освещения), чем в пустом пространстве? Почему это преимущество исчезает, если окрестности освещаются натриевыми лампами?

Когда-то я исследовал пещеры в Техасе и провел целую неделю под землей. Дважды в течение ночи тысячи летучих мышей пролетали мимо меня: первый раз, когда они летели по направлению к выходу из пещеры, отправляясь на охоту, а второй — когда возвращались к своим жилищам в глубине пещеры. Ни разу ни одна из мышей не наткнулась ни на меня, ни на стену, пролетая через извилистую анфиладу залов даже в полной темноте. Как они умудрялись избегать столкновений?

**ОТВЕТ •** Летучие мыши испускают импульс звуковой волны на частотах, слишком высоких, чтобы их могло услышать человеческое ухо, — в области так называемого ультразвука. Эти звуки, издаваемые, по-видимому, через ноздри, отражаются от объектов, оказавшихся на траектории полета летучей мыши, — стен, спелеологов, летающих насекомых. Отраженный звук, то есть эхо, предупреждает летучих мышей о том, что на их пути находится препятствие. Однако для мышей, летящих на большой скорости в стае через систему лабиринтов пещеры, при этом методе навигации возникает одна проблема: как отличить эхо своего сигнала от эха сигналов сородичей? Ответ состоит в том, что сигнал каждой мыши отличается своими уникальными параметрами — частотой и, возможно, изменениями частоты и амплитуды звука. И все же способность летучей мыши отличать свой сигнал от десятков или даже сотен других во время полета на большой скорости поражает.

Летучая мышь получает информацию не только из эха — она также чувствует сдвиг отраженного сигнала по частоте из-за своего движения. Предположим, летучая мышь, подлетая к стене, издает звук на определенной частоте. Отраженный сигнал, который она принимает, будет сдвинут по частоте в сторону более высоких частот, то есть приобретет *доплеровский сдвиг*. Чем



быстрее мышь летит к стене, тем больше сдвиг по частоте в отраженном сигнале. Летучая мышь использует доплеровский сдвиг, чтобы определить свою скорость.

Некоторые мыши издают сигнал с постоянной частотой и используют доплеровский сдвиг, чтобы обнаруживать не только препятствия, но и насекомых. А другие летучие мыши испускают сигналы с «качающейся» в определенном диапазоне частотой. Анализируя доплеровские сдвиги на разных частотах, летучая мышь изучает детали поверхности мишени и может отличить сигнал, отраженный от насекомого, от сигнала, отраженного, например, от листка. Задача облегчается, если насекомое машет крылышками с ультразвуковой частотой из того интервала частот, которые содержатся в сигнале, посылаемом летучей мышью. Тогда изменения угла наклона крыльев насекомого изменяют эхо, принимаемое мышью (при некоторых наклонах эхо сильное, а при других — слабое). Эти колебания сигнала эха недвусмысленно сообщают мыши о летящей прямо по курсу добыче.

Некоторые летучие мыши предпочитают охотиться, летая низко над водой, поскольку гладкая поверхность воды создает намного меньший шум (*помехи в отраженном сигнале*), который летучая мышь должна отфильтровать. Большая часть отраженного сигнала летучей мыши от воды рассеивается в разные стороны и не возвращается назад, а вот отраженный от насекомого звуковой сигнал идет прямо к ней, и она сможет выделить его из шума.

Определенные типы насекомых чувствительны к ультразвуку, испускаемому летучими мышами. Когда какая-нибудь мошка слышит сигнал с этой частотой, особенно если он громкий, она немедленно начинает беспорядочно метаться, но при этом двигаться в среднем в направлении уменьшения громкости сигнала. Некоторые насекомые могут даже лучше защищаться, включая «глушилку». Они испускают щелчки, которые существенно заглушают отраженный сигнал и мешают летучей мыши прицелиться. Щелчки испускаются за счет деформации кутикулы (панциря) при изгибании тела насекомого. Каждый внезапный изгиб приводит к мгновенному скачку давления воздуха, и эти периодические перепады давления распространяются в стороны от насекомого в виде звуковой волны ультразвуковой частоты. Чтобы обмануть мышь, эти щелчки должны поступать либо одновременно с отраженным от мошки эхом, либо непосредственно перед ним, тогда мышь не сможет расшифровать отраженный сигнал.

Уличные лампы на парах ртути по ночам притягивают ночных бабочек и прочих насекомых, и в распоряжении летучих мышей, если они пролетят поблизости, окажется богатый ассортимент вкусных мошек. Забавно, что некоторые из этих насекомых могли бы улететь, услышав ультразвук, или включить «глушилку», но вблизи лампы они не делают ни того ни другого. Одна из причин состоит в том, что в дневное время летучих мышей они не боятся (днем мыши спят, а не охотятся за ними). Яркий белый свет лампы обманывает их: они думают, что на дворе день и им ничто не угрожает. Лампы на парах натрия светят желтым светом, и мотыльки не принимают этот свет за дневной.

### 3.25 • КАК РАСТИТЕЛЬНЫЕ ЛЕТУЧИЕ МЫШИ НАХОДЯТ ЦВЕТОК

Как летучие мыши, питающиеся цветочным нектаром, находят цветки? От их перелетов с цветка на цветок зависит опыление многих видов растений, особенно в тропиках. Когда летучая мышь опускается на цветок и просовывает мордочку между лепестками, чтобы достать нектар, два других лепестка изгибаются и катапультируют пыльцу, которая оседает на спине летучей мыши, и она переносит эту пыльцу на следующий цветок. Она должна не только суметь определить положение цветка, но и найти щелочку в лепестках, куда можно просунуть мордочку. Как летучая мышь сможет это сделать в полной темноте и при очень плохом зрении? Почему цветок не подпускает следующую летучую мышь к себе до тех пор, пока не восполнит запасы пыльцы?

**ОТВЕТ •** Очевидно, летучая мышь может найти цветок по характеру отраженного сигнала, который она улавливает, послав в сторону цветка ультразвуковой импульс (см. предыдущую задачу). Венчики некоторых цветков имеют колокольчатую форму, чтобы отраженный сигнал лучше распознавался летучей мышью. Например, лепестки растения из семейства бобовых *Miscuna holtonii* хорошо отражают сигнал мыши, даже если он послан под углом к фронтальной поверхности цветка (такой венчик — акустический аналог оптического световозвращающего отражателя, или *катафоты*, который надевают на себя любители бега трусцой, чтобы их замечали ночью в свете фар). При созревании пыльцы верхний лепесток венчика поднимается. После того как обсыпанная пыльцой летучая мышь покидает цветок, верхний лепесток поникает и колокольчатая форма цветка искажается. Поэтому следующая летучая

мышь уже не получит от него сильного отраженного сигнала. Позже ночью, когда запасы пылицы пополнятся, верхний лепесток снова поднимается, форма цветка восстанавливается и он опять хорошо отражает сигналы, посылаемые уже другой летучей мышью, давая ей разрешение «прицветиться».

### 3.26 • РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА ПОД ВОДОЙ

Почему, когда вы опускаете голову в воду, вам кажется, что звук, который издает кто-то находящийся в воде справа от вас, скорее идет спереди?

**ОТВЕТ •** Одна из подсказок, которую использует мозг для определения направления на источник звука, — интервал времени между моментом прихода звука от источника к ближайшему уху и моментом прихода звука к дальнему уху. Например, если источник располагается непосредственно справа, время задержки составляет 0,00058 секунды (при средних размерах головы), и весь ваш жизненный опыт безошибочно подсказывает вам, что источник находится справа, то есть смещен на 90° от направления вперед. Однако если и вы, и источник погружены в воду, задержка будет в четыре раза меньше, то есть 0,00014 секунды, поскольку скорость звука в воде в 4 раза больше, чем в воздухе. Эта меньшая задержка в совокупности с жизненным опытом дают вам неверную подсказку, и вы думаете, что направление на источник составляет всего лишь 13° от направления вперед.

Однако, скорее всего, вы не сможете точно определить этот угол, поскольку на время задержки при прохождении звука между одним и другим ухом влияет еще один фактор. Звук в голову гораздо легче проходит из воды, чем из воздуха, так что, когда ваша голова под водой, звук в дальнее ухо попадает не только из воды, при обходе головы, но и непосредственно через голову. Задержки при прохождении звука по этим двум путям различаются, поэтому подсказки относительно направления на источник будут противоречить друг другу.

### 3.27 • ЭФФЕКТ ДРУЖЕСКОЙ ВЕЧЕРИНКИ

Когда вечеринка небольшая и люди стоят парами и разговаривают, они обычно встают на «социально приемлемом» расстоянии и без труда слышат друг друга. Почему услышать собеседника становится труднее, когда плотность гостей в комнате возрастает? Что в этом случае делает каждый собеседник в паре и почему голос собеседника все еще можно различить? Тот же

эффект можно наблюдать в схожей обстановке, например в шумном ресторане или поезде метро.

**ОТВЕТ •** По мере того как плотность людей возрастает, фоновый шум, создаваемый их разговорами (это не только звуки, идущие прямо от них, но еще и их отражения от потолка, стен и других людей) тоже возрастает. Когда фоновый шум становится таким же громким, как голос вашего собеседника, вы с вашим визави автоматически начинаете повышать голос — это известный эффект Ломбарда, названный так в честь французского врача-отоларинголога Этьена Ломбарда, изучившего это явление в 1911 году. Поскольку и другие пары собеседников сталкиваются с проблемой шума, они тоже повышают свои голоса, и вы опять перестаете слышать своего собеседника. В какой-то момент, чтобы не кричать, вы придвигаетесь ближе друг к другу (вторгаетесь внутрь личного пространства, окружающего каждого из вас). Если кто-то заставит гостей затихнуть, скажем, сделав объявление, а потом разговоры возобновятся, уровень голосов быстро выйдет на прежний уровень. Эффект Ломбарда изучался на некоторых видах животных, например на птицах, которые автоматически начинали громче кричать, когда им нужно было перекричать усилившийся гомон других птиц.

Если кто-то записал бы ваш разговор с собеседником, используя для записи один микрофон, а позже в тихой комнате проиграл бы запись, вы, скорее всего, не расслышали бы слов вашего собеседника так же отчетливо, как смогли это сделать вживую. Причина в том, что тогда вы слушали собеседника двумя ушами — небольшая задержка по времени между звуками, которые приходят в одно и второе ухо, а также небольшое отличие в интенсивности этих звуков помогали вам вычленив голос вашего собеседника из общего гвалта. Этот эффект называли *эффектом дружеской вечеринки*. Если бы вы могли наблюдать движение губ собеседника и язык его тела, это помогло бы восстановить неразборчивые слова или даже предложения, которые вы не смогли расслышать. Ни одна из этих подсказок не работает, когда вы слушаете запись разговора, сделанную с помощью одного микрофона. И тогда вам остается использовать другие подсказки, например подключить логику или ловить знакомые интонации голоса, тонущего в общем шуме. Иногда вычленив разговор из этого фонового шума очень легко. Например, прослушивая нелегально записанный концерт, вы отчетливо слышите голос сидевшего

рядом с микрофоном слушателя. Способность различать знакомые звуки на фоне громкого шума присуща некоторым животным: например, птенцы императорских пингвинов слышат своих родителей в гвалте, издаваемом тысячами других находящихся поблизости сородичей.

### 3.28 • ЗВУК ИЗ УШЕЙ

Около 60% людей испускают звук ушами. Этот эффект называется *отоакустической эмиссией*. Этот звук очень слабый, и зарегистрировать его можно только с помощью высокочувствительного микрофона. Почему уши испускают звук?

**ОТВЕТ** • Когда звук возбуждает барабанную перепонку, осцилляции передаются во внутреннее ухо (*улитку*), которое состоит из двух длинных отделов, заполненных жидкостью, разделенных *базиллярной мембраной*. Слуховой рецептор — *кортиев орган* — лежит как раз на этой мембране. Когда в результате колебаний базиллярной мембраны звук попадает на кортиев орган, расположенные в нем наружные волосковые клетки приходят в движение: они удлиняются и укорачиваются наподобие гармошки. В результате возникают электрические импульсы, которые идут в мозг и несут информацию о звуке. Этот детектор чрезвычайно избирателен в отношении частоты звука — звук определенной частоты возбуждает волосковые клетки в соответствующей области. Однако имеет место и обратная связь: часть энергии посылается обратно на базиллярную мембрану, этот механизм снижает чувствительность улитки при наличии фонового шума и защищает слух от перегрузки. При передаче энергии барабанной перепонке та может испускать звуковые волны из уха в окружающую среду. Эти звуки у большинства людей очень тихие, но если кто-нибудь говорит, что у него звенит в ушах, этот звон и вправду можно зарегистрировать.

### 3.29 • ПОЧЕМУ МЫ СЛЫШИМ МУЗЫКУ, КОТОРОЙ НЕТ

В классике тяжелого рока, например в композициях группы «Айрон Баттерфляй» или «Лед Зепелин», очень важна басовая партия. Однако небольшие динамики конической формы с малым диаметром и глубиной, например автомобильные, не могут воспроизвести басовые аккорды, поскольку в музыке содержится много звуковых волн с большими длинами волн. Но все же

музыка и в этих динамиках звучит прилично. Как же мы слышим басовую партию?

**ОТВЕТ** • Басовые звуки производятся в нашей голове благодаря двум эффектам. Один получил название *эффект потери основных частот*, который относится к нашему восприятию гармонического звукоряда. Такой звукоряд состоит из самой низкой (основной) частоты и более высоких частот (обертонов, или ступеней звукоряда), которые получаются умножением самой низкой частоты на целые числа. Например, если основная частота равна 500 Гц, ступени звукоряда будут равны  $2 \times 500 = 1000$  Гц,  $3 \times 500 = 1500$  Гц,  $4 \times 500 = 2000$  Гц и т. д. Допустим, динамики в машине воспроизводят частоты выше 800 Гц, но не могут воспроизвести частоты ниже этой. Если этот гармонический звукоряд попадает в динамик, основная частота 500 Гц не может воспроизвестись, но более высокие частоты — могут. Хотя основная частота и не дойдет до ваших ушей, нервная система, ответственная за восприятие звука на этих высоких частотах и за идентификацию их как части гармонического звукоряда, создаст иллюзию того, что в звукоряде присутствует и основная частота. Как именно нервная система делает это, не совсем понятно.

Возможно, что эффект, благодаря которому мы слышим басовые тона, обусловлен *нелинейностью* слухового механизма. Это означает, что отклик уха на изменение любой звуковой волны искаженный. По-видимому, эта нелинейность нужна для того, чтобы воспринимать звук, громкость которого колеблется в очень широких пределах, а также быть в состоянии различать звуки различных частот. Один из побочных эффектов нелинейности проявляется, когда в ухо приходит звук с двумя частотами — скажем,  $f_1 = 1000$  Гц и  $f_2 = 1500$  Гц. Если звуковые волны имеют большую амплитуду, во внутреннем ухе появляется волна с частотой, равной разности этих частот ( $f_2 - f_1 = 500$  Гц). Поскольку эти две частоты являются двумя последовательными ступенями гармонического звукоряда, их разность равна основной частоте. Таким образом, хотя основная частота и не попадает в ухо, она возникает во внутреннем ухе из-за нелинейности слухового аппарата уха.

Можно услышать тон на *разностной частоте*  $f_2 - f_1$  и в других ситуациях, когда два источника издают *громкие* звуки на близких частотах. Они должны быть действительно громкими, чтобы во внутреннем ухе

возникло искажение. Например, если одна флейта издает звук на частоте  $f_1$ , а другая — на частоте  $f_2$ , вы сможете услышать «флейту-призрак», звучащую на частоте  $f_2 - f_1$ .

Тон, звучащий на разностной частоте, можно услышать и если кто-то сильно дунет в британский полицейский свисток, имеющий два отверстия. Если прикрыть пальцем ближайшее отверстие, получим звук на первой частоте, соответствующей открытому дальнему отверстию. Если закрыть дальнюю дырочку, получим звук на второй частоте, соответствующей открытому ближнему отверстию. Оставляя открытыми оба отверстия, кроме звуков на этих двух частотах получим еще и звук на третьей частоте — разностный тон.

Разностный тон также используется в органах. В принципе, для каждой ноты в органе должна быть своя труба. Но для звука нижнего до на частоте 16 Гц требуется труба длиной целых 10 м — очень большая, тяжелая и дорогая. Однако если использовать одновременно две трубы меньшего размера — одну, издающую звук верхнего до на частоте 32 Гц, и вторую, издающую звук соль на частоте 48 Гц, из-за нелинейности приемника внутреннего уха прозвучит и нижнее до на частоте 16 Гц. Таким образом две более короткие и дешевые трубы восполнят недостающий тон, но чудо рождения музыки произойдет в вашей голове.

### 3.30 • КАК НЕ ОГЛОХНУТЬ, СЛУШАЯ ГРОМКУЮ МУЗЫКУ

Когда в мире началось повальное увлечение рок-н-роллом, многие родители пугали своих детей-подростков тем, что от этого грохота они оглохнут. Первые исследования вроде показали, что это не так. Однако рок распространялся, и когда он зазвучал на концертах и в ночных клубах в многократно усиленном виде (а потом и через наушники), у любителей такой музыки ухудшение слуха стало заметным. И действительно, после многолетнего прослушивания громкой музыки, и во время исполнения ее со сцены, и во время прослушивания записей через студийные наушники у многих ветеранов рока появились серьезные проблемы. Например, Тед Ньюджент оглох на одно ухо, а Ларс Ульрих из группы «Металлика» начал страдать от постоянного звона в ушах (*тиннитуса*), настолько навязчивого, что это мешало и концентрировать внимание, и спать.

Многие диджеи, работающие на шумных концертах и в ночных клубах, либо временно теряли слух, когда заканчивали работать, либо заработали тиннитус. Вред

от наушников начал проявляться и у тех, кто подсел на прослушивание музыки через портативные устройства. Конечно, другие источники громких или резких звуков тоже могут быть вредны, например пылесос для уборки листьев, мощные газонокосилки, фейерверки, запущенные соседом, ружейные выстрелы, отбойные молотки, реактивные двигатели, мотоциклы и гоночные автомобили. Чтобы не оглохнуть, многие люди теперь принимают меры предосторожности. Некоторые используют *пассивные беруши* (затычки из вспененного материала), которые закрывают ушные отверстия. Другие применяют *активные* (уменьшающие шумы) наушники и шлемофоны, которые отслеживают любой продолжительный фоновый шум (вроде гула самолетных двигателей) и затем с помощью электроники пытаются ослабить его воздействие, создав противофазные колебания и сложив их с теми, которые надо подавить.

Почему громкий шум вызывает различные проблемы со слухом? Как активные беруши и наушники убивают шум?

**ОТВЕТ** • Точный механизм временной или постоянной потери слуха из-за громких звуков не вполне ясен. Возможно, временная потеря слуха возникает из-за уменьшения подачи крови во внутреннее ухо в результате сужения кровеносных сосудов. Постоянная потеря слуха может вызываться сгибанием ресничек волосковых клеток в ушной улитке, которые ответственны за преобразование звуковых сигналов в электрические, идущие по нервным волокнам в мозг. Если реснички изначально согнуты и сигналы отличаются от нормальных, мозг может решить, что в ухо идет звуковая волна, в результате в сознании появляется ощущение этого звука и у человека возникает звон в ушах.

Миниатюрное устройство в активных наушниках и шлемофонах отслеживает фоновый шум и производит собственный. Если шум в окружающем пространстве более-менее постоянный, это миниатюрное устройство генерирует звуковую волну с той же частотой и амплитудой. На первый взгляд кажется, что от этого станет только хуже. Однако эта волна генерируется в точности в противофазе с волной, идущей из окружающего пространства, так что во внутреннем ухе эти две волны в результате деструктивной интерференции гасят друг друга. Эффект поистине впечатляет: так, если надеть активный шлемофон, не включая его, шум работающих авиационных двигателей может



быть почти непереносимым, а если включить шлемофон, шум тут же упадет до уровня шепота. Впрочем, некоторые исследователи полагают, что пользование такими наушниками может вызвать головную боль.

### 3.31 • УСИЛЕНИЕ ЗВУКА С ПОМОЩЬЮ ШУМА

Обычно шум *маскирует* (скрывает) сигнал — например, на очень шумной вечеринке голос собеседника может потонуть в гуле других голосов. Однако в некоторых ситуациях шум может усилить интенсивность сигнала. Например, если вы слушаете музыку и выставите громкость на минимум, звуки окажутся слишком слабыми, чтобы их услышать. Если вы включите источник шума, издающий абсолютно равномерный звук (например, гудение) и подстроите на нужный уровень громкость источника, то обнаружите, что вновь слышите музыку. Как может шум сделать неслышную музыку слышной?

**ОТВЕТ •** Музыкальная мелодия образуется звуками разной громкости, но если вы повернете ручку громкости в такое положение, что звук будет приглушен полностью, вы не услышите даже самых громких звуков. Если теперь вы добавите постоянный фоновый шум, уровень шума добавится к уровню звука музыкальной мелодии, и когда зазвучат громкие ноты, добавленный шум усилит громкость этих нот и сделает их слышимыми. Теперь вы сможете уловить ритм музыкального произведения и, возможно, даже услышать некоторые его фрагменты. Вы, конечно, не добьетесь хорошего качества воспроизведения музыки, поскольку не услышите тихие ноты, однако этого может оказаться достаточно, чтобы понять, что именно исполняется.

### 3.32 • СТЕТОСКОПЫ И ЗВУКИ ДЫХАНИЯ

Звуки, издаваемые пациентом при дыхании через грудь, спину и горло, могут рассказать врачу о том, что с пациентом что-то не так. Очевидно, доктор не сможет услышать эти звуки, просто стоя рядом с пациентом, для этого он использует стетоскоп. Может ли доктор расслышать эти звуки, прижав ухо к груди пациента? Что вызывает эти звуки?

**ОТВЕТ •** Звуки главным образом возникают при прокачке крови через сердце и воздуха через легкие и горло. Причины возникновения звуков при прохождении воздуха до сих пор до конца не понятны, но считается, что их вызывает турбулентность, приводящая

к перепадам давления в потоке воздуха, которые в виде звуковых волн выходят через грудь, спину и горло. И очень высокая турбулентность, и слишком маленькая (отсутствие дыхательных шумов — *молчаливая грудь*) указывают на проблемы с прокачкой воздуха и беспорядок в легких. Шумы и хрипы (длящиеся дольше, чем шумы) могут быть признаками обструкции (сужения) дыхательных путей, а это в свою очередь может быть симптомом астмы, некоторых опухолей и других неприятных ситуаций.

Различные звуки, которые возникают внутри организма пациента, передаются стенкам легких, причем низкочастотные звуки проходят легче. Однако через границу грудь/воздух звук проходит с трудом. Врач может услышать некоторые звуки (это, в первую очередь, биение сердца), плотно прижав ухо к груди пациента, поскольку эти звуки могут войти в резонанс с собственными частотами его слухового канала. На самом деле в недавнем прошлом звуки внутри организма пациента доктора в основном так и прослушивали — прижимая ухо к его груди. Однако при помощи стетоскопа это делать удобнее. Кроме того, поскольку низкочастотные звуки могут войти в резонанс с собственными колебаниями трубок стетоскопа, громкость звуков при прослушивании через него увеличивается.

В традиционных стетоскопах камеры бывают двух разновидностей: одни содержат металлическую диафрагму, другие — резиновый колокол (воронку). Звуки в груди вызывают колебания диафрагмы или воздуха внутри резинового колокола, а это в свою очередь заставляет колебаться воздух в трубках стетоскопа, так что доктор слышит эти колебания. И диафрагма, и колокол шире трубок, так что они могут собрать звуки с довольно большой области груди, но эта площадь не настолько велика, чтобы невозможно было определить положение источника шумов внутри грудной клетки. Экспериментально доказано, что стетоскопы с диафрагмами лучше передают звуки в ухо доктора, чем стетоскопы с резиновыми воронками, но многие врачи все еще предпочитают пользоваться стетоскопами с резиновыми воронками.

### 3.33 • НАТЯЖЕНИЕ ГИТАРНЫХ СТРУН И РАСТЯЖЕНИЕ РЕЗИНОВОЙ ЛЕНТЫ

Почему, если трогать гитарную струну в определенной точке и одновременно ее натягивать, частота звука увеличивается? Почему, если растягивать резиновую ленту между большим и указательным пальцами



и одновременно трогать ее, частота издаваемого при этом звука остается той же самой или даже чуть понижается? Почему гитаристы перед выходом на сцену некоторое время разыгрываются за кулисами?

**ОТВЕТ •** Когда вы трогаете гитарную струну, вы слышите звуки, так как некоторые волны, распространяющиеся вдоль струны, усиливают друг друга, то есть наступает *резонанс*. Большинство волн, возбуждаемых в струне, не усиливают друг друга. Усиление означает, что движение струны в воздухе становится заметным, и это вызывает изменения давления воздуха и, соответственно, звуковые волны.

Частота одной из волн, на которой устанавливается резонанс, называется *основной частотой*, и ей соответствует звук с наименьшей частотой среди всех волн, возбуждаемых в струне. Значение этой частоты зависит от длины струны и скорости, с которой волны бегут по струне, а скорость, в свою очередь, зависит от натяжения струны, диаметра и плотности материала струны. Так что частоту, на которой струна издает звук, определяют ее длина, натяжение, диаметр и плотность материала.

Если натягивать гитарную струну, увеличивается ее натяжение, а остальные параметры существенно не меняются. В результате волна бежит быстрее, и испускаемый звук приобретает большую частоту. А если растягивать резиновую ленту, натяжение тоже увеличивается, но, кроме того, она заметно удлиняется и сужается, а плотность материала не изменяется. В результате скорость волны существенно не меняется, а следовательно, и частота ее колебаний, и частота издаваемого звука остаются почти постоянными.

При игре на гитаре струны колеблются, нагреваются и расширяются, их натяжение падает, падает и частота звука, издаваемого струнами. Исполнитель не хочет, чтобы это случилось на сцене, потому что тогда струны придется перенастраивать на нужный лад. Поэтому гитарист разыгрывается за кулисами до тех пор, пока струны не нагреются, и перед самым выходом подтягивает их еще раз, чтобы настроить гитару как надо.

### 3.34 • ИГРА НА СКРИПКЕ

Почему, когда вы ведете смычком по струнам скрипки, она издает звук? Почему, если вести смычком по середине струны, звука почти не слышно? Если струна все-таки издаст звук, он вряд ли окажется мелодичным. Зачем струны натирают канифолью?

Струна с определенной длиной, натяжением и массой может издавать звуки с несколькими частотами, про которые говорят, что они образуют гармонический звукоряд. Например, самая низкая частота, называемая *основной частотой*, может составлять 500 Гц. Следующая частота в звукоряде, называемая первым обертоном, будет равна  $2 \times 500 = 1000$  Гц. Можно найти следующие члены звукоряда, умножая 500 Гц последовательно на целые числа (3, 4, 5 и т. д.). Каждое положение смычка и пальца, прижимающего струну (а это положение задает длину отрезка струны, который может колебаться), определяет, какой тон звукоряда в действительности создаст струна. Не все скрипачи знают, что струны можно изготовить таким образом, чтобы в них могли возбуждаться *субгармоники*, то есть частоты, меньшие основной частоты, например вдвое меньшие. Как скрипач может извлечь из инструмента звуки на частотах субгармоник?

**ОТВЕТ •** Когда вы трогаете гитарную струну, она колеблется в нескольких резонансных модах, которые образуются, когда волны распространяются в противоположных направлениях, проходят друг через друга и усиливаются, и в результате возникают интерференционные картины. Для каждой интерференционной картины на струне есть области, в которых происходят большие колебания и, следовательно, изменения давления воздуха больше. Эти изменения распространяются от струны в окружающее пространство в виде звуковых волн.

Со струной, по которой проводят смычком, все происходит не так, как при игре на гитаре, поскольку звуковые волны создаются в скрипичной струне не в результате единичного щипка. Когда скрипач ведет смычком по струне, из-за трения смычок периодически то зацепляется за струну, то срывается, то есть движение смычка — это последовательность *захватов-срывов*. Струна вначале может зацепиться за смычок, и он ее потянет, но потом струна все равно отцепится, и в этот момент от точки отрыва по струне побегут два импульса в противоположных направлениях. Один побежит в сторону скрипача, а другой — в противоположную сторону. Каждый из них отразится (и перевернется при отражении) от закрепленного конца струны и побежит по ней в обратном направлении к другому концу. Все это время смычок продолжит скользить по струне вверх. В момент, когда какой-то из импульсов вернется к смычку, струна снова захватится смычком и снова

будет тянуться за ним, пока опять не сорвется. И тогда по струне опять побегут два импульса.

Скрипач должен так натренировать свои интуицию и слух, чтобы синхронизовать движение смычка с движением этих импульсов, которые он, естественно, не видит. Если эти волны возбудить правильно, вызванные ими колебания струны будут создавать более сильные изменения давления воздуха, которые распространятся от скрипки в окружающую среду в виде звуковых волн. Эти колебания могут войти в резонанс с собственными колебаниями деревянного корпуса скрипки и заполненной воздухом полости, и эти две серии колебаний дадут дополнительные тона на различных частотах, добавляя *богатство окраски*, или *тембр*, звукам скрипки.

Смычок сделан из конских волос, снаружи покрытых твердыми ороговевшими кератиновыми клетками, а внутри содержащих более мягкие клетки. Поскольку смычок постоянно «пилит» струну, на волосе постепенно образуются канавки на стороне, которая трется о струну, и там обнажается мягкая сердцевина. Когда волос покрывают канифолью, ее крупинцы частично внедряются в мягкую внутреннюю часть волоса, и их поверхность как раз образует те зоны, которыми смычок захватывает струну, когда им ведут по струне. Если играть долго, частички канифоли постепенно стираются, и это значит, что нужно еще раз проканифолить смычок, чтобы восстановить правильный режим сцепления-расцепления смычка со струной.

Считается, что звука либо не будет вовсе, либо он будет ужасным, если вести смычком по средней точке струны. Я полагаю, что это происходит из-за равенства путей распространения импульсов, возбуждаемых смычком в средней точке. Обычно эти импульсы проходят разные пути до концов струны. Но если смычок находится посередине, они проходят одинаковые пути и, отразившись, приходят обратно к смычку одновременно. И тогда эти импульсы складываются и приводят к большему, чем обычно, отклонению струны в этой точке, а это нарушает обычный режим захвата-срыва струны смычком. И тогда струна либо не издаст звука вообще, либо издаст резкий, режущий слух звук.

Чтобы извлечь звук на частоте субгармоники, скрипач сильно давит на мостик\* или даже поворачивает

---

\* Мостик для скрипки — приспособление, помогающее держать скрипку естественно, не напрягая шею и не поднимая плечо. Надевается на нижнюю дека скрипки. *Прим. пер.*

его, когда ведет смычком по кетгуттовым (не синтетическим) струнам. Почему при этом частота звука становится ниже основной, не совсем ясно, но, возможно, в этом случае кроме смещения струны вбок возникает ее кручение, то есть начинают играть роль *крутильные колебания*. Соответствующие волны будут распространяться вдоль струны медленнее, чем волны, о которых говорилось выше, и это приведет к тому, что струны будут колебаться с более низкой частотой, следовательно, и звук получится более низкой частоты.

### 3.35 • МЕРЦАЮЩЕЕ ЗВУЧАНИЕ СКРИПКИ

Когда мы слушаем скрипку, звуки с частотой меньше 1000 Гц несутся к нам от самой скрипки, а вот звуки с большей частотой будто приходят с разных сторон для разных частот. Поэтому, когда частота такого звука меняется, создается ощущение, что меняется местоположение его источника. И нам кажется, что звук не привязан к точке в пространстве, где находится сама скрипка. Это можно сравнить с мерцающими огнями фейерверка. Что вызывает такое ощущение?

**ОТВЕТ** • Когда источник звука мал по сравнению с длиной волны звука, мы, естественно, слышим, откуда пришел звук, даже если частота звука изменилась. Однако, когда источник звука велик по сравнению с длиной волны, разные части источника могут восприниматься как отдельные источники, каждый испускающий свой звук. На каждой заданной частоте звуковые волны от этих источников перекрываются, в результате появляется интерференционная картина с областями разной интенсивности. При изменении частоты картина смещается. Если вы слышите целый набор высоких частот, эта разница в интерференционных картинах для разных частот может дать иллюзию того, что звук разной частоты приходит от источников, расположенных в разных местах.

Когда скрипка издает звук, он приходит в основном от всего деревянного корпуса. Когда частота звука превышает 1000 Гц, длина волн достаточно мала — менее 30 см, и отдельные части деревянного корпуса скрипки воспринимаются как разные источники звука, и тогда может возникнуть иллюзия мерцающего звучания скрипки.

### 3.36 • МОРСКИЕ РАКОВИНЫ

В прежние времена в раковину трубили, чтобы предупредить корабли об опасности столкнуться со скалой в густом тумане. Сейчас это делают в основном

на торжественных церемониях. Чтобы подудеть в раковину, нужно прижаться губами к узкому отверстию на ее кончике (кончик следует аккуратно отбить или стесать напильником). Почему раковина издает такой громкий звук?

Почему, если вы на пляже подберете большую морскую раковину и приложите ее к уху, вы услышите шум, напоминающий звук разбивающихся о берег волн?

**ОТВЕТ** • Если вы подуете в морскую раковину, возникнет два вида колебаний: губы будут колебаться (дрожать) примерно так, как колеблется гитарная струна, а если частота колебаний ваших губ совпадет с собственной частотой раковины, смогут возбудиться и звуковые колебания внутри раковины. Вы можете заставить губы колебаться, если прижмете их к отверстию раковины и будете выдувать через них воздух. Если делать это осторожно, губы будут колебаться сразу на нескольких частотах гармонического звукоряда. В одной серии экспериментов измерили самую низкую частоту (основную частоту), равную 47,5 Гц, и более высокие частоты, равные основной частоте, умноженной на целые числа:  $2 \times 47,5 = 95$  Гц,  $3 \times 47,5 = 142,5$  Гц и так далее.

Колебания губ создают в раковине звуковые волны с теми же частотами, что и частоты колебаний губ. Большая часть волн просто гасит друг друга, но некоторые, частота которых равна одной из резонансных частот раковины, усиливают друг друга и образуют сильную звуковую волну (громкий звук). В упомянутом выше эксперименте самая низкая резонансная частота раковины оказалась равной 332,5 Гц.

Человек, дувший в раковину, смог заставить ее громко звучать, поскольку седьмая частота гармонического звукоряда на основной частоте 47,5 Гц как раз была равна 332,5 Гц, и колебания губ на этой частоте входили в резонанс с такой же собственной частотой раковины. Так что этот громкий трубный звук раковины вполне могли слышать люди вокруг.

Обычные шумы в окружающем пространстве тоже могут привести к возникновению в раковине резонансных колебаний. Если вы приложите раковину к одному уху, то можете услышать звук на некоторых резонансных частотах. Вероятно, громкость звука, который издает раковина, будет то возрастать, то затухать, поскольку флуктуирует шум, возбуждающий этот звук. Если вы хотите мысленно представить себе источник этих шумов, особенно если прижимаете к уху морскую

раковину, вы легко вообразите, что слышите шум набегающих волн.

В Италии есть остров-вулкан Стромболи, похожий на морскую раковину в том смысле, что задувающий в его три кратера переменный ветер иногда возбуждает в них резонанс, и тогда вулкан издает звуки разной громкости.

### 3.37 • ДИДЖЕРИДУ

Диджериду — традиционный музыкальный инструмент австралийских аборигенов, который при игре на нем издает почти ровное гудение. Он представляет собой длинную ветку дерева, внутри которой имеется проделанное термитами сквозное отверстие. Играют на этой ветке, прижимая губы к одному из ее концов. Чтобы извлечь из трубы звук, нужно подуть в нее определенным образом, однако добиться громкого и более-менее постоянного звучания довольно трудно даже для искусственного в игре на духовых инструментах музыканта. Как диджериду издает звуки?

**ОТВЕТ** • Основное отличие игры на диджериду и на медных инструментах в том, что в диджериду вы должны сначала установить резонанс в своем вокальном тракте (это общая полость рта — горла — носоглотки). Это значит, что в вашем вокальном тракте отберутся волны, которые усиливают друг друга и образуют мощную звуковую волну. И уже после этого вы должны часть этого звука послать в диджериду одним из двух способов. Либо сделать так, чтобы резонанс, установившийся в вокальном тракте, постоянно поддерживал колебания (дрожание) губ и эти колебания той части губ, которая находится внутри входного отверстия инструмента, вызывали бы колебания воздуха внутри него. Либо периодически разжимать губы и выпускать звук из вокального тракта в отверстие инструмента. Звучание диджериду можно менять, перестраивая резонансную частоту своего вокального тракта (изменяя частоту колебаний голосовых связок в гортани или сдвигая язык и таким образом меняя конфигурацию вокального тракта). В каком-то смысле, играя на диджериду, вы фактически сами напеваете или гудите в него, чего вам не следует делать при игре на духовых инструментах.

### 3.38 • ТРЯСКА И ГУДЕНИЕ СИЛОСНОЙ БАШНИ

Почему, если дать зерну ссыпаться с силосной башни (сооружения, в котором хранится зерно), она колеблется (это называется *тряской силосной башни*) и издает

звуки (эти звуки называют *гудением силосной башни*), которые напоминают периодическое кваканье клаксона? Некоторые силосные башни дрожат, но не гудят, некоторые гудят, но не дрожат, некоторые не делают ни того ни другого, а есть и такие, которые делают и то и другое. Гудение силосных башен просто раздражает, но их колебания могут привести к их разрушению.

**ОТВЕТ •** Хотя зерно высыпается со дна силосной башни равномерно, внутри нее зерно сыпается прерывисто. Это прерывистое движение может объясняться несколькими причинами, одна из которых — периодическое образование и обрушение сводов, образующихся при сыпании зерна. Однако главная причина, по-видимому, — это чередование прилипания зерен к внутренней стенке и соскальзывания с нее. Эти меняющиеся условия сыпания зерна приводят к тому, что возникают колебания в его движении и, соответственно, колебания стенок бункера, которые служат гигантскими деками, испускающими звуковые волны. Иногда эти колебания настолько мощные, что могут вызвать разрушение силосной башни.

В некоторых силосных башнях эти колебания могут возбудить акустический резонанс в столбе воздуха над уровнем зерна. Это означает, что звуковые волны, имеющие длину волны, соответствующую длинам волн собственных колебаний столба воздуха, складываются и образуют в нем мощную звуковую волну вроде той, что возникает в органах труб.

### 3.39 • ПОЮЩИЕ ГОФРИРОВАННЫЕ ТРУБКИ

В магазинах можно встретить музыкальную игрушку, представляющую собой отрезок обычной гофрированной пластиковой трубки с двумя открытыми концами. Трубку длиной около метра берут за один конец и описывают им небольшой круг, а второй — дальний конец — при этом опишет больший круг. Если вращать трубку медленно, вы ничего не услышите. Но если вращать быстрее, она начинает испускать звук определенной частоты. Если скорость еще увеличить, частота звука тоже увеличится. Не так трудно научиться издавать звуки на четырех или пяти частотах, меняя скорость вращения. Почему трубка «поет»?

**ОТВЕТ •** Когда дальний конец трубки движется по большому кругу, воздух, находящийся внутри трубки, выталкивается наружу (трубка пытается заставить воздух двигаться по кругу, но нет пробки, которая

могла бы его удержать, поэтому он выходит наружу). По мере того как воздух выходит из дальнего конца трубки, новый поток воздуха поступает в ближний конец, таким образом через трубку прокачивается воздух с постоянной скоростью.

Если скорость потока достаточно высока, внутренние ребра гофрированной трубки не дадут ему двигаться плавно, и в потоке разовьется турбулентность, то есть колебания давления воздуха. Эти колебания давления возникают в диапазоне частот, определяемом скоростью воздушного потока и расположением ребер гофра. Если частота внутри этого диапазона соответствует *собственным частотам* трубки, в ней возникает *резонанс*. Это означает, что волны усиливают друг друга и в результате возникает мощная звуковая волна, которая испускается из открытого конца трубки, и этот звук мы слышим. При более быстром вращении и, соответственно, большей скорости потока воздуха в трубке частотный диапазон турбулентности сдвигается в сторону более высоких частот. Одна из частот этого нового диапазона будет соответствовать более высокой резонансной частоте трубки, и вы услышите звук на более высокой частоте.

В игрушечной трубке вы можете не услышать самую низкую возможную частоту, поскольку поток воздуха через трубку при маленькой скорости вращения слишком медленный для возникновения турбулентности. Самая низкая частота, которую вы сможете услышать, — вторая гармоника (или первый обертон).

Вы можете заставить гофрированную трубку «петь», высунав ее конец из окна движущегося автомобиля (только не делайте этого, если вы сами за рулем!). Нужно подставить отверстие под встречный поток воздуха, чтобы он проносился сквозь трубку, и она запоет.

### 3.40 • МУЗЫКАЛЬНАЯ ЧАШКА

Налейте горячую воду в кофейную чашку, затем либо постучите ложкой по внутренней поверхности чашки, одновременно помешивая ею воду, либо постучите костяшками пальцев по нижней поверхности чашки. Запомните частоту издаваемого чашкой звука. Теперь добавьте в воду порошок, например растворимый кофе, и опять постучите. Частота звука станет намного ниже, но через несколько минут вернется к прежнему значению. Почему частота понизилась и почему она со временем повышается?

**ОТВЕТ •** Когда вы постукиваете ложкой по стенкам чашки, вы заставляете их колебаться с определенной



частотой и одновременно возбуждает в столбе воды звуковые волны. Сейчас мы рассмотрим второй эффект и минимизируем первый, притронувшись пальцами или чем-нибудь мягким ко дну чашки. У некоторых возбужденных звуковых волн длина окажется соответствующей длине волны собственных колебаний столбика воды между сплошным дном и верхним открытым краем чашки, и тогда возникнет резонанс. Звуковые волны с этими длинами будут усиливать друг друга, и результирующая звуковая волна окажется мощной. Часть энергии этой волны уйдет наружу, и мы услышим звук с частотой, которая будет являться резонансной частотой чашки с водой.

Эта резонансная частота зависит от высоты столба воды и скорости звука в воде. А скорость звука в любой среде зависит от плотности этой среды и ее сжимаемости. В среде с большей плотностью скорость звука больше, а при большей сжимаемости — меньше. В воде скорость звука примерно равна 1470 м/с.

Когда в воду добавляют порошок, на крупинках порошка образуются воздушные пузырьки (того воздуха, который уже растворен в воде или который захватывается крупинками в тот момент, когда их высыпают в воду). Эти пузырьки не занимают большого объема (вы не заметите повышения уровня воды по стенке чашки), а значит, плотность воды сильно не изменится. Однако пузырьки сильно увеличат сжимаемость, а следовательно, уменьшат скорость звука в воде и, соответственно, пропорциональную ей резонансную частоту. Поэтому вы слышите, как частота звука уменьшается по мере того, как вы подсыпаете порошок в воду.

Со временем большая часть пузырьков всплывает на поверхность и лопается, их число уменьшается, и частота звука увеличивается до тех пор, пока не вернется к прежнему значению, то есть частоте, которая была до высыпания порошка. Поскольку когда-то в самой первой статье на эту тему описывалось, как в кипяток добавляли порошок шоколада, а не кофе, этот эффект называли *эффектом горячего шоколада*. Какой порошок сыпать в жидкость, безразлично — если, конечно, он ведет себя так же в смысле образования пузырьков.

### 3.41 • РЕЗОНАНС В БУТЫЛКЕ

Если подуть поперек горлышка открытой бутылки с любой жидкостью внутри, можно добиться того, что бутылка издаст звук. На самом деле, используя разные бутылки с разными уровнями жидкости внутри, можно даже наиграть мелодию.

**ОТВЕТ** • Если подуть поперек горлышка открытой бутылки, в потоке воздуха, на пути которого окажется препятствие, возникает турбулентность и образуются колебания давления с частотами, лежащими в широком диапазоне. Мы хотим, чтобы одна из частот совпала с резонансной частотой бутылки, то есть чтобы колебания давления возбуждали такие колебания воздуха внутри бутылки, которые усилят друг друга и образуют звуковую волну большой интенсивности. Если такое совпадение частот произойдет и, как следствие, мощная звуковая волна возникнет, часть ее выйдет из бутылки, и тогда этот звук можно будет услышать.

Однако колебания бутылки отличаются от колебаний в простой трубе. Разница в том, что у бутылки, в отличие от трубы, есть горлышко, и воздух в горлышке (воздушная пробка) и воздух внутри бутылки образуют так называемый *резонатор Гельмгольца*. Колебания этого резонатора математически описываются теми же уравнениями, что и колебания груза на конце пружины. Здесь воздушная пробка является аналогом груза, а оставшийся воздух в бутылке — аналогом пружины. В обычной системе «груз — пружина» груз периодически сжимает и растягивает пружину, всегда проскакивая среднюю точку и таким образом поддерживая колебания. В бутылке масса воздушной пробки заставляет воздух в остальной части бутылки периодически сжиматься и расширяться, всегда проскакивая равновесное состояние и поддерживая колебания воздуха внутри бутылки.

Воздух в конкретной бутылке (с конкретной массой воздушной пробки и конкретной воздушной «пружиной») может колебаться с наибольшей амплитудой на определенной (резонансной) частоте, и если эта частота содержится в спектре частот колебаний турбулентного потока, образующегося на кромке горлышка, внутри бутылки возникнет сильная звуковая волна. Если уменьшить объем воздуха внутри бутылки, частично заполнив бутылку жидкостью, то увеличится частота звука, на которой бутылка «запоет».

Есть пещеры, которые известны тем, что продуваются ветрами, особенно сильными вблизи входа. Поскольку ветер меняет свое направление в течение дня, говорят, что пещера «дышит». Такие пещеры — еще один пример резонаторов Гельмгольца. Изменения ветра снаружи и колебания давления создают турбулентность. Воздух в узком входе в пещеру — это та же воздушная пробка или груз, а воздух в остальной части пещеры — аналог пружины. Частота колебаний



слишком мала (0,001–1 Гц), чтобы их можно было услышать, но почувствовать поток воздуха (ветер), который создается при таких колебаниях, вполне возможно.

### 3.42 • СКРИП И ВИЗГ

Почему несмазанная дверь скрипит? Почему, если быстро провести ногтем по классной доске, раздается ужасный звук? Почему шины визжат, когда автомобиль трогается с места?

**ОТВЕТ** • Вот лишь некоторые из великого множества примеров так называемого *эффекта зацепления и проскальзывания* (или *захвата-срыва*). Пусть две поверхности, прижатые с силой одна к другой, движутся друг относительно друга. В одних случаях они будут двигаться плавно, особенно если смазаны. Однако в других случаях они сначала зацепляются друг за друга и образуют одно целое, а потом в них возникают напряжения, и в конце концов они расцепляются. Сразу после расцепления, когда напряжения исчезают, части этих поверхностей могут начать колебаться, при этом испускается звук и его можно услышать. Это движение двух поверхностей может возбудить колебания в большем объеме, который послужит резонатором, и тогда звук усилится.

Например, когда вы ведете ногтем по классной доске, ноготь сначала зацепляется за поверхность доски и сгибается, а потом внезапно соскальзывает и начинает скользить, при этом он колеблется и ударяется о поверхность. Звук, который вы слышите, исходит как от постукивания ногтя по доске, так и от колебаний, которые при постукивании устанавливаются в доске, выполняющей роль деки. Амплитуда движения внешней кромки ногтя наибольшая, а противоположной — наименьшая. Это движение очень напоминает движение раскачиваемого ветром дерева, да и частота колебаний, как у дерева, обратно пропорциональна длине (в данном случае ногтя). Поскольку ноготь короткий, частота его колебаний высокая, вот почему этот звук так действует на нервы.

Дверные петли могут скрипеть, если их трущиеся друг о друга детали при движении зацепляются и расцепляются. Если вы вращаете дверь быстрее, детали могут не успевать зацепляться, и тогда не будет и зацепления-расцепления, и, соответственно, скрипа.

Шины, проскальзывающие по сухому асфальту, движутся, то зацепляясь за него, то отрываясь, и это

приводит к тому, что шины начинают колебаться и, соответственно, визжать. Это, по существу, тот самый визг, который так высоко ценится в гонках на максимальное ускорение. Шины будут визжать и при экстренном торможении (если не включается антиблокировочная система — АБС, или ABS), но тогда этот звук совсем не приводит окружающих в восторг.

Прислушайтесь и вы найдете сотни других примеров звуков, возникающих при зацеплении и проскальзывании поверхностей.

### 3.43 • ПОЮЩИЕ ВИННЫЕ БОКАЛЫ

Если вы потрете мокрым пальцем по ободку винного бокала или любого другого стакана, вы сможете заставить стакан «петь». Что вызывает этот звук?

**ОТВЕТ** • Когда вы ведете пальцем по ободку бокала, палец и ободок постоянно то зацепляются друг за друга, то проскальзывают. В фазе зацепления ободок чуть-чуть вытягивается в направлении движения пальца, деформируя бокал. В фазе проскальзывания ободок освобождается от пальца и восстанавливает свою форму, и это приводит к колебаниям. Про самые большие колебания говорят, что это резонансные колебания. Вид сверху колеблющегося ободка бокала изображен на рис. 3.4. Колебания следуют за движущимся вдоль ободка пальцем, и это вызывает пульсации звука (звук появляется и исчезает с частотой несколько герц, величина ее зависит от скорости движения пальца). Частота, с которой на ободке создаются перепады давления воздуха и частота звука, которую мы слышим, примерно пропорциональна толщине ободка и обратно пропорциональна квадрату радиуса отверстия бокала, а значит, она выше для более толстого ободка и узкого отверстия. Если в стакан налить жидкость, резонансная частота уменьшится, поскольку масса жидкости уменьшает скорость, с которой стенки стакана могут осциллировать.



Рис. 3.4 / Задачи 3.43 и 3.44. Вид сверху на колеблющийся ободок стеклянного бокала (деформация при колебаниях сильно преувеличена).

Некоторые музыканты научились исполнять мелодии на наборе стаканов, в каждый из которых налито

определенное количество жидкости (меняя уровень жидкости, можно изменить тон). Бенджамин Франклин — известный изобретатель и государственный деятель периода становления США — использовал идею поющих бокалов, смастерив стеклянную гармонiku. Этот музыкальный инструмент, ставший весьма популярным, состоял из стеклянных стаканов, прикрепленных к горизонтальному валу. Стаканы были расставлены по диаметру, крайним слева располагался самый большой стакан. Чтобы извлечь определенные ноты, музыкантам нужно было касаться влажными пальцами ободков стаканов, которые поворачивались с помощью ножных педалей.

Изобретались и другие причудливые инструменты, способные издавать звуки, если их потереть и заставить колебаться. Один из самых забавных — китайская латунная миска с водой. Если в нее налить немного воды, а ручки миски потереть сухими руками, она начинает колебаться так сильно, что капли воды подбрасываются вверх на полметра.

### 3.44 • МОЖНО ЛИ ГОЛОСОМ РАЗБИТЬ ВИННЫЙ БОКАЛ

Может ли опытный певец разбить винный бокал или любой другой стакан только с помощью пения, как это представляется в комиксах и обыгрывается в комических скетчах и рекламных объявлениях?

**ОТВЕТ** • Винный бокал можно разбить, если его облучить мощной звуковой волной с частотой, соответствующей его самой низкой резонансной частоте, то есть самой низкой частоте, с которой бокал будет колебаться при ударе. На этой частоте ободок бокала колеблется так, как изображено на рис. 3.4. Когда колебания установятся, на месте микроскопического дефекта в стекле или в месте, где амплитуда колебаний максимальна, может появиться трещина, которая при периодических движениях расширится, а при пересечении ободка разветвится. И тогда бокал разобьется. Чтобы это произошло, мощный звук должен длиться не менее нескольких секунд.

Однако, похоже, проделать это с помощью не усиленного микрофоном человеческого голоса невозможно, поскольку человек не может выпевать одну ноту в течение нескольких секунд. И действительно, экспериментально было установлено, что без усилителя, лишь с помощью своего голоса, певцы разбить бокал не могут.

### 3.45 • ЖУРЧАНИЕ РУЧЕЙКОВ И ШЕЛЕСТ ДОЖДЯ

Что вызывает журчание ручья и звуки падающих на поверхность пруда капель дождя?

**ОТВЕТ** • Звук при ударе воды о воду, будь то в ручье, водопаде или во время ливня, образуется прежде всего за счет двух механизмов: сам удар вызывает изменения давления воздуха, которые распространяются во все стороны от места удара в виде звуковых волн. И в этот момент мы слышим резкий короткий звук. Но, кроме того, при этом ударе в воду часто попадает воздух и образует в ней пузырьки, которые колеблются в объеме и создают звук. Воздушные пузырьки «дышат» — увеличиваются и уменьшаются в объеме, а образующиеся при этом изменения давления распространяются сквозь толщу воды в воздух. В конце концов пузырьки воздуха либо схлопываются, либо всплывают и разрываются на поверхности воды, что приводит к дополнительным слабым звукам.

Когда вода при ливне или в водопаде ударяется о твердую поверхность, скажем, асфальт или скалу, вы можете услышать только звук удара, так как в этом случае пузырьки не образуются и не захватываются. В следующую раз, когда вы будете идти по улице и начнется ливень, прислушайтесь и попробуйте заметить разницу в звуках между первыми ударами капель по сухому асфальту и последующими их ударами по поверхности луж, образовавшихся на тротуаре.

### 3.46 • РЕЗОНАНС В ВЕРТИКАЛЬНОМ СОСУДЕ

Когда вы заполняете водой сосуд с вертикальными стенками типа стакана, банки или графина, частота звука, который вы при этом слышите, увеличивается. Почему?

**ОТВЕТ** • Столб воздуха внутри такой емкости (от открытого отверстия до поверхности жидкости или до дна) похож на трубу с одним открытым концом. Частотный диапазон шума от льющейся струи на поверхность воды (см. предыдущую задачу) очень широк. Одна из этих частот совпадает с самой низкой собственной частотой воздушного столба в сосуде. Это означает, что изменения давления на этой частоте входят в резонанс с собственными колебаниями в столбе воздуха, при этом звуковые волны усиливают друг друга, и в результате образуется мощная результирующая звуковая волна. Часть энергии этой волны выходит наружу, этот звук мы и слышим (он идет в основном

на резонансной частоте, но можно услышать и слабые шлепки непосредственно от ударов струи воды).

Резонансная частота воздушного столба обратно пропорциональна высоте столба. Поэтому по мере того, как сосуд заполняется и высота столба воздуха до отверстия уменьшается, резонансная частота растет. Поэтому вы можете не глядя, а исключительно на слух, определить, когда емкость почти заполнится.

### 3.47 • УРЧАНИЕ ВОДОПРОВОДНЫХ ТРУБ

Почему иногда, когда вы открываете кран, раздается урчание труб?

**ОТВЕТ •** Обычно водопроводные трубы урчат из-за того, что при протекании воды по трубам возникает турбулентность. Особенно она сильна в местах изгибов труб и в фитингах (соединителях труб), где поток меняет направление или обходит препятствие. Турбулентность воды представляет собой совокупность вихрей, которые порождают изменения давления. При этих изменениях давление воды может уменьшиться настолько, что из растворенного в воде воздуха образуются пузырьки. Этот процесс называется *кавитацией*. Внезапное рождение пузырьков, колебания этих пузырьков и в конечном счете их схлопывание приводят к распространению волн в воде. Эти колебания передаются трубам, а от них — в воздух. Часто можно убрать шум, просто прикрыв кран, то есть уменьшив поток воды, и это снизит турбулентность. Звук может усиливаться при возникновении резонанса с колебаниями в потоке воды.

### 3.48 • ХРУСТ В СУСТАВАХ

Что вызывает звук, который раздается, когда вы тянете себя за палец, чтобы хрустнуть суставом? Почему нужно немного подождать, прежде чем сустав смог опять хрустнуть?

**ОТВЕТ •** Когда вы тянете себя за палец, вы расширяете пространство между формирующими сустав костями и уменьшаете ширину суставной полости. Эта полость заполнена изначально тонким слоем *синовиальной жидкости*, смазывающей сустав. Если достаточно сильно дернуть за палец, стенки полости могут раздвинуться, полость увеличится, и давление в синовиальной жидкости уменьшится. Это внезапное уменьшение давления вызовет образование одного или нескольких пузырьков растворенного в жидкости газа, в основном

углекислого. Это образование пузырьков, называемое *кавитацией*, посылает импульс давления через жидкость, суставную полость и дальше в воздух. Когда этот импульс дойдет до уха, вы услышите хруст. Чтобы повторить этот фокус, нужно подождать 15–30 минут, чтобы полость восстановилась до прежних размеров, синовиальная жидкость опять сжалась в тонкий слой между костями, а газ снова растворился в жидкости. Однако врачи не рекомендуют поступать так со своими суставами — они вам еще пригодятся.

### 3.49 • ТОНЫ КОРОТКОВА

Обычно, чтобы измерить давление крови, нужно надуть манжету, обернутую вокруг руки, и с помощью стетоскопа слушать шумы в потоке крови, когда давление в манжете увеличивается до перекрытия кровотока, а потом постепенно уменьшается и ток крови восстанавливается. Врач или медсестра записывают давление крови, при котором звуки, называемые *тонами Короткова*, прослушиваются через стетоскоп. Когда становятся слышны первые звуки, записывается первое значение давления — его называют *верхним (систолическим) давлением*, а когда стихают последние звуки, записывается второе значение — его называют *нижним (диастолическим) давлением*. Что это за звуки?

**ОТВЕТ •** Хотя тоны Короткова изучают уже больше ста лет, их источник по-прежнему не вполне ясен. Существует два объяснения.

1. Щелчки стенок артерии. Когда давление в надутой манжете уменьшается до уровня систолического давления крови, кровь под манжетой слабой струей начинает поступать в нижнюю часть руки и артерия, стенки которой были втянуты внутрь, пока надутая манжета перекрывала ток крови, расправляется. При расправлении стенок по руке проходит звуковая волна, и в стетоскопе раздаются щелчки. По мере того как давление в манжете продолжает падать, щелчки при каждой пульсации становятся все тише и наконец, при давлении, соответствующем диастолическому давлению крови, и вовсе исчезают. При первых щелчках врач фиксирует давление в манжете как систолическое давление крови, а при последних — как диастолическое давление.

2. Кавитация. Когда кровь начинает пульсировать под манжетой и проходить в нижнюю часть руки, сжатая артерия расправляется и понижение давления в верхнем течении потока крови приводит к тому, что

растворенный в крови газ (в основном кислород, азот и углекислый газ) выходит наружу и образует пузырьки. Когда вскоре после этого пузырьки схлопываются, кровь быстро втекает в пространство, которое занимали эти пузырьки, и такой мгновенный впрыск крови приводит к появлению звуковой волны, распространяющейся по сосудам в руке. Этот звук, вернее, звук от множества лопающихся пузырьков, который возникает сразу после прохождения каждой струйки крови в нижнюю часть руки, и есть тоны Короткова. Эти тоны слышны, пока давление в манжете не дойдет до диастолического значения, а после этого кровь в нижнюю часть руки потечет равномерно и беспрепятственно.

### 3.50 • АТАКА РАКОВ-УБИЙЦ

Оказывается, океан полон звуков. К примеру, колонии креветок поднимают иногда такой шум, что подводные лодки легко спрячутся за ним и гидролокаторы не смогут зарегистрировать гул их двигателей. Раки-щелкуны (*Alpheus heterochaelis*) издают сильный треск, когда атакуют жертву с помощью своей чрезмерно увеличенной клешни (которая гораздо крупнее второй клешни). Удивительно то, что рак защелкивает клешню не на самой добыче, а рядом, и этот звук оглушает или даже убивает жертву. После этого рак захватывает ее маленькой клешней и съедает. Морской рак-богомол (*Odontodactylus scyllarus*) тоже убивает свою жертву, не касаясь ее: он издает внезапный громкий щелчок своими ротовыми придатками. Что именно оглушает или убивает жертву в этих двух случаях?

**ОТВЕТ •** Когда две половинки клешни рака резко смыкаются, образуется струя такой силы, что возникает кавитация, то есть растворенный в воде воздух выходит из раствора в виде пузырьков. Эти пузырьки почти сразу схлопываются, и звук от их схлопывания распространяется в воде в виде импульсов, причем этот звук настолько громкий, что перепады давления могут оглушить или убить жертву. Резкий щелчок, издаваемый раком-щелкуном, — это не звук смыкаемых половинок клешни, а звуковой эффект от множества схлопывающихся пузырьков.

Перепады давления из-за схлопывания пузырьков настолько велики, что могут вызвать вспышки света. Это явление называют *сонолюминесценцией* (свет, порождаемый звуком). Однако применительно к креветкам это явление можно назвать *креветоломинесценцией* (свет, порождаемый креветками). Свечение

возникает из-за того, что, когда пузырек схлопывается, воздух внутри него очень быстро нагревается, и молекулы ионизируются, то есть образуются положительные ионы и электроны. Электроны почти сразу возвращаются на свои места, но при этом теряют энергию, излучая свет. Интенсивность света, испускаемого при схлопывании пузырьков (даже огромного их числа), настолько мала и эти вспышки такие короткие, что заметить их трудно.

Рак-богомол тоже испускает короткие звуковые импульсы за счет кавитации, но он для образования пузырьков использует не клешню, а атакующую пару ногочелюстей.

### 3.51 • ШУМ ЗАКИПАЮЩЕЙ ВОДЫ

Поставьте кастрюлю с водой на кухонную плиту, придвиньте к плите стул и прислушивайтесь к звукам, издаваемым водой. Одновременно наблюдайте за тем, что происходит внутри кастрюли. Звуки эти настолько привычны, что мы их не замечаем, но безошибочно можем по ним определить момент, когда вода закипит. Что вызывает эти звуки?

**ОТВЕТ •** При нагревании воды сначала вы слышите прерывистое шипение, оно становится все громче и громче и наконец превращается в постоянное. Этот звук издают воздушные пузырьки, которые при повышении температуры образуются в трещинах (царапинах) на дне чайника или кастрюли из растворенного в воде воздуха. Пузырек растет и по мере роста колеблется, отчего через воду и стенки чайника идут звуковые волны. Шипение — это как раз суммарный звук, испускаемый всеми пузырьками. Когда пузырьки становятся достаточно большими, подъемная сила выталкивает их на поверхность, и они там лопаются, издавая слабые хлопки.

Когда температура еще повысится и большая часть растворенного воздуха уже уйдет из воды и превратится в пузырьки, шипение затихает, но появляются другие — резкие звуки. Вода начинает закипать начиная со дна, и в трещинах образуются пузырьки пара. Но звук, который мы слышим, вызван не образованием пузырьков пара и даже не их колебаниями, а их схлопыванием. Когда пузырьки схлопываются, пар опять растворяется в воде, и она мгновенно устремляется в места, прежде занятые пузырьками. И тогда раздается *щелчок*, который распространяется через воду и стенки кастрюли дальше в воздух. Этот звук мы и слышим.

Когда вода нагреется еще сильнее, пузырьки пара становятся настолько большими, что могут оторваться ото дна. Однако до поверхности они не доплывают: когда они поднимаются с очень горячего дна и попадают в более холодные слои воды, они схлопываются, издавая при этом резкие звуки, похожие на щелчки. Эти звуковые волны могут вызвать резонанс в столбе воздуха (находящемся между поверхностью воды и крышкой чайника), в объеме воды и в стенках чайника. Это означает, что звуковые волны усиливают друг друга, и в этих трех резонаторах образуются волны большой мощности, посылающие звук в окружающее пространство, который мы и слышим. Сочетание щелчков и звуков на резонансных частотах и образует те характерные звуки, слыша которые мы понимаем, что вода вот-вот закипит.

Если вода продолжит нагреваться и температура верхних слоев повысится, пузырьки в конце концов смогут всплыть на поверхность, не схлопываясь по дороге. И уже на поверхности они лопнут, издав слабый звук, похожий на шлепок. Когда прежние резкие щелчки заменяются на слабые шлепки — это сигнал того, что вода полностью закипела (то есть кипение происходит во всем объеме). А это значит, что пора заваривать чай.

### 3.52 • ЗВУКИ ПРИ ПЕРЕЖЕВЫВАНИИ ПИЩИ

Может быть, вам и не нравится, когда рядом кто-то звонко от чего-то откусывает и громко чем-то хрумкает, но вот вопрос: можете ли вы по звуку определить, что именно жует ваш сосед? Например, можете ли вы по одному лишь звуку понять, спелое ли яблоко он грызет, свежими ли чипсами хрустит? Производители еды часто прикладывают титанические усилия к тому, чтобы произведенные ими продукты при еде издавали «правильные» звуки.

**ОТВЕТ** • Да, вы можете определить по звуку, какое яблоко он грызет и какими чипсами хрустит. Мне даже кажется, что индустрия быстрого питания при производстве снеков по большей части ориентируется на издаваемый ими хруст. (Бросьте в кипящий жир, обваляйте в соли — и хрустите! Но совсем не на здоровье!) Когда хрупкий кукурузный чипс ломается, он тут же разваливается на мелкие кусочки, поскольку через заполненные воздухом ячейки сразу бегут многочисленные трещины. Эти ячейки гнутся и ломаются на части, эти части мгновенно начинают колебаться, что вызывает изменения давления воздуха и в результате

создаются звуковые волны. Тогда-то вы и слышите, что кто-то рядом хрустит чипсами. А когда вы хрустите чипсами сами, то слышите звук, который приходит в уши не только через воздух, но и через голову — колебания давления передаются туда через зубы и челюсти. Свежеприготовленные кукурузные чипсы очень хрупкие и, когда ломаются, издают звук высокой частоты (примерно 5000 Гц). Старые чипсы уже впитали влагу из воздуха и потеряли свою хрупкость. Когда вы раскусываете старые чипсы, то они просто раздавливаются, а не ломаются, и их кусочки не колеблются. Поэтому старые чипсы не хрустят.

Хрустящие яблоки можно отличить от вялых по звуку, особенно при первом надкусывании. Обычно звонкий хруст имеет частоту меньше 2000 Гц. Разница в звуках при надкусывании свежего и уже полежавшего яблока объясняется разным составом клеток яблочной мякоти. В свежем спелом яблоке вода в клетках находится под давлением. При нажатии клетки лопаются и возникает звуковая волна с частотой 100–1500 Гц. В старом яблоке вода в клетках находится под меньшим давлением (у них меньше тургор — напряжение клеточной оболочки), поскольку пектины (углеводы) из оболочки уже перешли в раствор. При нажатии клетки не лопаются, а раздавливаются, и все это происходит почти беззвучно.

### 3.53 • СНЭП, КРЭКЛ И ПОП\*

Один из популярных в Северной Америке сухих завтраков состоит из поджаренных воздушных рисовых хлопьев. Когда хлопья бросают в молоко, они с хрустом лопаются. Этот продукт издавна продвигался на рынок под лозунгом «Щелкай, хрусти, хлопай». Почему хлопья издают этот звук?

**ОТВЕТ** • Каждая рисовая хлопинка на воздухе находится под напряжением, то есть разные ее части тянут друг друга, но этого усилия недостаточно для разрушения. Когда одна часть намокает, ее прочность уменьшается, и другие части, тянущие в разные стороны, разрывают ее. Это вызывает мгновенные колебания, которые приводят к распространению слабого звукового импульса, больше похожего на треск, чем на щелчок или хруст. Когда вы едите эти хлопья на завтрак, помните, что звуки, которые вы слышите, — это прощальный привет воздушных рисовых хлопьев.

\* Снэп, Крэкл и Поп — гномики, фигурки которых нарисованы на упаковке хрустящих рисовых хлопьев, выпускаемых компанией «Келлоггс». *Прим. пер.*



### 3.54 • ГРОХОТ, ИЗДАВАЕМЫЙ САМОЛЕТАМИ И ПУЛЯМИ

До 1947 года самолеты летали со скоростями меньше скорости звука (*дозвуковыми* скоростями), но в 1947 году летчик-испытатель Чак Йегер на экспериментальном самолете Bell X-1 преодолел так называемый звуковой барьер, пролетев со скоростью, превысившей скорость звука (*сверхзвуковой* скоростью). Когда большинство самолетов стали летать со сверхзвуковой скоростью, частым, временами раздражающим и даже разрушительным явлением стал сопровождающий полет звук — *звуковой удар* или *хлопок*. Почему при полете самолета на сверхзвуковой скорости раздается звуковой удар, которого могут испугаться люди, кошки и от которого даже могут разбиться окна? Могут ли услышать друг друга пассажиры в сверхзвуковом самолете?

Чтобы взрыв бомбы повредил здание (скажем, его стены), давление, развиваемое при взрыве, должно превышать некоторое пороговое значение. А вот звуковой удар может разрушить здание и при давлениях в 100 раз меньше этого порогового значения. Как это возможно?

Некоторые пули летят со сверхзвуковой скоростью. Возникают ли при их полете звуковые удары?

Когда во время Второй мировой войны Германия обстреливала Англию ракетами V-1 («Фау-1»), наблюдатели сначала слышали звук приближающейся ракеты (характерное жужжанье, которое служило предупреждением), а уже потом происходил взрыв ракеты, поражающей цель. Позже, когда стали использовать ракеты V-2 («Фау-2»), наблюдатели слышали эти два звука уже в обратном порядке: сначала звук взрыва, а потом, чуть позже, звук летящей ракеты. Почему последовательность появления этих звуков изменилась?

13 августа 1989 года космический челнок «Колумбия», направляясь на авиабазу ВВС США «Эдвардс», пролетел сначала над Лос-Анджелесом, а потом над Пасаденой, городом в 17 км к северо-востоку от Лос-Анджелеса. Космический челнок летел со сверхзвуковой скоростью (примерно 4600 км/ч) и поэтому испускал мощную ударную волну, то есть звуковой удар, который был слышен в обоих городах. Любопытно, что сейсмостанция в Пасадене зарегистрировала мощную сейсмическую волну, пришедшую из Лос-Анджелеса, на 12,5 секунды *раньше*, чем пришла ударная волна от самого шаттла. Как могла ударная волна возбудить сейсмическую волну в Лос-Анджелесе?

**ОТВЕТ** • Когда самолет летит в атмосфере, он оттесняет воздух со своего пути, в результате возникают перепады давления. Эти изменения давления распространяются от самолета в стороны в виде звуковых волн. Работающий мотор тоже создает звук, причем если самолет летит со скоростью меньше звуковой, вы слышите этот звук и не замечаете волну давления, порождаемую расталкиванием воздуха.

Если самолет летит со скоростью выше скорости звука, ситуация обратная. Колебания давления воздуха по-прежнему расходятся от самолета в виде звуковых волн, но теперь скорость этих волн меньше, чем скорость самого самолета. Эти волны собираются вместе и образуют конус с вершиной в носу самолета. Этот конус движется вместе с самолетом до тех пор, пока самолет движется со сверхзвуковой скоростью. При звуковом ударе вы в первую очередь слышите эти собранные в конус звуковые волны (они называются *ударной волной*), а не звук работающего двигателя.

Когда самолет движется, скажем, по горизонтали, нижняя часть конуса создает «след» на земле, и если вы окажетесь внутри этого следа, давление воздуха на вашей барабанной перепонке сначала увеличится по сравнению с нормальным значением, потом упадет ниже нормы, а потом опять поднимется до нормального значения (график давления будет напоминать букву N, поэтому ударную волну, создаваемую самолетом, называют *N-волной*). Быстрые изменения давления воздуха вызывают колебания барабанной перепонки, и в результате вы слышите звук, точнее, звуковой удар.

Ударная волна от самолета в действительности состоит из множества отдельных ударных волн, испускаемых носом самолета, двигателями, крыльями, фюзеляжем и хвостом. Однако к тому времени, когда ударные волны доберутся до вашего уха, они сольются в единую ударную волну и вы услышите один звуковой удар. Тем не менее иногда можно различить и отдельные звуковые удары.

Звуковые волны, образующие конус ударной волны, могут и не достичь земли, если во время движения вниз их траектория искривится из-за изменений температуры воздуха вдоль нее. Тогда говорят, что звук подвергся *рефракции*. Если на пути звука воздух становится все теплее и теплее, траектория может искривиться вверх и на землю так и не попасть. Кроме того, если волны окажутся между слоями воздуха с более высокой температурой, они могут оказаться запертыми в канале и распространяться по нему на очень

большие расстояния (возможно, сотни километров). Например, люди иногда слышат звуковой удар, когда никакого самолета поблизости не слышно и не видно (громкий хлопок, донесшийся с пустого неба, может напугать кого угодно).

Когда сверхзвуковой самолет, особенно военный, ускоряется в горизонтальном направлении или совершает крутой вираж, ударные волны распространяются в разных направлениях, и в одной точке на земле может пересечься несколько волн. Сложение двух и более ударных волн означает, что скачки давления будут еще больше и люди на земле услышат *суперхлопок*, который их напугает. Именно при таких условиях могут разрушаться здания, особенно если частота, с которой происходят скачки давления, соответствует собственной частоте колебаний стен. И тогда колебания, вызванные ударными волнами, могут оказаться настолько большими, что разрушат стену.

Безусловно, внутри сверхзвукового самолета можно разговаривать друг с другом, поскольку воздух внутри самолета движется со скоростью самолета. Звуковые волны, испускаемые собеседниками в самолете, распространяются в этом движущемся воздухе как обычно и пассажиры ничего особенного не замечают.

Часть «хлопка», который вы слышите при выстреле, это звуковой удар, создаваемый сверхзвуковой пулей в полете. Немецкие ракеты V-1 летели со скоростью меньше скорости звука, так что шум от их полета наблюдатель слышал прежде, чем видел ракету. Ракеты V-2 уже были сверхзвуковыми, и они достигали цели раньше, чем туда долетал шум, который они создавали в полете.

Когда ударная волна от шаттла «Колумбия» достигла Лос-Анджелеса, она вызвала колебания во многих высоких зданиях в центральной части города; подобное случается и при землетрясениях. Периоды этих колебаний (время, за которое происходит полное колебание) лежали в интервале 1–6 секунд. Колебания зданий вызвали сейсмические волны. Например, здание, колебавшееся, скажем, с периодом 2 секунды породило сейсмическую волну с периодом 2 секунды. Сейсмические волны распространяются по земле быстрее, чем ударные волны в воздухе, поэтому они добрались до Пасадены раньше ударной волны. Первые сейсмические волны, вызванные колебаниями всех зданий, пришли почти в фазе друг с другом, так что на сейсмографе был зарегистрирован значительный всплеск. Но поскольку волны имели разные периоды,

позже они складывались случайным образом и многие из них гасили друг друга, так что всплески в сейсмографе стали ослабевать.

### 3.55 • ГРОМКИЕ ХЛОПКИ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЯХ

Когда в Японии скорые поезда начали развивать скорость 270 км/ч вместо прежней 220 км/ч, в железнодорожных тоннелях при прохождении через них поезд стал раздаваться громкий хлопок. Эти хлопки были такими же громкими и пугающими, как и звуковые удары при пролете сверхзвуковых самолетов. Почему хлопки усилились при увеличении скорости поезда?

**ОТВЕТ** • Любой поезд, а особенно скорый, проталкивается через воздух, поэтому он посылает волны сжатия перед собой. На открытой местности эти волны быстро гаснут (их энергия *рассеивается*), но в тоннеле они живут дольше, настолько долго, чтобы, сложившись, образовать ударную волну. Когда ударная волна доходит до конца тоннеля и выходит из него, ее энергия достаточно велика, чтобы произошел звуковой удар. Хотя современные технологии позволяют увеличивать скорость поездов, возникновение звуковых ударов накладывает ограничения на скорость поездов данного типа в существующей системе тоннелей.

### 3.56 • ГРОМ

Что вызывает гром и почему он может быть таким разным — от резкого, бьющего по нервам хлопка до довольно продолжительных раскатов?

**ОТВЕТ** • Основная причина грома — ударная волна, возбуждаемая молнией, а молния представляет собой электрический разряд. Огромный ток (до 500 000 А) молнии течет между облаком и землей (или между облаками) в узком канале с радиусом всего несколько сантиметров. Внутри канала электроны вырываются из молекул воздуха, ускоряются электрическим полем, сталкиваются с молекулами воздуха и передают им накопленную энергию. Поскольку температура газа, состоящего из этих молекул, очень высока (может достигать до 30 000 К), газ расширяется. Этот процесс идет невероятно быстро: канал горячего газа вначале расширяется со скоростью, гораздо большей скорости звука, создавая в окружающем пространстве ударную волну — резкие изменения давления, которые мы слышим как гром.

Если вы стоите близко к молнии и ударная волна накрывает вас, вы слышите один страшный удар грома. Если же вы отойдете подальше, то сначала услышите звук, пришедший от ближней части молнии, а чуть позже — от более удаленных ее участков. Однако, поскольку звуковые волны рассеиваются, более удаленный звук может оказаться уже не таким громким и пугающим. Возможно, вы услышите также и эхо грома от холмов, зданий, земли и даже облаков. Эти эффекты превращают однократный звуковой удар в раскаты.

Если вы окажетесь рядом с тем местом, где ударила молния, состоящая из нескольких коротких разрядов, вы сможете расслышать музыкальный тон. Если звуковые импульсы от разных разрядов пространственно не сильно разделены, вы не воспримете их по отдельности, для вас они образуют единый тон. Например, если интервал между последовательными импульсами равен 0,001 секунды, вы будете слышать тон на частоте  $1/0,001 = 1000$  Гц.

Если молния ударяет на расстоянии больше 20 км от вас, вы вообще можете не услышать грома, поскольку при прохождении звука через воздух его траектория искривляется (он подвергается рефракции) из-за изменений температуры воздуха (более теплый воздух имеет меньшую плотность, чем более холодный, и поэтому изменения плотности могут изменить траекторию звуковой волны). Поскольку обычно воздух в облаках холоднее, чем у поверхности земли, траектория звука, идущего к вам от далекой молнии, отклоняется вверх и удаляется от вас. Однако во время некоторых гроз воздух на земле оказывается холоднее, чем на высоте (такая ситуация называется *температурной инверсией*). При температурной инверсии звук, который должен был бы идти вверх, может направиться вниз. Иногда звуковые волны от разных частей молнии могут сложиться и направиться на вас (то есть звук сфокусируется на вас). Тогда забудьте о тишине — гром не даст вам уснуть (даже если вы спрячетесь под одеяло) до тех пор, пока не пройдет гроза.

Часть звуков, порождаемых ударом молнии, может лежать в области *инфразвука*, то есть их частота слишком низкая, чтобы вы их слышали. Источником инфразвука в грозу, судя по всему, служит мгновенное исчезновение электрического поля и изменение распределения зарядов в облаке при ударе молнии, когда оно мгновенно теряет огромное количество зарядов. Капли воды в облаке заряжены и, следовательно, отталкиваются друг от друга. После того как эти заряды

уносятся молнией, капли перестают отталкиваться, устремляются внутрь облака и упаковываются более плотно. Эта перестройка приводит к скачкам давления в воздухе, и они распространяются в сторону земли в виде инфразвука. Частота (около 1 Гц) слишком мала, чтобы ее можно было услышать, однако вы можете почувствовать ее, особенно если стоите прямо под облаком. Однако если вы там оказались, вам нужно в первую очередь остерегаться ударов молнии, а не прислушиваться к своим ощущениям в попытке уловить неразличимый инфразвук.

### 3.57 • БРОНТИДЫ — ТАИНСТВЕННЫЕ ГРОМОПОДОБНЫЕ ЗВУКИ

Гром среди ясного неба издавна обращал на себя внимание людей, а по поводу его источника давно велись споры. Например, легендарные исследователи Льюис и Кларк\*, путешествуя по Дикому Западу, сначала не поверили рассказам аборигенов об этих звуках, но изменили свое отношение, когда сами услышали их у подножия Скалистых гор. Эти звуки в разных частях света называли разными именами: *бронтиды*, *мистпоуфферы*, *пушки Барисала* — и это лишь некоторые их названия. В наше время сообщения о бронтидах иногда появляются в газетах, особенно если их услышало большое количество людей или если где-то они звучат регулярно. Можете ли вы предположить, что их вызывает?

**ОТВЕТ •** В наше время большая часть бронтидов — это, вероятно, звуковые удары от летящих сверхзвуковых самолетов. Когда люди слышат бронтиды, самолет может быть еще очень далеко, и тогда кажется, что гром вызван мистическими причинами. По законам США и Канады самолетам предписано избегать звуковых ударов над городами, но закон не распространяется на малонаселенные территории и океан. Например, бронтиды часто слышались (и часто о них сообщали в СМИ) на Восточном побережье США, и обычно они оказывались связанными со звуковыми ударами, возникавшими при пролете самолетов «Конкорд» (с 1976 по 2003 год). И хотя этим трансатлантическим лайнерам полагалось снижать скорость до дозвуковой задолго до побережья (например, когда они держали

\* Мэриуэзер Льюис и Уильям Кларк руководили экспедицией (1804–1806), целью которой было исследование территории вдоль рек Миссури и Колумбии и поиск их выхода к Тихому океану. *Прим. ред.*

курс на аэропорт Кеннеди в Нью-Йорке), над океаном они летели со сверхзвуковой скоростью. Траектории, по которым распространялись звуковые волны в звуковом ударе, зависели от того, как температура воздуха и скорость ветра менялись с высотой. В некоторых ситуациях вариации температуры и скорости ветра могли создать такой канал для звуковых волн, что они были слышны и на Восточном побережье вблизи аэропорта Кеннеди.

Однако лишь звуковыми ударами нельзя объяснить все бронтиды, которые слышат в наше время, а также любые бронтиды, которые фиксировали до 1947 года, когда сверхзвуковых самолетов еще не было. Эти некие другие бронтиды могли иметь разные источники. Они могли быть вызваны сейсмической активностью, происходящей где-то далеко, если колебания земли были слишком слабы, чтобы их почувствовать, а звуковая волна, идущая через воздух, уже могла быть слышна. Их источником мог быть и гром, если гроза бушевала так далеко, что ее не было видно, а в атмосфере возникало нужное распределение температур. Тогда звуковая волна могла постоянно отклоняться везде, где возникало изменение температуры по высоте, и тогда звук мог бы распространяться на большие расстояния. Правда, все эти объяснения трудно проверить.

### 3.58 • КАМНЕПАД И ЛЕСОПОВАЛ

10 июля 1996 года в Калифорнии, в национальном парке Йосемити, вблизи Счастливых островов на реке Мерседа, случились два сильнейших камнепада, один за другим. В каждом из них огромный кусок гранитной скалы сначала соскальзывал с крутого склона, а потом отправлялся в полет подобно снаряду и падал на землю примерно в 550 м от склона. Удары, произведенные ими, породили сейсмические волны, которые были зарегистрированы сейсмографами даже на расстоянии около 200 км от мест падения. Еще удивительнее то, что на расстоянии 300 м от места падения было повалено более тысячи деревьев, разрушены мост и закусочная, один человек убит и несколько ранены. Как могли падающие куски гранита вызвать такие сильные повреждения так далеко от места их падения?

**ОТВЕТ** • Удар каждого куска гранита о землю в конце падения вызывал изменения давления воздуха, которые распространялись от места падения в виде звуковых волн. Волна — так называемая *воздушная ударная волна* взрыва, вызванная ударом, — представляет

собой чередование областей сжатого и разреженного воздуха. Если вы окажетесь на пути этой волны взрыва, вас качнет порывом сильного ветра (образованного колебаниями давления в волне взрыва) сначала в одном направлении, а затем в обратном. Воздушная ударная волна взрыва при падении второго куска гранита, масса которого была примерно в три раза больше массы первого, была особенно разрушительна, в лесу скорость ветра от удара доходила до 430 км/ч, что сравнимо со скоростью ветра при торнадо. На самом деле воздушная волна взрыва, вызванная падением второго камня, имела скорость выше скорости звука (то есть это была действительно ударная волна), поскольку пыль, поднятая первым камнем, уменьшила скорость звука в воздухе от нормального значения 340 м/с до примерно 220 м/с, а вблизи места удара скорость воздушной волны взрыва была выше.

### 3.59 • ЩЕЛКАНЬЕ КНУТА И УДАР МОКРЫМ ПОЛОТЕНЦЕМ

Как правильно щелкнуть кнутом? Вы должны так быстро махнуть кнотовищем, чтобы в конце этого короткого замаха скорость кончика кнута была максимальной. Как погромче хлопнуть полотенцем и почему это проще сделать, если полотенце мокрое?

**ОТВЕТ** • Когда вам нужно щелкнуть кнутом (или чем-то похожим на него), вы делаете резкий взмах кнотовищем и таким образом посылаете волну вдоль кнута. Новички обычно посылают простую волну, а опытные мастера закручивают кнут петлей (рис. 3.5). Когда волна доберется до конца кнута, его ускорение может оказаться в 50 000 раз больше ускорения свободного падения, а скорость может превысить скорость звука. Как и другие объекты, движущиеся со сверхзвуковой скоростью (например, самолеты или сверхзвуковые пули), конец кнута издаст звук, представляющий собой звуковой удар (ударную волну), который мы и называем *щелчком* кнута.

Мокрое полотенце хлопает громче, чем сухое, из-за своей большей массы. Конечно, вам придется приложить больше сил, замахиваясь мокрым полотенцем, но зато его конец приобретет большую энергию.

Некоторые палеонтологи полагают, что динозавр-зауропод *Apatosaurus louisae*, имевший длинный и гибкий хвост, мог махать им как хлыстом, а конец хвоста мог развивать сверхзвуковую скорость и создавать ударную волну.



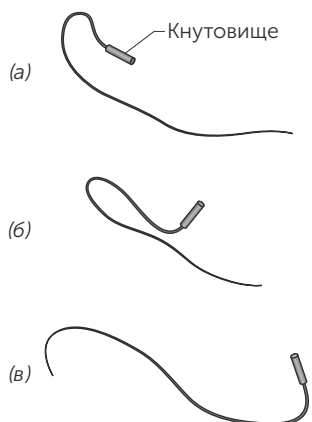


Рис. 3.5 / Задача 3.59. Три мгновенных снимка бегущей по кнута петли при резком забрасывании кнутовища назад.

### 3.60 • КАШЕЛЬ И ЧИХАНИЕ

Как возникает звук при кашле и чихании и почему некоторые люди кашляют и чихают так громко, что пугают окружающих?

**ОТВЕТ •** При кашле вы с большой скоростью выдыхаете воздух через трахею и верхние бронхи, и он уносит с собой лишнюю слизь, выстилающую верхние дыхательные пути. Чтобы развить такую высокую скорость, вы вдыхаете большое количество воздуха, перекрываете голосовую щель (узкое отверстие в гортани), увеличиваете давление воздуха, сжимая легкие, и частично прикрываете трахею и верхние бронхи, чтобы сузить канал, через который проходит воздух. А после этого мгновенно открываете голосовую щель и через нее с силой выталкиваете воздух наружу. Поток воздуха быстро становится турбулентным, и в воздух и легкие посылаются звуковые волны. На этой стадии голосовые связки не производят звука в гортани, поскольку они остаются раздвинутыми, чтобы не мешать потоку воздуха. Однако на завершающей стадии этого процесса голосовые связки сближаются, возвращаясь на место. Под действием воздушного потока они начинают колебаться и производят звук.

Выдох при кашле носит взрывной характер, скорость потока воздуха быстро возрастает при проходе через сжатую трахею и верхние бронхи. Согласно расчетам, у некоторых людей скорость выдыхаемого воздуха может достигать и даже превышать скорость звука. И тогда при выходе его из горла возникает небольшая ударная волна (звуковой удар) и кашель становится особенно громким. Такая же ударная волна может возникнуть и при чихании. Так что лучше не оказываться

в одном лифте с обладателями сверхзвукового кашля или чиха.

### 3.61 • АКУСТИКА КОМНАТ И КОНЦЕРТНЫХ ЗАЛОВ

Иногда концерты проводятся в помещениях, которые в смысле акустики ужасны: публика не слышит как следует, что говорят или поют артисты. Например, музыкальный концерт, устроенный в зале для баскетбола, превратится в какофонию звуков. Хотя на рок-концертах громкость часто увеличивают до такой степени, что уже никто из слушателей не думает о качестве звучания. Какой фактор определяет, насколько акустика помещения соответствует требованиям?

**ОТВЕТ •** Звуки, которые приходят к слушателям, можно разделить на три группы: *прямой звук*, идущий непосредственно от источника звука, *ранние отражения* от стен или потолка, которые приходят вскоре после прямого звука (в пределах 0,05 секунды) и *поздние отражения*, которые приходят позже. Ранние отражения должны быть громкими. Поскольку они приходят после прямого звука с такой маленькой задержкой, в мозге слушателя они сливаются с ним. Эти ранние отражения должны приходить к слушателю в основном слева или справа и усиливать у него ощущение того, что он находится в помещении, а также создавать иллюзию, что источник звука больше, чем он есть на самом деле. Без этих боковых отражений слушатель будет ощущать зал «мертвым», а источник звука — небольшим.

А вот поздние отражения не должны быть слишком громкими, иначе они перекроют, или *замаскируют* любой прямой звук, дошедший до слушателя одновременно с ними, и слушатель уже не сможет отличить прямой звук от отражений. С таким замазыванием прямого звука мы встречаемся, когда выкрикиваем что-то в замкнутом помещении с сильным эхом. Однако совсем убирать поздние отражения неправильно, поскольку они дают слушателю ощущение погруженности в звук.

Исследование психологического воздействия ранних и поздних отражений ведется постоянно, равно как и проектирование новых концертных залов. Конструкция зала зависит от его предназначения: для собраний и произнесения речей, пения или исполнения музыки. Обычно стены концертного зала имеют сложный рельеф, например на них делается много выступов, чтобы отраженный звук направлялся в аудиторию. Для уменьшения громкости эха задняя стенка иногда завешивается шторами или часть сцены покрывается ковром.



Акустические свойства оркестровой ямы имеют решающее значение для звучания оркестра. Музыканты слышат не только прямой звук других инструментов, но и отражения этих звуков. Однако больше всего неприятностей музыкантам, сидящим в оркестровой яме под сценой, доставляет резонанс звуковых волн в пространстве между полом ямы и перекрытием сцены (потолком ямы). При резонансе звуковые волны усиливают друг друга, и результирующая звуковая волна получается большой. Если возникают большие перепады давления на уровне уха музыканта, источник звука как бы оказывается расположенным на уровне головы, а не в том месте ямы, где он действительно расположен. Если правильно выбрать высоту ямы и правильно разместить в яме шумопоглотители, это раздражающее музыкантов обстоятельство можно ликвидировать или значительно уменьшить.

Старые церкви имеют твердые каменные стены, полы и своды, и в них обычно возникает сильное эхо, длящееся несколько секунд. В этих церквях звуки органа вместе с его отражениями от твердых поверхностей создают ощущение переизбытка звуков. Например, в лондонском соборе Святого Павла эхо длится 13,5 секунды. В современных церквях эхо длится меньше, поскольку современные стены поглощают звук лучше, чем старые каменные, поэтому проповеди, произносимые священником с кафедры, хорошо слышны отовсюду. Однако иногда и в современных церквях используется покрытие стен, позволяющее звуку лучше отражаться. Тогда звучание органа становится «более готическим», как в старых соборах.

### 3.62 • ГАЛЕРЕИ ШЕПОТОВ В РАЗЛИЧНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

В некоторых замкнутых объемах имеются такие помещения, в которых слова, произнесенные шепотом в одном месте, могут быть услышаны в другом, даже если эти места расположены далеко друг от друга. Согласно легенде, пещера-тюрьма «Ухо Диониса» в Сиракузах обладала таким свойством: слова, сказанные узниками, неведомым образом достигали уха тирана. Похожие вещи происходят и в старом зале заседаний Палаты представителей (ротонде), расположенной в здании Капитолия в Вашингтоне. Купол, который покрывает ротонду, отражает звуки, так что слова, сказанные по секрету шепотом в одном конце ротонды, могут быть слышны на противоположном конце, и если там окажется член партии политических противников, он может услышать слова, не предназначенные для его ушей.

Еще более неприятная ситуация сложилась однажды в соборе Сан-Джерландо в городе Агридженто на Сицилии. Один из служителей церкви обнаружил, что, если стоять в определенном месте собора, можно услышать произносимую шепотом исповедь священнику в исповедальне, расположенной в дальнем конце собора. Он и его приятели очень развлекались, подслушивая сокровенные тайны прихожан, до того дня, пока туда на исповедь не пришла его жена.

**ОТВЕТ •** Вряд ли галереи шепотов, встречающиеся в различных сооружениях, были специально заложены в их конструкции. Обычно такие галереи оказываются в помещениях со стенами, расположенными по эллипсу, когда звуковые волны могут фокусироваться в определенных точках — фокусах. А у эллипсов таких фокусов два. Если кто-то говорит, стоя в одном фокусе, звуковые волны отражаются от потолка и собираются в другом фокусе, если только отражению волн от потолка не мешают орнамент или люстры.

### 3.63 • ГАЛЕРЕЯ ШЕПОТОВ В СОБОРЕ СВЯТОГО ПАВЛА

Под куполом собора Святого Павла в Лондоне расположена галерея, с которой посетители могут разглядеть внутреннее убранство собора и увидеть издали детали первого яруса. Галерея имеет форму окружности с радиусом около 32 м. Если вы с приятелем встанете лицом к лицу у противоположных сторон галереи и он захочет что-то сказать вам, чтобы вы услышали его слова, ему придется громко крикнуть. Но если он повернется лицом к стене и скажет это шепотом, вы прекрасно его услышите при условии, что вы тоже повернетесь лицом к стене. В действительности вы хорошо расслышите его и в любой другой точке галереи, если будете стоять лицом к стене. Другими словами, вы не обязательно должны находиться на противоположной стороне галереи, так что это не эффект фокусировки, как было в предыдущей задаче. Как слова долетают до вас, почему приятель должен приблизиться к стене и повернуться к ней лицом, если хочет быть вами услышанным? Почему слова более разборчивы, если их произносят шепотом?

**ОТВЕТ •** Когда ваш приятель произносит слова, он создает звуковые волны, и некоторые из них как бы «зацепляются» за стену, отражаясь опять и опять по мере удаления от вашего приятеля. Другие волны могут пару

раз отразиться, а потом «затеряться» в сложном рельефе купола. Волны, которые зацепляются за стену, называются *поверхностными волнами*, или *волнами Рэлея*.

В 1904 году лорд Рэлей продемонстрировал этот эффект зацепления: он изогнул длинную металлическую полосу и сделал из нее полукруг — модель стены собора. С одного конца этой «стены» он поместил манок — свистульку для птиц, а с другой — горящую свечу. Пламя свечи служило индикатором: оно заметно колебалось, когда звуковая волна «обдувала» его. Если свисток свистел, пламя на противоположном конце полукруга начинало дрожать. Однако когда Рэлей к «стене» в промежуточной точке приставил узенький экран, звук свистка уже не мог заставить пламя колебаться, а значит, он распространялся не по прямой от свистка к свече, а шел вдоль полукруглой стены, испытывая по дороге множество отражений. Фактически вдоль стены формировался очень узкий канал, в котором и распространялся звук. Когда к стене ставился вплотную экран, он перекрывал канал и блокировал распространение волн вдоль стены. Если объяснять этот эффект простыми словами, то можно сказать, что волны цепляются за стену, поскольку подвергаются постоянным отражениям, которые направляют их от одной точки стены к другой. В действительности траектория распространения звуковой волны гораздо более сложная. Интересно, что при некоторых условиях эти плоские волны могут распространяться не только вдоль изогнутой, но и вдоль плоской поверхности, где уже не может быть множественных отражений, и ситуация еще сложнее.

Способность звука прижиматься к изогнутой поверхности и распространяться вдоль нее зависит от длины волны: более короткие волны проявляют эту способность в большей мере, поскольку точки, в которых происходят последовательные отражения, располагаются ближе друг к другу. А значит, звук лучше распространяется по галерее под куполом собора Святого Павла, если он состоит из звуковых волн с более короткой длиной волны. Такие длины волн соответствуют высоким частотам, а высокочастотных гармоник больше именно в шепоте.

### 3.64 • ЭХО ОТ СТЕН, УГЛОВ И ЛЕСОВ

Обычное эхо — это просто отражение звуковых волн назад к источнику звука. Возможно, вы слышали эхо в холлах или каких-то других помещениях с твердыми стенами, хорошо отражающими звук. Некоторые места прославились тем, что в них можно услышать многократное эхо,

когда звук возвращается к источнику звука, отразившись от разных поверхностей или же отразившись несколько раз от двух поверхностей. Угол, образованный тремя перпендикулярными друг другу плоскостями, например двумя стенами и потолком, может образовать *ретрорефлектор*, который отражает звук от двух или трех поверхностей обратно к источнику звука.

Появление эха в некоторых сооружениях очень трудно объяснить. Например, хлопок в ладоши под кирпичным арочным мостом, перекинутым над рекой, может возбудить многократное эхо, которое, по-видимому, нельзя объяснить только простыми отражениями звуковых волн. Чтобы многократное эхо звучало как музыкальный тон, отражения должны следовать одно за другим очень быстро.

Если вы обнаружите где-нибудь в лесу эхо, заметьте следующее: высокочастотный звук, например женский крик, дает хорошее эхо, а вот низкочастотный, например низкий мужской голос, может вообще не давать эха. Если вы пропоете какую-нибудь ноту (или просто хлопнете в ладоши), эхо будет звучать на октаву выше, то есть его частота будет вдвое больше частоты звука, издаваемого вами. Почему при отражении от ряда деревьев возникает такое странное эхо?

**ОТВЕТ •** Способность звука отражаться от каких-либо объектов, например деревьев, зависит от длины волны звука. Когда длины звуковых волн больше размеров одиночного объекта, от ряда деревьев лучше всего отражаются звуковые волны с меньшей длиной волны, чем волны с большей длиной волны. Поэтому, например, если посылать волны разной длины, от стены деревьев будут лучше отражаться волны с меньшими длинами. Поскольку меньшие длины волн соответствуют большим частотам, это означает, что в эхе, которое вы слышите, в отличие от звука, который вы издаете, будет больше звуковых волн с большими частотами, чем с низкими частотами. Это также означает, что низкочастотный звук будет давать плохое эхо или не давать его вовсе, а вот высокочастотный звук даст отличное эхо.

Если вы возьмете музыкальную ноту, в звуке будет содержаться по крайней мере две компоненты: низкочастотная (или, как говорят, *фундаментальная*) и компонента с удвоенной частотой (как говорят, *вторая гармоника*). Поскольку частота второй гармоники выше, она намного лучше отразится стеной деревьев, чем фундаментальная. Поэтому, несмотря на то что в пропеты вами ноте доминирует фундаментальная

частота, в эхе, которое вы услышите, может преобладать вторая гармоника. И эхо в основном будет слышно на удвоенной частоте по отношению к исходному звуку.

### 3.65 • «МУЗЫКАЛЬНОЕ» ЭХО ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ЗАБОРОВ И ЛЕСТНИЦ

Почему при хлопке в ладоши вблизи длинного пролета лестницы или длинного забора из штакетника эхо, вместо того чтобы ответить единичным хлопком, растягивается во времени? Почему частота эха уменьшается со временем? Один из самых впечатляющих примеров этого, как его называют, *музыкального (или чирпированного) эха* — это эхо, которое можно услышать, хлопнув в ладоши перед лестничным маршем пирамиды Кукулкана, находящейся среди других руин сооружений индейцев майя в Чечен-Ице в Мексике. Этот крутой лестничный марш состоит из 92 каменных ступеней, на которые так охотно взбираются туристы.

**ОТВЕТ** • При отражении от лестничного марша к вам придет множество сигналов эха, с небольшими сдвигами по времени. Изменение частоты в эхе возникает не из-за того, что в исходном звуке (например, в хлопке в ладоши) содержатся волны с разными частотами, а потому что волны идут к разным ступенькам под разными углами. Посмотрим на ступени пирамиды сбоку и предположим, что для нижних ступеней траектории приходящего и отраженного звука параллельны земле (рис. 3.6). Вы слышите первый отраженный сигнал от нижней ступени (ближайшей к вам), второй импульс придет от следующей ступени, затем через некоторое время придет третий импульс и так далее. Каждый следующий возвращенный импульс приходит с некоторой задержкой по отношению к предыдущему, поскольку его путь до этой ступеньки и обратный путь от нее к вам — длиннее. Вы не ощущаете эти импульсы по отдельности, а воспринимаете лишь частоту, с которой они приходят. Например, если время между импульсами равно 0,002 секунды, вы слышите звук с частотой примерно 500 Гц.

Теперь посмотрим на верхние ступеньки: траектории звуковых волн, идущих к ним и обратно к вам, — наклонные. Поэтому разность путей туда и обратно до одной из верхних ступеней и до следующей больше, чем для аналогичной пары нижних ступеней. Поэтому и временной интервал между импульсами больше. Например, время между импульсами может повыситься до 0,003 секунды, что воспринимается как

музыкальный тон на частоте 333 Гц, то есть звук, отраженный от высоких ступеней, более низкочастотный, его тон ниже, чем у отраженного от нижних ступеней.

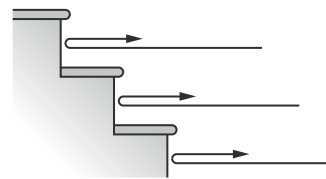


Рис. 3.6 / Задача 3.65. Отражения звука от ступеней лестницы.

Механизм получения музыкального эха от забора из штакетника похож на этот, за исключением того, что отражающие элементы (штакетины) разделены в пространстве по горизонтали, а не по вертикали, как ступени.

Если звуковые волны посылаются в сторону регулярной структуры, образованной цилиндрами, волны могут подвергнуться как конструктивной интерференции (когда волны усиливают друг друга), так и деструктивной интерференции (когда волны гасят друг друга). Для некоторых звуковых частот звук без потерь проходит через структуру, а для других частот его интенсивность сильно падает. Это показал эксперимент с объектом, представляющим собой произведение современного искусства — множество тонких вертикальных цилиндров, расположенных на квадратной площадке.

#### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

##### 3.66 • ЗВУКОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ДРЕВНИХ СООРУЖЕНИЯХ

В верованиях первобытных людей эхо, вероятно, играло особую роль. Так, древние австралийские петроглифы (рисунки на камне) нередко встречаются там, где присутствует довольно сильное эхо. В некоторых местах его лучше всего слышно на расстоянии 30 м от изображений, и поэтому авторам рисунков и их соплеменникам могло казаться, что источником этого звука являются сами рисунки.

Часть наскальных рисунков, обнаруженных в пещерах на территории современной Европы, тоже оказались в местах с наиболее сильным эхом. Возможно, именно там древние люди совершали свои обряды.

Мегалитические культовые постройки, найденные в Великобритании и Ирландии, обладают резонансными частотами, лежащими на нижнем краю диапазона слышимости человеческого уха. Это значит, что звуковые волны с определенными

низкими частотами накладываются друг на друга и в результате возникает усиленный звук. Конечно, подобное сооружение возводилось не ради создания определенных акустических свойств. Скорее всего, уже после его постройки обнаруживалось, что при выбивании барабанной дроби на определенной частоте возникает резонанс. Уже в наше время в Ньюгрейндже (мегалитической гробнице на территории Ирландии) ученые провели эксперимент и вызвали резонанс в длинном коридоре, ведущем от входа в центральную камеру. Для этого частота источника звука, размещенного в центральной камере, перестраивалась до тех пор, пока не совпадала с резонансной частотой коридора.

### 3.67 • ПЕНИЕ В ДУШЕ

Поюще в душевой кабине часто его голос кажется более красивым, и он начинает петь более вдохновенно. Почему ваш голос в душе звучит лучше, чем где-либо еще, или, по крайней мере, вам он больше нравится?

**ОТВЕТ** • Ответ здесь гораздо сложнее, чем я полагал, когда писал об этом явлении некоторое время назад. Тогда я утверждал, что главная причина того, что голос певца-любителя звучит лучше, заключается в том, что он входит в резонанс с собственными частотами душевой кабины и поэтому громкость звука на резонансных частотах возрастает. При попадании в резонанс целое число полуволн звуковой волны укладывается между двумя параллельными стенками или между полом и потолком. Когда выполняется это условие, волны складываются (то есть усиливают друг друга) и звук становится громче. Потому голос и звучит мощнее, глубже, и возможно, даже чище.

Впоследствии я получил и другие объяснения от своих читателей. Поскольку стены и пол (а возможно, и потолок) в душевой кабине, как правило, выложены твердой плиткой, они прекрасно отражают звук. Если бы вы попробовали петь в пустом деревянном шкафу тех же размеров, что и душевая кабина, звук уже не отражался бы так хорошо и войти в резонанс было бы труднее. К тому же, если вы запоете, закрывшись в шкафу, окружающие забеспокоятся.

Еще одна причина заключается в том, что, поскольку звук вашего голоса, отраженный от стен вокруг, быстро возвращается, вы оказываетесь как бы внутри этого звука. Вы слышите в уже отраженном звуке ту же

ноту, которую сами все еще выпеваете, и если фальшивите, получаете возможность слегка подстроиться (конечно, если шум воды не заглушит все несовершенства вашего вокала).

### 3.68 • ШУМНЫЙ СОСЕД

Жизнь превращается в муку, если над вами живет шумный сосед. Но что именно может так раздражать? Цоканье каблучков по деревянному полу? Можно ли этот стук уменьшить или совсем убрать, если в верхней квартире положить на пол ковер?

**ОТВЕТ** • В большинстве случаев раздражающий шум описывают как «глухие стук» или «тяжелые удары», и, как ни странно, вызван он не чем-то вроде стука высоких каблучков. Чаще он связан с низкочастотным гулом, создаваемым чьими-то шагами. Повторяющиеся шаги заставляют пол вибрировать, как мембрана барабана, обычно на частотах в промежутке между 15 и 35 Гц, лежащими на низкочастотном краю диапазона слышимости большинства людей. Такой шум хорошо слышит, а иногда даже и чувствует сосед снизу.

Хотя высокочастотный звук, вызываемый стуком каблучков по полу, тоже можно услышать, гораздо больше энергии передается низкочастотным колебаниям пола, напоминающим барабанную дробь. При низкочастотных колебаниях ковер способен даже ухудшить положение, поскольку из-за его мягкой структуры в колебания пола может перейти большая часть энергии от шагов. Единственный способ борьбы с таким шумом — переезд в другую квартиру с железобетонными полами и стенами.

### 3.69 • ПОЮЩИЕ И СКРИПЯЩИЕ ПЕСКИ

Если на некоторых пляжах пройти по песку или резко воткнуть в него руку или пластинку под углом примерно 45°, песок будет скрипеть или свистеть. В некоторых пустынях песчаные дюны гудят на низкой частоте (100 Гц), причем иногда так громко, что мешают разговаривать. Наблюдатели сравнивают этот звук со звуком австралийской трубы диджериду. Как песок может издавать такие звуки и почему песок не всегда (то есть не на всех пляжах и не во всяких песчаных дюнах) поет, гудит и скрипит?

**ОТВЕТ** • На наветренной стороне дюны ветер подхватывает и несет песчинки вверх, и они осаждаются либо на самой вершине дюны, либо на верхней части



склона на ее подветренной стороне. Это постепенное перемещение песчинок рано или поздно делает склон на подветренной стороне слишком крутым и неустойчивым, поэтому верхний слой песка на нем сползает вниз и наклон уменьшается. Таким образом, движение вверх песчинок с наветренной стороны и последующее скольжение их вниз на подветренной приводит к медленному перемещению дюны по пустыне.

На некоторых дюнах скольжение песка вниз может издавать гул, если песчинки имеют примерно одинаковый размер и структуру поверхности. На самом деле вниз могут скользить несколько слоев песка, каждый толщиной около 0,5 см. По мере того как слои опускаются, они колеблются перпендикулярно к лежащей под ними поверхности, по существу образуя колеблющуюся мембрану барабана. Когда скольжение прекращается, звук исчезает. Песчинки в скользящем слое запрыгивают друг на друга, сталкиваются друг с другом примерно 100 раз в секунду, то есть с частотой 100 Гц. Между частотой столкновений и прыжков и частотой колебаний слоя устанавливается координация (это называют обратной связью). Таким образом, частота звука, производимого колебаниями слоя, составляет около 100 циклов в секунду, то есть 100 Гц.

Если песок, по которому вы идете на пляже, издает звук, это значит, что ваши шаги вызывают скольжение слоев песка друг по другу, а также их вибрацию, что приводит к созданию звуковых волн.

Причина, по которой не все пески издают звуки, пока не совсем ясна. По-видимому, в поющих или гудящих песках песчинки обладают некоторыми особенностями, которые делают возможным движение довольно тонких слоев и их колебания. Самое интересное предположение — наличие особой корочки, покрывающей поверхность песчинок. Действительно, эксперименты со скрипучим пляжным песком показали, что способность издавать скрип постепенно исчезает, если песок промыть пресной водой. Причем эта «скрипучесть» не восстанавливается, даже если песок опять погрузить в соленую воду.

### 3.70 • ПОТРЕСКИВАЮЩИЙ ЛЕД И ШИПЯЩИЕ АЙСБЕРГИ

Если кубики льда бросить в напиток при комнатной температуре, послышится потрескивание. В чем причина? Когда айсберги начинают таять, они создают другие звуки — что-то вроде шкворчания или шипения, как при поджаривании на сковороде. Люди, которые

слышали эти звуки, находясь на подводных лодках и кораблях, называют их *айсберговой газировкой*. Что вызывает шипение айсбергов?

**ОТВЕТ •** Потрескивание, издаваемое кубиком льда, брошенным в жидкость при комнатной температуре, возникает из-за механических напряжений внутри кубика, вызванных резким увеличением температуры поверхности льда. Кубик льда при нагревании стремится расшириться, а внутренние слои остаются холодными, что приводит к появлению напряжений и образованию трещин, раскалывающих поверхность. Когда трещина расширяется и края ее расходятся, они вызывают изменения давления в жидкости или в воздухе, и эти изменения давления движутся от трещины наружу, образуя звуковые волны.

Но шипение айсберговой газировки происходит по другой причине и возникает только в непрозрачных льдах, имеющих внутри пузырьки воздуха. По мере таяния льда воздух может внезапно вырваться из пузырька и вызвать колебания в воде, если поверхность айсберга погружена в воду, и в воздухе, если поверхность находится снаружи. В любом случае внезапное изменение давления перемещается в виде звуковой волны прочь от разорвавшегося пузырька, иногда заставляя колебаться и другие части льда. Результирующая звуковая волна, в которой интенсивность изменяется случайно, и есть звук шипящей айсберговой газировки.

### 3.71 • ПРОХОЖДЕНИЕ ЗВУКА ЧЕРЕЗ СНЕГ

Почему засыпанный снежной лавиной человек может услышать спасателей, а спасатели не могут услышать погребенного под снегом? Он может кричать или стрелять из револьвера (о таком случае сообщалось в прессе), подавая сигнал бедствия, и все равно его не услышат.

**ОТВЕТ •** Обычно слоистый снег плохо пропускает звук. Тем не менее звуки, издаваемые пострадавшим, должны примерно так же проходить к спасателям, как и от них к заваленному снегом человеку. Основная причина того, что пострадавший слышит спасателей, а они его нет, в том, что погребенный под снегом человек находится в полнейшей тишине, а спасатели во время поисковых работ создают вокруг себя значительный шум.

### 3.72 • ЗВУК ШАГОВ ПО СНЕГУ

Почему, когда вы ходите по снегу, он скрипит под ногами? Почему звуки шагов обычно слышны на морозе?



**ОТВЕТ** • Если температура снега ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ , давление ног, направленное вниз, разрывает часть связей между снежными крупинками, а некоторые слои снега ломаются и начинают скользить друг по другу. Любое из этих действий вызывает короткие колебания снега, и при этом возникает звуковой импульс. Если снег не такой холодный, связи между снежными крупинками легко разрываются, а слои быстро разваливаются, так как в этих условиях связей между крупинками меньше или они слабее, чем когда снег очень холодный. Ослабление связей может быть вызвано частичным плавлением снега, тогда появляется смазка, облегчающая скольжение. Плавление может произойти и за счет поглощения солнечного света, особенно на поверхности. Известно, что поверхностный слой льда имеет особые свойства, например частично аморфную структуру, что может облегчать плавление. Не исключено, что нечто подобное происходит и со снегом.

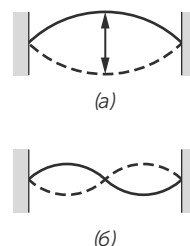
### 3.73 • «МОЖНО ЛИ УСЛЫШАТЬ ФОРМУ БАРАБАНА?»

Статья под таким названием вместе с идеей решения была опубликована в 1966 году математиком Марком Кацем. Этот вопрос можно перефразировать так: реально ли по частотам, которые можно извлечь при игре на барабане с плоской мембраной, определить ее форму? То есть после того, как вы прослушаете барабанную дробь, в которой содержится множество частот, сможете ли по любой из них определить, как мембрана барабана будет выглядеть на фотографии, то есть какие ее части колеблются, а какие — нет?

**ОТВЕТ** • Для данной струны, натянутой между двумя опорами, вы можете услышать ее форму в том смысле, что определенная частота соответствует определенному типу колебаний струны. Например, наименьшая частота, на которой струна может колебаться, соответствует простейшему типу колебаний, когда концы струны неподвижны (поскольку закреплены), амплитуда колебаний средней точки максимальна, а промежуточные точки колеблются с промежуточной амплитудой (рис. 3.7а). Следующая более высокая частота соответствует следующей по сложности конфигурации (рис. 3.7б) и так далее. Про такие частоты говорят, что это *гармонические частоты* струны, а соответствующие колебания струны называют *резонансными модами*. Если вы слышали какие-нибудь из этих частот, вы можете определить моду, соответствующую любой

из них. Более того, если вы уже узнали плотность струны и ее натяжение, по самой низкой частоте вы сможете определить ее длину.

У плоской мембраны барабана есть похожие резонансные моды и гармонические частоты. Однако эти моды несколько более сложные, поскольку поверхность мембраны двумерная. Моды круглых поверхностей более простые, а вот для других форм мембран барабанов определить соответствие колебательной моды (областей, которые колеблются, и областей, которые не колеблются) форме мембраны довольно сложно. Для большинства простейших форм мембран барабанов это можно сделать. Однако для более сложных форм мы не всегда можем однозначно определить форму мембраны, поскольку по крайней мере при двух абсолютно разных формах мембран может возбуждаться один и тот же спектр гармонических частот. Тем не менее даже в этих сложных случаях мы можем определить площадь мембраны барабана и, следовательно, можем услышать площадь мембраны барабана, даже если не всегда сможем услышать ее форму.



**Рис. 3.7 / Задача 3.73.** Конфигурации колеблющейся струны. Два мгновенных снимка: а) в случае простейшей конфигурации и б) в следующей по сложности конфигурации.

### 3.74 • ИНФРАЗВУК

Если вы окажетесь прямо перед динамиками на концерте тяжелого рока, вам, скорее всего, будет некомфортно. А бывали ли вы в ситуации, когда никаких оглушающих звуков не слышно, все спокойно, но какой-то акустический эффект заставляет вас почувствовать недомогание или по крайней мере ощутить дискомфорт?

**ОТВЕТ** • В жизни далеко нередки ситуации, когда на человека действует довольно мощный *инфразвук* (звук с частотой более низкой, чем наш порог слышимости, то есть меньше 15–30 Гц). Вас, конечно, не начнет качать в такт с ним, но чувство равновесия может нарушиться так сильно, что вы почувствуете дурноту. Или вы услышитедребезжание окружающих предметов,

а это тоже может нервировать. В салонах многих транспортных средств пассажиры облучаются инфразвуком, и если при коротких поездках это не оказывает влияния, при долгой вас укачает. Это малоприятное чувство особенно сильно, если инфразвук попадает в резонанс с собственными колебаниями салона (когда волны усиливают друг друга и внутри салона устанавливается мощная результирующая волна). Резонанс может наступить, если в автомобиле открыто окно и при обтекании потоком воздуха заднего края стекла возникает турбулентность и излучается инфразвук. Инфразвук возникает также при работе двигателя и качении шин по дороге, причем его интенсивность возрастает при увеличении скорости. К счастью, улучшенная аэродинамика современных автомобилей и их хорошая шумоизоляция уменьшают влияние инфразвука.

Инфразвук возникает и когда сильный ветер обдувает углы или края зданий, образуя вихри. Перепады давления приводят к формированию инфразвуковых волн, которые могут вызвать плохое самочувствие у обитателей дома. (Ветер может вызвать и обычный звук, например завывание снежной метели.) Эффект может усиливаться, если инфразвук попадет в резонанс с собственными частотами комнаты в этом доме, например если открыть в ней окно.

Когда мощный поток воздуха проносится над гористой местностью, он разбивается на турбулентные потоки, и тогда инфразвук может распространиться по гораздо большей площади. Многие исследователи пытаются установить связь между облучением таким инфразвуком и обострением депрессивных расстройств и ростом числа самоубийств. Но пока такая взаимосвязь не установлена.

На нас действует инфразвук, излучаемый механизмами (например, лифтами), волнами в океане, взрывами, сильными штормами. На нас может подействовать даже инфразвук, сопровождающий гром далеких гроз. Сильное извержение вулкана Кракатау (на одноименном острове в юго-восточной части Тихого океана недалеко от острова Ява), случившееся в 1883 году, привело к испусканию мощнейших инфразвуковых волн в атмосферу. Эти волны распространялись в узком канале между поверхностью земли и нагретым до более высоких температур слоем стратосферы. При попытке проникнуть в нижние слои стратосферы звуковые волны отклонялись (подвергались рефракции) обратно к земле. А вблизи поверхности земли они отклонялись вверх к стратосфере и так далее. На значительном расстоянии

от острова обычного звука никто не слышал, а вот инфразвук был зарегистрирован по всему земному шару.

Хотя вас могут облучать инфразвуком большую часть суток, он не оказывает сильного влияния на организм, поскольку его интенсивность мала. Однако если вам понадобится объяснить, почему вы не закончили домашнее задание, почему отношения разладились или любимая футбольная команда проиграла, смело валите все на инфразвук.

### 3.75 • ШЕЛЕСТ НА ПШЕНИЧНЫХ ПОЛЯХ

Что является причиной шелеста, который можно услышать тихой ночью на поле, засеянном зерновыми? (Фермеры называют этот шум звуком растущих колосьев.)

**ОТВЕТ •** Шелест, который можно услышать на поле, засеянном зерновыми культурами, издают листочки, которые при каждом дуновении ветерка трутся друг о друга. Шелест становится более явственным, когда ветер усиливается. Он становится громче и когда растения вырастают, поскольку длинные стебли и более крупные, хрупкие и сухие листья сильнее раскачиваются на ветру.

### 3.76 • ЩЕЛЧКИ НАТЯГИВАЕМОЙ ТКАНИ

Возьмите за концы полоску ткани длиной около 30 см двумя руками так, чтобы она провисала. А теперь резко раздвиньте руки, чтобы туго натянуть полоску. Почему при этом раздается треск? Почему частота звука тем выше, чем короче полоска?

**ОТВЕТ •** Когда полоска ткани резко натягивается, она мгновенно начинает колебаться, как натянутая гитарная струна, создавая в окружающем воздухе перепады давления. Эти колебания давления распространяются вокруг в виде звуковых волн. Это и есть щелчок, который вы слышите. Как и в случае с гитарной струной, частота звука зависит от длины полоски колеблющейся материи. В более короткой полоске возбуждается звук на более высокой частоте.

### 3.77 • ПЕНИЕ ВОДООТВОДНЫХ ТРУБ

Если вы хлопнете в ладоши вблизи одного конца водоотводной трубы, вблизи противоположного конца вы услышите звук «вжик» — своеобразное эхо, которое начинается на самой высокой частоте и быстро опускается до самой низкой. Это особое эхо прозвали *пением труб*. Пение трубы вы можете услышать и если кто-то хлопнет в ладоши у дальнего от вас конца трубы.

Похожее эхо иногда возникает на корте для ракетбола\*, но там частота со временем *увеличивается, а не уменьшается*. Чем вызвано такое певучее эхо? И чем именно вызвано изменение частоты?

**ОТВЕТ** • Звук «вжик», образованный эхом в трубе и прозванный *пением труб*, можно услышать в разных трубах, в том числе достаточно коротких. Это происходит благодаря резонансу, когда волны усиливают друг друга. Здесь мы ограничимся простым объяснением этого явления. Допустим, ваш приятель хлопнул в ладоши почти в центре одного из отверстий трубы некоторой длины. Этим он послал в трубу звуковой импульс, который отражается от стенок и распространяется вдоль трубы по разным путям. Например, он может один-единственный раз отразиться в точке, расположенной посередине.

Если количество отражений больше одного, звук вдоль трубы идет различными зигзагообразными путями и, следовательно, медленнее. Поэтому сначала мы слышим эхо, полученное в результате одного отражения, потом — в результате двух отражений и так далее. Частота звука, которую мы воспринимаем, — это частота, с которой звук эха приходит в наше ухо. При каждом отражении часть энергии волны поглощается и переходит в тепло, причем высокие частоты поглощаются лучше. Поэтому приходящие позже, после многократных отражений, волны лишены высокочастотных составляющих и воспринимаются как низкочастотный звук.

То же самое происходит, когда вы слушаете эхо своего собственного хлопка в ладоши. Однако в этом случае звук должен поменять свое направление на дальнем конце трубы. Такое происходит и если конец трубы закрыт (запаян или закрыт крышкой), и когда он открыт. В последнем случае это выглядит странно, но это так: когда волна доходит до открытого конца трубы, резкий переход к открытому пространству приводит к тому, что часть звука отражается от этой точки и идет обратно в трубу. Мы говорим в этом случае о том, что звук *отражается* от открытого конца. Заметим, что в некоторых музыкальных инструментах это отверстие специально развальцовано, чтобы уменьшить эти отражения и побольше звука выпустить наружу — напрямую к слушателям или через микрофон.

Когда мяч для ракетбола скользит по стене или полу корта, скольжение происходит рывками, из-за

\* Ракетбол — игра с мячом на прямоугольном закрытом корте. *Прим. ред.*

чего мяч начинает колебаться. Колебания приводят к колебаниям давления воздуха, и они распространяются от мяча в стороны в виде звуковых волн, то есть визга или писка. Поскольку твердая поверхность стен и пола хорошо отражает звук, вы слышите не только звук, приходящий к вам непосредственно от мяча, но и громкие отражения от разных поверхностей. В реальности звук отражается много раз от разных поверхностей корта (за исключением тех случаев, когда значительная часть задней стенки открыта для зрителей), и тогда можно услышать эхо, которое длится иногда 1–2 секунды. Скорость мяча со временем падает, и это, возможно, изменяет частоту рывков, а значит, и частоту звука, который вы слышите.

### 3.78 • СВИСТЫ ИГРУШКИ-ПРУЖИНКИ СЛИНКИ

Привяжем один конец пружинки слинки (см. задачу 1.65) к стенке и отправим свободный ее конец спускаться от стенки по ступенькам. Когда она растянется, ударим по пружинке карандашом и прислушаемся к звуку, издаваемому свободным концом. Мы услышим *свистящее эхо*: сначала эхо от свободного конца звучит на высокой частоте, но частота быстро упадет до низкой частоты. Что вызывает свист?

**ОТВЕТ** • Постучав по слинке, вы отправите по проволочке *поперечные волны*, то есть волны, при которых проволочка будет колебаться в перпендикулярном по отношению к ее длине направлении (в отличие от *продольных волн*, при которых проволочка колеблется вдоль длины проволочки). Скорость распространения поперечной волны зависит от частоты волны: более высокочастотные волны бегут быстрее низкочастотных. Когда вы постукиваете по проволочке, вы посылаете волны с широким спектром частот. Когда волны добираются до дальнего конца слинки, они отражаются и возвращаются к вам, причем сначала к вам приходит волна с наибольшей частотой, а волна с самой низкой частотой приходит последней. То, что проволочка свернута в спираль, похоже, не имеет значения.

### 3.79 • РУЖЕЙНЫЕ ВЫСТРЕЛЫ В РАЙОНАХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Исторические исследования районов вечной мерзлоты Северной Америки и России содержат описания загадочных звуков, напоминающих выстрелы из винтовки. В одном описании говорится о том, что североамериканские олени не обращают внимания на реальные

ружейные выстрелы, поскольку привыкли к подобным звукам. Что вызывает такие звуки?

**ОТВЕТ •** В районах вечной мерзлоты в грунт вкраплены области, где ледяные клинья уходят в мерзлые породы. В этом льду имеются многочисленные дефекты вроде вкраплений воздушных пузырьков, которые уменьшают его прочность. Когда температура резко падает, из-за возникающих при этом механических напряжений (их иногда называют термическими напряжениями) лед трескается и внезапный разрыв материала влечет возникновение в нем колебаний. Эти колебания передаются в воздух и распространяются прочь от бегущей трещины в виде звуковых волн, похожих на звук ружейного выстрела.

### 3.80 • ШУМ ПОЛЯРНОГО СИЯНИЯ И СГОРАЮЩИХ МЕТЕОРИТОВ

Можно ли услышать полярное сияние — эту великолепную феерию света, которую наблюдают в небе в высоких широтах? По сообщениям очевидцев, одновременно с полярным сиянием они слышали звуки, похожие на треск и свист. Можно ли услышать шум от полета сгорающего в небе метеора? Некоторые наблюдатели утверждают, что они могут услышать полет метеора перед тем, как увидят его, или сразу после того, как он появился в поле зрения. Все это выглядит странно, поскольку метеоры сгорают на большой высоте. Звуковой удар действительно иногда можно услышать, но в этом ничего необычного нет, поскольку он слышен уже *после того*, как метеор пролетел. Ну а если метеор сгорает достаточно долго и падает где-то рядом с вами или прямо на вас, то в том, что звук от его падения слышен, также нет ничего удивительного.

**ОТВЕТ •** Сопровождающий северное сияние инфразвук регистрировали уже давно, а вот звук в диапазоне слышимости человека до сих пор надежно не зафиксирован. Трудно поверить, что звуковая волна этого диапазона может пройти через более чем 100 км атмосферы и все еще оставаться достаточно мощной. Тем не менее многие люди сообщали о шуме, который совпадал по времени с северным сиянием. Некоторые из этих сообщений могли быть ошибочными. Например, если пристально вглядываться в изображение метеора на экране, шум вокруг можно принять за звук летящего метеора. (Иногда люди видели связь между полетом и звуком, а ее на самом деле не было.) Также неправильная интерпретация могла возникнуть из-за того, что при очень

низких температурах (ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ ) водяной пар в выдыхаемом наблюдателем воздухе мог замерзнуть и ледяные капельки, падая на землю, издавали легкий звон или стук. Однако некоторые сообщения могли бы оказаться реальными, если была бы показана связь между северным сиянием и электрическим полем на земле. Тогда, возможно, электрическое поле могло бы создать электрические разряды на ветках кустов или концах металлических прутьев. В этом случае на подобных остроконечных выступках мог возникнуть электрический разряд, при котором тоже возникает звук.

Если вы слышите звуковой удар от сгорающего метеора, звук приходит к вам со скоростью звука в воздухе, а это значит, что вы слышите его уже после того, как метеор исчез из вашего поля зрения. Как же можно услышать его в момент, когда он пролетает над вами, или даже до того, как вы его увидели? Это может произойти лишь в одном случае: если метеор испустил электромагнитную волну, которая распространяется, как известно, со скоростью света. Такая волна могла бы вызвать колебания предметов вокруг вас. Если бы эти колебания происходили на частотах, лежащих в диапазоне слышимости, вы смогли бы эти колебания услышать и тогда этот звук был бы связан с полетом метеора. Действительно, есть свидетельства того, что низкочастотные электромагнитные волны могут испускаться метеором при прохождении через верхние слои атмосферы. Эти волны могут генерироваться в плазменном канале, который создается при пролете метеорита (именно свечение плазмы мы видим, когда загадываем желание).

### 3.81 • АВСТРАЛИЙСКАЯ ГУДЕЛКА

Гуделка — это тонкая деревянная дощечка, к которой с одной стороны привязан шнурок. Держа рукой второй конец шнурка, деревянную дощечку быстро раскручивают, при этом раздается звук жужжания или гудения. (Австралийскую гуделку можно увидеть и послушать в фильме «Крокодил Дэнди 2».) Что вызывает этот звук?

**ОТВЕТ •** Дощечку на веревке вращают вокруг головы, закручивая веревку сначала в одном направлении, потом раскручивая и опять закручивая, но уже в противоположном направлении. Это движение в воздухе создает воздушные вихри, похожие на те, что возникают в телефонных проводах (см. задачу 3.2). Перепады давления в этих вихрях заставляют колебаться и саму дощечку, так что звук, который мы слышим, обязан своим происхождением и вихрям, и колебаниям дощечки.

## Глава 4

# Термодинамика

## Ночью охота идет за теплым

### 4.1 • МЕРТВЫЕ ГРЕМУЧИЕ ЗМЕИ

Гремучие змеи очень ядовиты и опасны для людей. Если этих змей обнаруживают в жилых районах, их обычно убивают. Однако смерть змеи не означает, что в то же мгновение она перестала представлять опасность. Действительно, многим пришлось пожалеть, что они сразу тянулись к мертвой змее, намереваясь выбросить ее. Змея могла быть мертва уже 30 минут, но она делала бросок, вонзала зубы в поднесенную к ней руку и выпускала яд. Как мертвая гремучая змея может атаковать человеческую руку?

**ОТВЕТ** • Между глазом и ноздрей на каждой стороне головы гремучей змеи имеется термочувствительная ямка. Когда, скажем, мышь оказывается неподалеку от головы змеи, излучаемое ею тепло улавливается этими ямками, вызывая рефлекторное действие: змея атакует и кусает. Поэтому змея может охотиться даже в безлунную ночь: видимый свет для этого ей не требуется.

Поскольку нервная система змеи продолжает функционировать какое-то время и после ее смерти, тепло, исходящее от приближающейся руки, может вызвать то же самое рефлекторное действие. Герпетологи (специалисты, изучающие змей) советуют: если надо убрать недавно убитую гремучую змею, не делайте этого рукой, а воспользуйтесь длинной палкой.

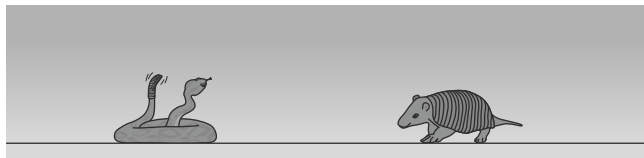


Рис. 4.1 / Задача 4.1

### 4.2 • ЖУКИ, СИГНАЛИЗИРУЮЩИЕ О ПОЖАРЕ

Мелкий жук златка пожарная (*Melanophila acuminata*) известен благодаря своему странному поведению. Жуки слетаются на лесные пожары, спариваются

неподалеку, а затем женские особи летят ко все еще дымящимся остаткам деревьев и откладывают яйца в горелую древесину. Это идеальное место для личинок, которые вылупятся из яиц, потому что теперь дерево не может защититься от них ни химическим путем, ни с помощью смолы. Конечно, если жуки находятся недалеко от огня, определить место пожара легко, но им удастся обнаружить пожар, находясь в 12 км от него! Как они это делают? Ясно одно: на таком расстоянии жуки не могут ни увидеть пожар, ни почувствовать запах гари.

**ОТВЕТ** • На каждом боку у этих жуков имеется пара органов, играющих роль детекторов инфракрасного излучения. Каждый из них состоит примерно из 70 округлых телец — рецепторов. При поглощении инфракрасного излучения сферическая часть рецептора слегка расширяется и надавливает на чувствительную клетку. Так энергия инфракрасного излучения преобразуется в нервный импульс. Определив, что где-то пожар, жук ориентируется так, чтобы все его четыре рецептора почувствовали инфракрасное излучение: он «нацеливается» на пожар, а затем летит в выбранном направлении.

### 4.3 • ПЧЕЛЫ, УБИВАЮЩИЕ ШЕРШНЕЙ

В Японии гигантские шершни *Vespa mandarinia japonica* нападают на пчел. Если такой шершень попытается атаковать пчелиный улей, несколько сотен пчел облепляют его, образуя плотный клубок. Примерно через 20 минут шершень умирает, хотя пчелы не жалят, не кусают, не сдавливают и не душат его. Почему же шершень погибает?

**ОТВЕТ** • Нормальная температура тела японских пчел 35 °С. Образовав плотный клубок вокруг гигантского шершня, они быстро повышают температуру до 47–48 °С. Если бы поднялась температура только у нескольких пчел, энергия, переданная шершню, была бы



незначительной, поскольку большая часть излученного тепла рассеивалась бы. Однако, когда шершень попадает в устроенную пчелами ловушку, повышается температура всех пчел одновременно, и значительное количество тепла передается шершню. Неопасное для пчел повышение температуры для шершня смертельно.

#### 4.4 • СКУЧИВАНИЕ ЖИВОТНЫХ

Почему ночью броненосцы (бывает, десятков особей) сбиваются в группы? Почему императорские пингвины (иногда тысячи птиц) собираются вместе во время антарктической зимы?

**ОТВЕТ** • Во время холодов броненосцы, императорские пингвины и многие другие теплокровные животные жмутся друг к другу, чтобы не замерзнуть. Если, скажем, императорский пингвин держится особняком, он теряет большое количество тепла за счет теплопроводности (тепло уходит в землю), конвекции (тепло уносится воздухом; при этом потери тепла особенно велики, если воздух движется) и теплового излучения (тепло рассеивается во все стороны). В суровом климате Антарктики, где температура может достигать  $-40^{\circ}\text{C}$ , а скорость ветра 300 км/ч, для отдельного пингвина потери энергии могут быть смертельно опасны. Скучивание особенно важно, когда пингвины антарктической зимой высиживают яйца. Этим занимается главным образом пингвин-отец — он месяцами держит яйцо на своих лапах. В течение всего инкубационного периода пингвину приходится воздерживаться от пищи, добыть которую он может только в море. Поскольку в это время с пищей энергия не поступает, он вынужден держаться вместе с остальными пингвинами, чтобы свести к минимуму энергетические потери, иначе ему придется оставить яйцо и отправиться на поиски пропитания.

Сбиваясь в тесные группы (до 10 птиц на квадратный метр), пингвины существенно уменьшают потери тепла из-за конвекции и излучения. Большое количество тепла теряют только птицы, стоящие по периметру, но и их согревают ближайшие соседи. Все это можно объяснить на простом примере: поставьте на холод отдельные «теплые цилиндры» — тепловые потери будут очень большими, поскольку велика площадь поверхности, через которую уходит энергия. Однако если связать цилиндры вместе, так чтобы получился один цилиндр большого радиуса, его общая площадь поверхности окажется меньше и, следовательно, потери энергии, уходящей через поверхность, снизятся.

#### 4.5 • ВЫХОД В КОСМОС БЕЗ СКАФАНДРА

Некоторые ученые полагают, что на короткое время человек может выйти в открытый космос без скафандра (как в фильме 2001 года «Космическая одиссея»). Почувствует ли космонавт холод, если будет «прогуливаться» вдали от Солнца? Подстерегает ли его еще какая-нибудь опасность, кроме недостатка кислорода?

**ОТВЕТ** • Комнатная температура кажется комфортной, в частности, потому, что интенсивность инфракрасного излучения от стен в направлении человека и интенсивность инфракрасного излучения от человека в направлении стен приблизительно равны. Когда интенсивность излучения в направлении вас существенно меньше, чем от вас, вы ощущаете прохладу или холод. Если, выйдя в открытый космос, космонавт отойдет от корабля, вблизи него не будет стен, и он замерзнет очень быстро. Мощность тепловых потерь в этих условиях может составлять около 800 Вт. Однако недостаток кислорода должен тревожить космонавта гораздо больше.

Следует помнить и о том, что космонавта окружает вакуум. Вода в вакууме сначала закипает (часть ее превращается в пар), а затем замерзает. В теле человека много воды... Ох, не лучше ли подумать о чем-то более приятном?

#### 4.6 • КАПЛИ НА ГОРЯЧЕЙ СКОВРОДКЕ, ПАЛЬЦЫ В РАСПЛАВЛЕННОМ СВИНЦЕ

Если нагреть сковородку до температуры чуть выше точки кипения воды, а затем капнуть на нее несколько капель воды, они растекутся по дну и через несколько секунд с шипением испарятся. Удивительно, но, если сильнее разогреть сковороду (выше  $200^{\circ}\text{C}$ ), из капель образуются небольшие шарики, которые могут просуществовать несколько минут. Как такое может быть, если температура сковородки гораздо выше? Этот эффект называют эффектом Лейденфроста в честь немецкого ученого Иоганна Готлиба Лейденфроста, исследовавшего его в 1756 году. Заметим, что еще раньше этот же феномен наблюдал нидерландский естествоиспытатель Герман Бургава, но его работа недостаточно широко известна.

Наблюдая, как на сковороде «танцуют» свернувшиеся в шарики капли, можно заметить, что совсем маленькие капельки вибрируют, принимая различные геометрические формы. Фотографируя со вспышкой, можно их рассмотреть, а установившиеся колебания — «заморозить», используя стробоскоп, излучающий свет короткими периодическими вспышками. Капли

большого размера медленно двигаются по сковородке наподобие амёб. Время от времени и из больших, и из маленьких капель с громким шипением вырывается пар. Почему так происходит?

Связан ли эффект Лейденфроста со старинным способом определения температуры утюга перед началом глажки: утюг надо потрогать пальцем, предварительно поплевав на него? Почему, коснувшись на мгновение горячего металла, мы не обжигаем палец?

Начиная с 1974 года я с завидным постоянством показываю студентам один и тот же фокус: сначала я быстро погружаю пальцы в воду, а затем — в расплавленный свинец, температура которого составляет примерно 400 °С. Как воде удается спасти мои пальцы? Однажды я по глупости забыл о воде. Дотронувшись до жидкого металла, я немедленно осознал свою ошибку: боль была мучительной.

Прежде чем продолжить, я должен предупредить, насколько такой опыт опасен. Конечно, дотронувшись до расплавленного свинца, можно обжечь пальцы, а если тигель перевернется, расплескавшийся горячий свинец может попасть на тело. Однако есть еще две не столь очевидные опасности. Если температура свинца близка к температуре плавления, он может затвердеть, если к нему поднести гораздо более холодные мокрые пальцы. Тогда вокруг пальцев свинец может затвердеть. В этом случае температура свинца, а вскоре и ваших пальцев, окажется около 328 °С. Другая опасность связана с тем, что воды на пальцах может оказаться слишком много. В этом случае вода будет испаряться так активно, что при ее расширении вверх взметнутся брызги жидкого свинца. Однажды подобный взрыв сильно обжег мне лицо и руки.

Роберт Рурк в своем бестселлере «Нечто ценное» тоже обыгрывает эффект Лейденфроста. Чтобы определить, кто из двоих мужчин лжет, вождь племени предлагает им лизнуть раскаленный нож: у человека, говорящего неправду, язык от страха пересохнет, и он обожжется, а у того, кто говорит правду, язык останется влажным, и ему нечего опасаться. Названия этого эффекта вождь племени не знал, но суть его понимал.

Если на плоскую поверхность вылить жидкий азот, капли жидкости будут вести себя так же, как и капли воды на раскаленной сковородке. Хотя температура жидкого азота –196 °С и он, как кажется, должен был бы немедленно испариться, какое-то время он продолжает оставаться жидким. Как это связано с эффектом Лейденфроста?

Часто жидкий азот используют для демонстрации научных опытов. В жидкий азот погружают цветок, а когда температура цветка сравняется с температурой жидкости, его вынимают и бросают на стол. Замерзший цветок настолько хрупок, что от удара разбивается вдребезги на мелкие осколки.

Уже много лет я показываю опыт с цветком своим студентам. Затем, после короткой театральной паузы, подношу сосуд с жидким азотом к губам и выливаю большую порцию себе в рот. Затем осторожно, чтобы не проглотить азот, выдыхаю воздух так, чтобы он прошел сквозь жидкость. В этот момент я похож на дракона, изрыгающего столб дыма. Почему мой язык не разваливается на кусочки, как цветок?

И здесь есть несколько опасных моментов. Когда я подношу сосуд с жидким азотом к губам, они иногда примерзают к его металлическому краю. В этих местах на губах появляются волдыри. Более серьезная опасность — инстинктивное желание проглотить то, что попало в рот. Если бы я это сделал, то серьезно повредил бы и гортань, и желудок, которые достаточно долго подвергались бы воздействию сначала очень холодной жидкости, а затем и испарившегося холодного газообразного азота.

При последней демонстрации этого опыта я неожиданно столкнулся с затруднением, которое заставило меня его прекратить. По-видимому, то ли холодная жидкость, то ли холодный газ так понизили температуру моих зубов, что связанные с этим механические напряжения разрушили эмаль на двух из них. В тот момент я ничего не заметил, но при следующем осмотре дантиста выяснилось, что мои зубы покрылись мелкими трещинками. Врач убедил меня прекратить подобные эксперименты.

**ОТВЕТ •** Капля воды, попадающая на горячую металлическую поверхность, температура которой меньше 200 °С, сразу растекается и быстро с шипением испаряется. Но если температура больше, капля не растекается. Когда она достигает поверхности металла, часть воды внизу капли мгновенно превращается в пар. Из водяного пара образуется тонкая подушка, на которой покоится оставшаяся часть капли. По мере того как испаряется жидкость внизу капли, эта подушка непрерывно пополняется паром. До тех пор, пока нет прямого контакта капли и поверхности металла, она медленно нагревается за счет конвекции через пар и тепла, излученного поверхностью металла. Поэтому такая плавающая капля может существовать достаточно долго.

Когда я погружаю мокрые пальцы в расплавленный металл, часть или даже вся жидкость сразу превращается в пар, и мгновенно мои пальцы оказываются защищенными перчаткой из пара. И опять же, пар замедляет передачу тепла от жидкости. Если бы моей кожи касался свинец, передача тепла происходила бы так быстро, что даже легчайшее касание привело бы к ожогу. Если мокрым пальцем коснуться твердой поверхности раскаленного металла, тоже образуется слой пара и касание происходит без трения. Один кузнец мне рассказывал, что благодаря отсутствию трения он успева­ет сбросить кусочки горячего металла, случайно попадающие на его голую потную руку. Если реагировать только на болевые ощущения, сигнал поступает слишком поздно и сильный ожог неизбежен.

Когда жидкий азот выливают на поверхность, скажем, в рот, часть жидкости снизу мгновенно превращается в пар, который поддерживает слой оставшейся жидкости и обычно не допускает прямого контакта с поверхностью. В результате конвекции и излучения тепло медленно, не так быстро, как при прямом контакте, отводится от поверхности.

Когда горячий кусочек металла падает в воду, имеет место *обратный эффект Лейденфроста*. Как только металл касается воды, он превращает ближайший слой воды в пар, окутывающий металл и замедляющий охлаждение. Когда температура металлической поверхности опускается ниже 200 °С, вода впервые непосредственно соприкасается с поверхностью металла и начинает выкипать.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 4.7 • УЖАСНЫЙ ГЛОТОК

Летом 1755 года сильный шторм разыгрался у маяка Эдистон, что стоит на Эдистонских скалах вблизи английского города Плимут. Генри Холл нес ночную вахту. Он должен был следить за свечами фонаря, освещавшего путь кораблям. В два часа ночи, поднявшись по узкой лестнице, чтобы проверить свечи, он обнаружил, что от искры загорелись сажа и свечное сало, скопившиеся на крыше фонаря. Крыша была сделана из листов свинца, лежавших на деревянных балках.

Хотя Холл лихорадочно пытался залить огонь водой, начался большой пожар. Огонь разгорался, пожирая балки и плавя свинец. Когда Холл в очередной раз направил вверх струю воды, балки не выдержали и на него обрушился поток расплавленного свинца. Кроме того, что ему обожгло лицо и руки, он почувствовал резкую боль сначала в горле, а потом в желудке. Очевидно, в тот раз, направляя воду вверх на огонь, он открыл рот.

Огонь охватил весь маяк. Холл и еще двое рабочих оказались в бушующем море. Когда их наконец спасли и доставили на берег, Холл умудрился объяснить, что проглотил расплавленный свинец. Но поскольку Холлу было 94 года, все решили, что от выпавших на его долю испытаний разум зрителя маяка помутился. Местный доктор успокоил Холла, но к его рассказу отнесся скептически. Разве можно выжить, проглотив расплавленный свинец?

После этого происшествия Холл прожил недолго. Через 12 дней у него начались конвульсии, и через несколько часов он скончался. Врач, делавший вскрытие, обнаружил в желудке Холла овальный кусок свинца весом около 200 г.

### 4.8 • ХОЖДЕНИЕ ПО РАСКАЛЕННЫМ УГЛЯМ

Впервые на лекции по физике я продемонстрировал «огнехождение» — хождение по горячим углям — задолго до того, как мода на этот цирковой трюк распространилась по всей Америке. Я разложил костер из обычных дров для камина, дал им прогореть, так что остались только ярко-красные головешки, сгреб угли в деревянный желоб, облицованный листом металла, и присыпал песком. Мы с ассистентом внесли желоб в аудиторию. В тот раз я рассказывал об эффекте Лейденфроста (см. задачу 4.6). Сняв туфли и носки, я кратко объяснил, почему этот эффект поможет мне

предохранить ноги во время хождения по углям. После трех шагов я хоть и почувствовал тепло, но не обжегся, а только испачкал ноги.

Все смелее и смелее я повторял этот трюк в течение двух лет. Но оказалось, что был слишком самоуверен: во время одной из таких «прогулок» по углям я здорово обжегся. Боль была настолько сильной, что мозг отказался воспринимать информацию о ней, и мне удалось закончить пятидесятиминутную лекцию. Когда же я, хро­мая, добрался до врача, боль нахлынула с новой силой.

На некоторых популярных тренингах, где обучают огнехождению (часто за большие деньги), упор делают

на учение Будды, согласно которому сознание надо заполнить «правильными мыслями». Могут ли мысли уменьшить передачу тепла ногам? Если нет, что позволяет без вреда ходить по горячим углям? Почему иногда техника безопасности подводит и жертва страдает не только от сильных ожогов, но и от страха возможных осложнений, например заражения крови?

**ОТВЕТ** • Итак, я утверждал, что эффект Лейденфроста — основа безопасного огнехождения, пока мой коллега, физик Берни Лейкин, не убедил меня, что это не так. Когда я ставлю ногу на угли, их поверхность горяча, но теплопроводность мелких угольков низка. Поэтому, если идти быстро, только небольшое количество тепла передается коже и ноги не страдают. Конечно, если вы идете медленно, поступление тепла за счет теплопроводности может привести к сильному ожогу.

Бегать по углям неразумно: можно случайно забросить уголек поверх стопы. В этом случае он будет достаточно долго контактировать с кожей, что приведет к ожогу. Поэтому я иду не слишком быстро.

Эффект Лейденфроста тоже обеспечивает защиту. По горячим углям я хожу потными ногами. Пот помогает по трем причинам. Во-первых, он в какой-то мере охлаждает поверхность углей. Во-вторых, отбирает на себя часть предназначавшегося мне тепла, и в-третьих, кое-где пот, испаряясь, на короткое время образует лейденфростовский слой. Все эти факторы помогают предохранить ноги, если мой шаг слишком широк или угли особенно горячи. Обычно я так сильно нервничаю, выполняя этот трюк, что ноги у меня потеют. Но однажды я самоуверенно решил, что успех мне гарантирован. В тот раз мне явно нужна была дополнительная защита: сухие ноги не уберегли меня. На некоторых тренингах, где учат огнехождению, у участников провоцируют сильные эмоциональные переживания, отчего у них могут вспотеть ноги. Часто до того, как подвести к углям, людей водят по влажной траве — от росы или после полива.

Уже давно я пришел к мысли, что диплом физика надо вручать не после сдачи письменного экзамена. Лучше предложить выпускнику, например, пройти по раскаленным углям. Если в голове у человека, вознамерившегося стать физиком, «правильные мысли», иначе говоря, если он по-настоящему верит в физику, с ним все будет в порядке и ему можно давать диплом. Чтобы облегчить студентам жизнь, стоит разрешить им пользоваться на экзамене справочным материалом,

например они могут принести свой учебник физики. Я сам обычно беру с собой на лекции мои любимые «Основы физики» Дэвида Холидея и Роберта Резника. Однажды, и это был ужасный день, я забыл книгу, обжег ноги и в течение двух недель беспокоился, как бы дело не закончилось заражением крови.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 4.9 • РАССКАЗЫ ОБ ОГНЕХОЖДЕНИИ

В 1984 году журналистка одной из радиостанций в Сан-Франциско по приглашению некоего «физика» в выходные отправилась на тренинг по огнехождению. Физик утверждал, что на его тренинге еще никто ни разу не пострадал. Но, пройдя почти три метра по слою тлеющих углей, журналистка получила ожоги первой и второй степени. Утром в понедельник в программу новостей включили магнитофонную запись ее крика, сделанную во время этой «прогулки».

В том же 1984 году репортер журнала Rolling Stone опубликовал отчет о тренинге, который провел один калифорнийский «гуру». Согласно учению этого «гуру», «контроль сознания» может позволить избежать ожогов при хождении по углям, если участники тренинга направят всю свою силу воли на решение этой задачи. В самом деле, большинство участников, которых сначала привели в состояние эмоционального возбуждения, а затем отправили ходить по углям, обошлись без ожогов. Один из участников даже утверждал, что, если бы ему удалось установить полный контроль над своим мозгом, он мог бы «пережить даже взрыв атомной бомбы».

Этому человеку повезло. Его не было на тренинге, случившемся через два дня, когда, прихрамывая и опираясь на две палки, по углям пошла молодая женщина с травмами головного и спинного мозга. Она явно верила разглагольствованию «гуру» о том, как «мысли о правильных вещах» могут предотвратить ожоги от углей. Репортер Rolling Stone замечает, что в среднем у участников тренинга огнехождение занимало полторы секунды, но молодая женщина провела на углях 7 секунд, пока у нее не случился болевой шок. Прежде чем она упала, ее подхватили и оттащили подальше от углей. С серьезными ожогами ног девушка провела в больнице 12 дней.

#### 4.10 • ЗАМЕРЗШАЯ И ПЕРЕОХЛАЖДЕННАЯ ВОДА

Как замерзает вода? Почему температуру воды можно опустить ниже, а иногда даже существенно ниже точки замерзания, а вода все еще будет оставаться жидкой? Такая вода называется *переохлажденной*.

**ОТВЕТ** • Для замерзания воды необходим *зародыш кристаллизации*. Им может быть частичка пыли, пузырек растворенного воздуха или что-то другое, на чем начнут осаждаться молекулы воды, упорядочиваясь в структуру кристалла льда. Причина в том, что рост кристаллика льда данного радиуса должен быть энергетически выгодным. Если начальный радиус кристаллика меньше некоторого критического значения, требуется затратить энергию, чтобы такой зародыш рос, а это маловероятно.

Если изначально лед образуется на зародыше кристаллизации, радиус которого больше критического значения, кристалл растет. Однако в отсутствие зародыша появление кристаллика критического радиуса требует взаимного сближения определенно ориентированных молекул. Вероятность такого случайного сближения возрастает при понижении температуры ниже точки замерзания, когда молекулы воды становятся менее подвижными и более предрасположены к образованию твердой кристаллической структуры. Поэтому воду с небольшим количеством зародышей кристаллизации можно переохлаждать. Очищенную воду в стерильном контейнере, прежде чем она замерзнет, можно охладить до  $-20^{\circ}\text{C}$ , а в тучах незамерзшие капли воды могут существовать и при температуре до  $-40^{\circ}\text{C}$ . Но даже обычная вода из-под крана, изобилующая зародышами кристаллизации, может не замерзать до тех пор, пока ее температура не станет на несколько градусов ниже точки замерзания.

Чтобы вода замерзла на поверхности раздела «вода — лед», тепло должно отводиться либо через воду, либо через уже образовавшийся слой льда. При теплоотводе через переохлажденную воду происходит дендритный рост кристаллов льда: в воду прорастают ветвящиеся и расходящиеся в разные стороны образования из льда. Если тепло отводится благодаря теплопроводности через слой образовавшегося льда, поверхность раздела «вода — лед» остается плоской. Если где-то на поверхности замерзание произойдет быстрее и образуется ледяной выступ, в этом месте отвод тепла будет происходить медленнее, поскольку слой льда толще. Следовательно, пока не «подтянется» остальная

поверхность, там, где расположен выступ, замерзание происходит медленнее. Когда вся вода замерзнет, поверхность льда окажется плоской.

#### 4.11 • КАК ПРАВИЛЬНО ЕСТЬ МОРСКОЙ ЛЕД

Живущие у моря жители Севера знают, что свежий, только что замерзший лед есть или растапливать нельзя: он слишком соленый. Но старый, многолетний лед для этих целей подходит. Они также знают, что можно улучшить вкус льда, если недавно замерзшую льдину вытащить на берег, желательно весной или летом, когда тепло. Почему лед становится менее соленым при теплой погоде, когда испарение уменьшает количество воды в льдине, концентрация соли увеличивается и, казалось бы, лед должен был стать более соленым?

**ОТВЕТ** • Когда морская вода замерзает, соль (и другие примеси) не встраиваются в структуру кристалла льда, а образуют вкрапления, которые называют *ячейками рассола*. Ячейки рассола медленно мигрируют в слое льда, перемещаясь вниз, и поэтому соляной раствор постепенно выходит из льдины. Если температура льда повышается, например когда льдину вытаскивают и оставляют лежать на берегу на солнце, ячейки рассола перемещаются быстрее и скорость опреснения увеличивается.

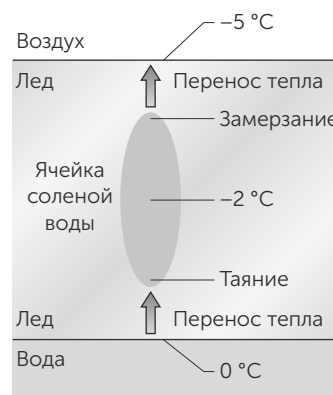


Рис. 4.2 / Задача 4.11. Ячейка рассола,двигающаяся вниз через слой льда к воде.

На рис. 4.2 показана ячейка рассола в слое льда. Температура льда сверху совпадает с температурой воздуха, равной  $-5^{\circ}\text{C}$ ; температура льда снизу равняется  $0^{\circ}\text{C}$ , то есть температуре замерзания воды, а соленая вода внутри ячейки раствора имеет температуру  $-2^{\circ}\text{C}$ . Вода внутри ячейки не замерзает, поскольку соль понижает ее точку замерзания — молекулы соли



влияют на способность молекул воды образовывать кристаллическую ледяную структуру. Лед в низу ячейки постепенно тает, поскольку тепло передается с низа ледяного слоя вверх. Вода в верху ячейки постепенно замерзает, поскольку тепло поднимается к поверхности слоя льда. Таким образом сама ячейка перемещается вниз. Достигнув нижней поверхности льдины, она отдает соль воде подо льдом или почве. Так постепенно лед опресняется.

С теплообменом между льдом и водой связан следующий удивительный результат: если кубик льда (из пресной воды), температура которого равна  $-1^{\circ}\text{C}$ , поместить в очень соленую воду той же температуры, он растает, хотя температуры льда и воды равны. Чтобы объяснить, как это получается, предположим, что соль понижает точку замерзания воды до  $-2^{\circ}\text{C}$ . На границе раздела между двумя состояниями воды наблюдается повышенная активность на молекулярном уровне: молекулы воды непрерывно переходят туда-сюда из льда в жидкую воду и обратно. Однако, если число молекул, ушедших из льда, равно числу молекул, перешедших в лед из воды, количество льда не меняется. В воде происходит электролитическая диссоциация молекул соли, и молекулы воды собираются вокруг получившихся ионов наподобие детей, толпящихся вокруг ларька с мороженым — этот процесс называется гидратацией. Теперь процессу перехода молекул из воды в лед мешают молекулы соли, связывающие молекулы воды. Таким образом, молекулы воды покидают кубик льда, но другие молекулы туда не поступают, и, следовательно, кубик растворяется.

#### 4.12 • СКОРОСТЬ ОСТЫВАНИЯ ГОРЯЧЕЙ И ТЕПЛОЙ ВОДЫ

В дискуссионной статье, написанной мной для журнала *Scientific American*, обсуждался старинный вопрос: если в одинаковые открытые сосуды налить равное количество воды, очень горячей в один сосуд и более прохладной в другой, а затем вынести их на мороз, где раньше образуется лед? Удивительно, но в некоторых случаях горячая вода замерзает быстрее.

Этот результат, известный еще Аристотелю, хорошо знают жители стран с холодным климатом. Однако ученые долго считали его бабушкиными сказками, пока в 1960 году танзанийский студент Эрасто Мпемба не попросил преподавателя объяснить, почему смесь для приготовления мороженого замерзает быстрее, если ее не остужать, а поставить в холодильник

горячей. Преподаватель поверил, что именно так и бывает, только после того, как Мпемба продемонстрировал этот эффект, который теперь называют эффектом Мпембы, на примере воды.

Почему же изначально горячая вода остывает быстрее и замерзает раньше, чем то же самое количество прохладной (а иногда даже и холодной) воды?

**ОТВЕТ** • Одно из возражений относительно справедливости сделанного утверждения основывается на здравом смысле. Если вначале масса воды в сосуде А была горячее равной ей по весу массы воды в сосуде Б, но тем не менее замерзла первой, это означает, что в какой-то момент времени вода в сосуде А должна была сравняться по температуре с водой в сосуде Б. Не означает ли это, что, начиная с такой температуры, скорость остывания воды в обоих сосудах будет одинакова? Одно из возражений против этого рассуждения состоит в следующем: температура воды в сосуде изменяется в некотором интервале значений, поэтому всему объему воды в нем нельзя приписать одну и ту же температуру. Чтобы подтвердить или опровергнуть эффект Мпембы, надо проанализировать его детально.

Процесс остывания воды описывается слишком большим количеством переменных, и поэтому до сих пор убедительных доводов ни за, ни против этого результата не найдено. Например, в обычном холодильнике изменение потока воздуха и температуры в разных опытах приводит к разным скоростям охлаждения, и полученные недостоверные данные можно ошибочно интерпретировать в пользу эффекта Мпембы. Следовательно, необходимо большое количество испытаний, в которых строго контролируются условия их проведения. Похоже, ряд исследователей в надежных экспериментах продемонстрировали эффект Мпембы, но не смогли прийти к согласию относительно объяснения этого эффекта. Вот некоторые из их соображений.

1. Эффект Мпембы объясняется тем, что потери массы и энергии больше при испарении изначально более горячей воды. Если, накрыв сосуд, исключить испарение, обычно эффект Мпембы исчезает. Хотя в определенных условиях он наблюдается даже тогда, когда испарения нет.
2. Когда температура воды опускается ниже  $4^{\circ}\text{C}$  и до точки замерзания, ее плотность меняется необычным образом. В отличие от большинства жидкостей, на этом последнем перед замерзанием

этапе понижения температуры вода расширяется. Когда температура воды опускается ниже  $4^{\circ}\text{C}$ , более холодные объемчики воды оказываются легче и всплывают. Тогда как чуть более теплые объемчики становятся тяжелее и тонут. Перемешивание приводит к подъему более теплой воды вдоль стенок сосуда на открытую поверхность воды, откуда отводится тепло. Эксперименты указывают на то, что, если остывание воды начинается при более высокой температуре, такое перемешивание идет интенсивнее. Это означает, что изначально более горячая вода раньше может достичь точки замерзания благодаря усиленному перемешиванию и охлаждению на последнем этапе — если оно почему-то сохранится до этого этапа.

3. До того как внезапно начинает образовываться лед, вода находится в переохлажденном состоянии (ее температура ниже точки замерзания). Вода, которая вначале была холоднее, почему-то способна переохлаждаться до более низкой температуры, чем та, у которой изначально температура была выше, и именно поэтому в такой воде позже образуется лед.
4. В реальных условиях домашнего эксперимента существенна следующая причина: горячий сосуд, поставленный на покрытую снегом или льдом поверхность, проталивает под собой углубление и обеспечивает на все остальное время хороший тепловой контакт и большую скорость охлаждения.

#### 4.13 • НЕБО, ЗАМОРАЖИВАЮЩЕЕ ВОДУ

Там, где нет холодильников, лед делают, оставляя на улице мелкую миску с водой на ночь. Миску поднимают или как-то по-другому изолируют от земли. Конечно, вода замерзнет, если температура опустится ниже точки замерзания. Но ясной ночью вода может замерзнуть, даже если температура будет несколько выше. По какой причине в такие ночи вода замерзает?

**ОТВЕТ** • Ясной ночью небо можно рассматривать как поверхность, температура которой ниже точки замерзания воды. В течение ночи происходит обмен инфракрасным излучением между этой поверхностью и водой. Вода, температура которой выше точки замерзания, отдает больше тепла, чем поглощает, и поэтому остывает. Если температура окружающего воду воздуха лишь слегка превышает температуру замерзания, воздух

не сумеет ее согреть, и вода может отдать столько тепла, что она замерзнет. Миску надо изолировать от земли, иначе в результате теплопроводности земля передаст воде тепло, которое может помешать замерзанию.

#### 4.14 • КАК СПАСТИ ЗАГОТОВЛЕННЫЕ НА ЗИМУ ОВОЩИ С ПОМОЩЬЮ БОЧКИ С ВОДОЙ

Моя бабушка, жившая в Техасе, боялась, что во время холодных зимних ночей замерзнут и лопнут хранящиеся в погребе банки с ее домашними заготовками. Чтобы не допустить этого, бабушка наливала воду в большую, стоявшую в погребе бочку. Как это помогало спасти ее банки?

**ОТВЕТ** • Большое количество воды не допустит понижения температуры в погребе ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , то есть ниже температуры замерзания воды. При замерзании воды выделяется большое количество энергии, поддерживающее температуру в погребе в районе  $0^{\circ}\text{C}$ . Содержимое банок не замерзает, поскольку точка замерзания хранящихся в них смесей разных жидкостей несколько ниже точки замерзания чистой воды. Температура в погребе может опуститься ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , но это угрожает банкам, только если замерзнет вся вода в бочке. Однако маловероятно, что подобное может произойти за одну ночь. Такие же меры предосторожности помогают автолюбителю при внезапном похолодании, если антифриза недостаточно, чтобы предохранить радиатор машины от замерзания. Если в закрытом на ночь гараже оставить бочку с водой, радиатор не замерзнет.

#### 4.15 • ЧТОБЫ ФРУКТОВЫЙ САД НЕ ВЫМЕРЗ, ЕГО НУЖНО ПОЛИТЬ

Во Флориде, когда заморозки (температура ниже  $-2^{\circ}\text{C}$ ) угрожают фруктовым садам, деревья поливают водой, которая, замерзая, образует на них тонкий слой льда. Как подобная процедура может их спасти?

**ОТВЕТ** • Защита не связана с тем, что на растениях образуется слой льда. Этот слой не ограждает их от влияния холодного воздуха. Защищают их метаморфозы, происходящие с попавшей на них водой. Вода охлаждается до температуры замерзания, а потом превращается в лед. Переход из жидкого состояния в твердое идет с выделением тепла. Выделившаяся энергия передается растениям и воздуху, что позволяет температуре в саду держаться между  $-2^{\circ}\text{C}$  и  $0^{\circ}\text{C}$ , а этого достаточно, чтобы растения выжили.

Поливать сад можно не всегда: при заметном ветре или низкой влажности воздуха полив быстро приведет к гибели растений. Дело в том, что вода испаряется из летящих по воздуху капель. Испарение требует больших затрат энергии, а значит, температура воды падает до точки замерзания (или даже ниже, если вода в каплях находится в переохлажденном состоянии) еще до того, как капля достигнет растения. В полете капля может частично замерзнуть или замерзнуть сразу, попав на растение. В обоих случаях растениям передается гораздо меньше энергии, температура в саду падает ниже  $-2^{\circ}\text{C}$ , а растения погибают.

Глядя на лед в саду, садовод может определить, поможет или повредит полив растениям. Если поливать можно, капли воды, не замерзая, растекаются по растению, и образуется слой прозрачного льда. Если же поливать нельзя, на растение попадают частично замерзшие капли, которые затем по одной превращаются в лед. На растениях образуется белый, непрозрачный лед, поскольку свет рассеивается на всех границах отдельных замерзших капель. Нужно ли говорить, что когда заморозки угрожают их садам, садоводы проводят бессонные ночи, наблюдая за термометром и прозрачностью льда.

#### 4.16 • ЧТО БУДЕТ, ЕСЛИ В СИЛЬНЫЙ МОРОЗ ПЛЕСНУТЬ ВВЕРХ ГОРЯЧЕЙ ВОДОЙ?

В Антарктике у зимовщиков появилось новое развлечение: когда температура воздуха опускается до  $-40^{\circ}\text{C}$  или ниже, они на улице выплескивают, направляя вверх, кипящую воду. Почему вода «ревет», будто протестуя против такого холода? Почему при дыхании на холоде раздается позвякивание?

**ОТВЕТ •** Когда при резком движении вода попадает в воздух, она разлетается на капли. В очень холодном воздухе во время полета капли замерзают и разламываются, потому что при быстром замерзании возникают сильные механические напряжения. Шум, созданный разламывающимися каплями, и есть тот «рев», который слышат полярники. Дыхание на холодном воздухе может «звенеть», поскольку замерзают капельки воды, попадающие в воздух при выдохе. Я, правда, не знаю, появляется ли звук из-за того, что капельки разламываются, или от удара о землю.

#### 4.17 • СОСУЛЬКИ

Почему сосульки имеют коническую форму, а ширина кончика сосульки всего несколько миллиметров?

Почему по центру активной (растущей) сосульки поднимается вверх узкий столбик жидкости (рис. 4.3)? При каких условиях вода там замерзает и как такое возможно, учитывая, что она локализована в центре сосульки? Почему вдоль центральной оси сосульки тянется белая линия? Почему по бокам сосульки образуются горизонтальные выступы? Почему некоторые части сосульки твердые, а некоторые настолько ноздреватые, что их легко проткнуть перочинным ножом? Почему некоторые сосульки изгибаются или закручиваются?

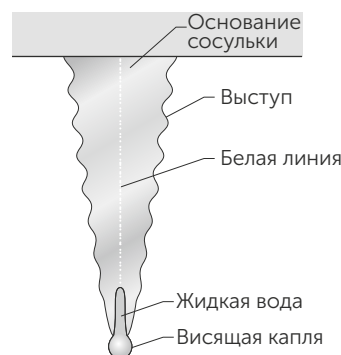


Рисунок 4.3 / Задача 4.17. Структура сосульки.

**ОТВЕТ •** Про сосульки можно задать много вопросов, начинающихся со слова «почему». Удивительно, но до сих пор не на все из них удалось получить ответы. Ниже я расскажу то, в чем сумел разобраться сам.

Сосулька начинает формироваться тогда, когда вода, просачиваясь откуда-то сверху, например из водосточного желоба на крыше, образует висящую каплю. Капля может полностью замерзнуть, а может замерзнуть только ее поверхность. Тогда образуется тонкая оболочка, внутри которой остается жидкость. Вода продолжает поступать, и вся эта структура удлиняется и утолщается.

Жидкость удерживается в ледяной оболочке поверхностным натяжением, то есть в результате действия сил притяжения между молекулами воды. Она превратится в лед, только если выделяющееся при замерзании тепло отводится вверх по сосулке к ее основанию (вершине сосульки). Тепло не может отводиться через оболочку в горизонтальном направлении, если с обеих сторон оболочки (со стороны жидкости и со стороны воздуха) температура одинакова и равна температуре замерзания воды. Если нет разности температур, тепло сквозь оболочку отводиться не может.

Когда вода внутри оболочки замерзает, растворенный в ней воздух выходит и образует пузырьки, которые затем вмораживаются в лед на центральной оси сосульки,

там, где только что замерзла вода. Эти «осиротевшие» пузыри, рассеивая солнечный свет, видны нам в виде белой линии вдоль оси сосульки.

Сначала выступы — «ребра» сбоку сосульки — возникают, вероятно, из-за случайного нарушения регулярности при стекании воды по ее бокам. Раз образовавшись, ребра утолщаются быстрее, чем промежутки между ними. На то есть две причины. Выступ покрыт более тонким слоем льда, чем прилегающий к нему участок; он дальше выдается вперед и больше подвергается воздействию холодного воздуха. Благодаря этому вода на выступе замерзает быстрее, чем на плоском участке рядом с ним. Часто на плоских участках образуется рыхлая структура из воды и льда, в которую можно воткнуть лезвие ножа.

Если слой воды, покрывающий сосульку, начинает замерзать (похолодало, перестала поступать вода сверху), первой замерзает его внешняя поверхность, «запирая» оставшуюся жидкость под ледяной коркой. При замерзании вода должна расширяться. В результате такого расширения вода пробивается в разных местах через ледяную корку на сосулке и замерзает, образуя острые короткие шипы.

Если во время роста сосульки дует порывистый ветер, под его порывами она изгибается и скручивается. Если сосулька растет на ветке, постепенно прогибающейся под ее весом, сосулька в конце концов может изогнуться и значительно отклониться от вертикали. Метель и неравномерное таяние на солнце тоже приводят к отклонению формы растущей сосульки от идеальной.

Если под ледяным дождем сосульки образуются на бельевой веревке, телефонной линии или линии электропередачи, часто расстояния между ними составляют порядка нескольких сантиметров и примерно одинаковы. По-видимому, такая периодическая структура возникает из-за того, что воде, покрывающей поверхность ровным слоем в начале дождя, энергетически выгодно уменьшить площадь своей поверхности и разбиться на капли. Этот процесс запускает случайная волна, а поверхностное натяжение довершает его, собирая воду в капли. Расстояние между сосульками примерно равно длине волны такого случайного возмущения. Затем из капель вырастают сосульки.

#### 4.18 • ЛЕДЯНОЙ ЗАТОР НА КРЫШЕ

В холодном климате на карнизах крыш часто образуются ледяные заторы — там скапливается вода, которая не имеет возможности стекать вниз. Почему

образуются ледяные заторы и почему скопившаяся вода наносит существенный урон зданию изнутри? Почему часто на таких зданиях образуются гигантские сосульки?

**ОТВЕТ •** Ледяные заторы образуются над чердаками на скатах крыш, которые нагреваются за счет теплоотдачи от расположенных под ними помещений. Чердак может стать причиной таяния снега и льда на крыше. Если талая вода тонкой струйкой течет вниз к холодному водосточному желобу, она не стекает с крыши, а замерзает на желобе, и вдоль крыши нарастает лед. Но если талую воду задерживает ледяной затор, вода поднимается вверх по черепице, а затем протекает вниз через находящийся под ней деревянный, не защищенный от протечек слой. Просачиваясь через потолок или вдоль стен, вода приведет в негодность штукатурку, обои и электропроводку.

Часто на крышах, где возникают ледяные заторы, вырастают гигантские сосульки. Затор не всегда задерживает воду, и она потихоньку стекает по образовавшимся раньше сосулькам, длина и вес которых увеличиваются по мере того, как на них замерзает вода.

Похоже, при образовании заторов и гигантских сосулек яркое солнце не играет существенной роли. Чтобы избавиться от них, в крышах делают вентиляционные отверстия, позволяющие холодному воздуху попадать на чердак. Поскольку в таком случае чердак не нагревается, таяния снега на крыше не происходит и вода не стекает к холодному водостоку.

#### 4.19 • ИНЕЙ И НАЛЕДЬ НА ПРОВОДАХ

Когда снег и лед налипают на проводах линий электропередачи, дополнительный вес может привести к разрыву проводов и разрушению опорных конструкций. В январе 1998 года именно это произошло в Южном Квебеке, где в результате обледенения рухнули 1300 основных и 35 000 вспомогательных опор линий электропередачи и около двух миллионов пользователей оставались без электричества на срок от нескольких дней до нескольких недель. При каких условиях снег и лед налипают на провода? В частности, возрастает ли угроза такого развития событий в очень холодную погоду?

**ОТВЕТ •** Капли воды в воздухе и снег могут образовывать на проводах лед двух типов: иней, не содержащий воды (попавшие на провод капли воды замерзают), и наледь — слой воды и льда с выступившей поверх



него водой. Граница, на которой происходит образование льда, движется через жидкость к поверхности, когда лед прорастает в жидкость в форме дендритов — кристаллов с древовидной, ветвящейся структурой. Через верхний слой тепло, выделившееся при замерзании льда, уходит в наружный холодный воздух.

Если образуется наледь, вода может стекать с проводов, что уменьшает их вес и опасность обрыва. Но одновременно с этим возможно образование сосулек. Такие сосульки расположены на расстоянии друг от друга в несколько сантиметров. По мере того как вода по ним стекает и замерзает, они растут и вниз, и вширь. Иногда бывает, что такие сосульки сливаются, образуя ледяной занавес. Не только вес сосулек представляет угрозу проводам и опорам, они к тому же лучше удерживают капли воды и снег. При крепком ветре аэродинамическое сопротивление сосулек может значительно увеличить действующую на провода силу.

Вероятно, обледенение проводов особенно опасно, если температура всего на несколько градусов ниже точки замерзания, когда возможно образование наледи. В этом случае, попав на провод, капли воды из воздуха и снег, скорее всего, не отскочат в сторону, что произошло бы при образовании на проводах инея, а налипнут на провод. Таким образом, если температура воздуха повышается, например при наступлении утра, иней на проводах становится опасным, поскольку может превратиться в наледь, задерживая капли воды и снег на проводах.

#### 4.20 • ЛЕДЯНЫЕ ШИПЫ И ДРУГИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗО ЛЬДА

Почему у большинства замороженных в формочках кубиков льда в центре есть округлый бугорок? Почему из некоторых кубиков льда растут вверх ледяные шипы? Иногда холодной зимой можно увидеть совершенно невероятные ледяные шипы, растущие во дворе из купален для птиц и других небольших емкостей с водой.

Почему с обратной стороны льда на луже иногда образуются несколько рубчиков в форме колец? Как на некоторых реках образуются крутящиеся ледяные диски, отделенные узкой щелью от остального льда? Такие диски примерно 50 м в диаметре существуют месяцами и совершают полный оборот примерно за полтора часа. Почему на ледяном покрове некоторых рек образуются длинные трещины, напоминающие синусоиду? Почему иногда лед на поверхности некоторых озер, прудов

и даже кубиков льда не плоский, а со складками, хотя за все время замерзания ветра не было?

**ОТВЕТ •** Когда из молекул воды образуется кристалл льда, вода расширяется. Если лед растет в формочке, вода может увеличивать свой объем, только продвигаясь вверх. В середине кубика льда вода замерзает последней, поэтому расширяющиеся области с краев гонят воду к центру и вверх.

Такой процесс может привести к образованию ледяных шипов, если сначала на поверхности воды образуется тонкий слой льда, а затем расширяющаяся вода взламывает этот слой, выталкивая оставшуюся жидкую воду в центре через этот пролом (рис. 4.4). В результате оболочка растет вверх. Когда вся вода замерзает, оболочка превращается в твердый, направленный вверх шип. Подобные шипы встречаются редко, поскольку возможность их образования определяется соотношением скорости выдавливания жидкости вверх через трещину в оболочке и скоростью замерзания остающейся в кубике льда воды.

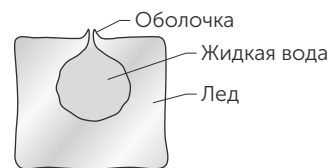


Рис. 4.4 / Задача 4.20. Ранняя стадия образования ледяного шипа.

Складки в форме колец, образующиеся на поверхности льда при замерзании лужи, связаны с циклическим замерзанием при просачивании воды из-под льда. Сначала, когда лужа только начинает замерзать, она покрывается от края до края тонким слоем льда. Затем снизу на поверхность льда через трещины просачивается вода, а по внешнему краю под лед просачивается воздух. В какой-то момент поступление воды замедляется или совсем останавливается. Подо льдом, недалеко от края лужи, там, где холодный воздух встречается с водой, вода замерзает, и образуется направленная вниз складка. Затем вода опять начинает интенсивно просачиваться, на поверхность попадает больше воды, изолируя эту складку. Если просачивание опять замедлится или остановится, ближе к центру лужи образуется еще одна складка. До того, как вся вода из лужи просочится на ее покрытую льдом поверхность и замерзнет, может образоваться несколько подобных складок.



Иногда зимой на реках, там, где есть водовороты, образуются диски больших размеров. Если образовавшиеся выше по течению льдины попадают в водоворот, они постепенно объединяются в одну большую льдину, которую раскручивает вращающаяся вода. Когда вся остальная река застывает, вращение не дает замерзнуть воде на границе между этой льдиной и остальным ледяным покровом реки, а трение между ней и льдом вокруг постепенно сглаживает края льдины, превращая ее в круглый диск. Раскручивание может возникать, в частности, потому, что скорость течения у берегов меньше, чем вдали от них.

Когда на ледяное покрытие водоема действуют разнонаправленные силы (такое бывает, если, например, лед, под которым продолжает течь вода, примерзает к скале) изначально прямолинейная трещина, распространяясь по льду, меняет форму и становится волнообразной. Такие трещины иногда возникают на стеклянной пластинке, если ее пронести над нагревателем, что приводит к появлению в пластинке растягивающих напряжений. В зависимости от скорости движения пластинки трещина может быть прямой (малая скорость), волнистой (средняя скорость), либо трещина делится на две или четыре трещины (большая скорость).

При замерзании вода образует гексагональный кристалл. Ось, проходящую через центр кристалла перпендикулярно двум граням шестигранника, обозначают буквой *c*. Наиболее быстро кристалл растет параллельно граням шестигранника, в так называемых *базисных плоскостях*. Предположим, что кристалл начал расти, когда ось *c* направлена по вертикали, а базисная плоскость горизонтальна. Тогда кристалл растет в горизонтальной плоскости и поверхность льда остается плоской. Если же кристалл льда начал расти, когда ось *c* была направлена не вертикально, то он образует гребень на поверхности. Если несколько соседних кристаллов ориентированы подобным образом, на поверхности льда образуется несколько гребней.

#### 4.21 • МУТНЫЕ КУБИКИ ЛЬДА

Почему кубики льда мутные и есть ли способ сделать их прозрачными?

**ОТВЕТ •** Лед выглядит мутным, поскольку свет рассеивается на структурных несовершенствах и вкраплениях, имеющихся внутри льда. Некоторые вкрапления могут накапливаться в процессе замерзания. Например, в процессе замерзания примеси вблизи границы

раздела между льдом и водой вытесняются в жидкость, а растворенный в воде воздух образует пузырьки. При дальнейшем замерзании в эти пузырьки попадает все больше воздуха. Пузырьки удлиняются, и постепенно их окружает лед. Таким образом, в направлении к центру возникают длинные *канальчики* (пустоты).

Граница раздела между водой и льдом может продвигаться, только если тепло отводится от нее к поверхности кубика, где оно уносится холодным воздухом. При продвижении границы раздела возрастает расстояние, необходимое для того, чтобы отвести тепло, и движение границы замедляется. Поэтому обычно вблизи центра ледяного кубика (где продвижение границы идет медленно) образовавшиеся пустые канальчики шире, чем у поверхности формочки (где граница движется быстро). Кроме того, радиус некоторых канальчиков непостоянен: он зависит от колебаний температуры в холодильнике. Форма воздушных пузырьков в замороженной соленой морской воде может быть более сложной, чем у льда из водопроводной воды. При идеальных условиях в «соленом» льде пузырьки могут образовывать крошечные спирали или располагаться зигзагом.

Чтобы лед был прозрачным, можно использовать дистиллированную воду, в которой меньше примесей. И ее надо кипятить примерно 15 минут, чтобы избавиться от большей части растворенного воздуха.

#### 4.22 • ФИГУРЫ ВНУТРИ ТАЮЩЕГО ЛЬДА

Почему, если лед (обычный кубик льда из холодильника или лед, образовавшийся в естественных условиях) поместить на яркое солнце или под инфракрасную лампу, внутри становятся видны небольшие геометрические фигуры? Джон Тиндаль, наблюдавший это явление в 1858 году, назвал их *жидкими цветами*, но теперь их обычно называют *фигурами Тиндаля*. Фигуры Тиндаля можно видеть невооруженным глазом, но, чтобы разглядеть детали, лучше воспользоваться лупой. Некоторые из фигур Тиндаля имеют гексагональную или простую овальную форму, другие напоминают листья папоротника.

**ОТВЕТ •** Появление фигур связано с проникновением в кристалл льда и поглощением им инфракрасного излучения солнечного света или лампы. В основном это излучение поглощается дефектами кристаллической структуры, то есть примесями, нарушениями в расположении атомов, границами между разными

кристалликами льда, образовавшимися при замерзании. При поглощении инфракрасного излучения часть льда тает, образуя полости (вода плотнее льда), и испаряется в них. Это и есть фигуры Тиндаля, которые видны по контрасту с остальным льдом. Некоторые полости заполнены только водяным паром, другие содержат и жидкую воду, и пар. При интенсивном освещении, когда процессы таяния и испарения идут быстро, образуются ветвящиеся полости в форме листьев папоротника. Гексагональные полости появляются при не слишком сильном освещении. Овалы, наполненные водой, образуются из трещин, сжатых с противоположных сторон льдом. Вначале, как только инфракрасные лучи попадают на лед, может сразу появиться много фигур Тиндаля. Вероятно, это связано с тем, что при их образовании происходит снятие напряжений внутри льда.

#### 4.23 • ЗАМЕРЗАНИЕ ПРУДОВ И ОЗЕР

Почему в местах с холодными зимами пруды, озера и другие водоемы начинают замерзать с поверхности воды? Если бы лед образовывался сначала на дне, живые организмы в этих водоемах, вероятно, не могли бы существовать. Что приводит к появлению на поверхности некоторых замерзших прудов и озер удивительных радиальных структур, напоминающих изогнутые спицы колеса или лепестки цветка?

**ОТВЕТ •** Вода в озере, охлаждающаяся, скажем, с 10 °С и до точки замерзания, постепенно становится плотнее воды ближе ко дну и тонет. Однако, когда температура опускается ниже 4 °С, дальнейшее охлаждение воды на поверхности приводит к уменьшению плотности воды в верхних слоях, которая теперь не тонет, а вплоть до замерзания остается наверху. Затем озеро начинает промерзать дальше. Однако для замерзания необходим отвод выделяющегося тепла от жидкой воды через слой льда. Когда толщина слоя льда увеличивается, замерзание замедляется или вообще останавливается. Говорят, что замерзание озера — *самоограничивающийся процесс*, то есть процесс, который сам останавливается. Таким образом, скорее всего, озеро до дна не промерзнет, и потому жизнь в нем сохранится.

Если бы озеро начинало замерзать со дна, не всегда лед, покрытый сверху водой, успевал бы растаять за лето. И тогда, по прошествии нескольких лет, многие открытые водоемы в странах с холодным климатом оставались бы замерзшими круглый год.

При любой температуре структура жидкой воды неоднородна: молекулы воды образуют кластеры, которые легко разрушаются и образуются вновь. Когда температура опускается ниже 4 °С и до точки замерзания, кластеры увеличиваются в объеме, требуют больше места и существуют дольше. Это не относится к морской воде при солёности больше 2,5 г на 1 кг воды (такова вода в океанах и многих морях): ее плотность непрерывно увеличивается при остывании до точки замерзания и начинает уменьшаться только после образования льда.

Днем вода в озере, находящаяся сразу под тонким льдом, может прогреться до 4 °С. При такой температуре вода опускается на глубину озера, а более легкая, теплая вода поднимается на ее место. Подобное перемешивание воды в зимнее время необходимо для некоторых форм водной флоры и фауны.

Если снег падает на пруд, по которому плавают льдины, под его весом одна из льдин может частично погрузиться под воду, так что ее начнет заливать вода, поступающая либо с краев, либо через имеющиеся в льдине отверстия. Поскольку температура воды выше точки замерзания, вода растапливает снег, проделывая в нем каналы. Вытекая из образовавшихся отверстий, вода растекается в радиальном направлении по различным, вероятно, изогнутым траекториям. Если затем температура понижается и погода становится пасмурной, эти ручьи воды замерзают, образуя завораживающие узоры в виде изогнутых лучей или лепестков цветка.

#### 4.24 • КАК ЗАМЕРЗАЮТ ГАЗИРОВАННЫЕ НАПИТКИ

Почему, когда бутылку с газированной водой слишком долго держат в морозильнике, она лопается? Почему, если бутылку продержать в морозильнике не так долго, вода в ней может неожиданно замерзнуть, когда бутылку откроют? Почему если газированная вода холодная (но ее температура далека от точки замерзания), то, когда бутылку открывают, из горлышка, кроме мелких брызг, вырывается небольшое туманное облачко?

**ОТВЕТ •** Газированный напиток состоит главным образом из воды. Когда вода замерзает, она расширяется, а молекулы воды упорядочиваются, образуя жесткую структуру. Таким образом, когда напиток охлажден настолько, что вода начинает замерзать, в бутылке возникает направленное вовне избыточное давление, которое может ее разорвать. Температура замерзания

напитка в бутылке ниже точки замерзания чистой воды. Это связано с тем, что жидкость находится под давлением и, кроме того, некоторые добавки затрудняют образование льда из молекул воды. Однако в большинстве морозильных камер достаточно холодно, чтобы бутылка лопнула.

Когда бутылку открывают, давление в ней резко падает до атмосферного, и большая часть углекислого газа выходит из раствора в виде поднимающихся вверх пузырьков. Предположим, что температура жидкости чуть выше температуры замерзания напитка в бутылке. Когда давление падает, температура замерзания повышается, и температура жидкости оказывается *ниже* этой новой точки замерзания, и, следовательно, жидкость должна превратиться в лед. Однако для этого необходимы *центры кристаллизации*, где могут начать формироваться кристаллики льда. Их роль могут играть пузырьки углекислого газа. Если бутылка прозрачная, можно видеть, что замерзание начинается вблизи горлышка бутылки, где много пузырьков, а потом, иногда очень быстро, распространяется вниз.

Когда открывают бутылку охлажденного газированного напитка, на расширение выходящего через горлышко бутылки газа требуется энергия. Расширение происходит так быстро, что единственный источник энергии — тепловая энергия газа. Таким образом, газ, теряя тепловую энергию, охлаждается, благодаря чему водяной пар в расширяющемся газе превращается в капельки воды. Эти движущиеся в воздухе капельки и являются тем небольшим туманным облачком, которое мы видим над горлышком бутылки.

#### 4.25 • ЛОПАЮЩИЕСЯ ТРУБЫ

Почему в холодные зимы в домах лопаются водопроводные трубы? Почему чаще лопаются трубы, по которым течет горячая вода?

**ОТВЕТ •** При постоянной системе водоснабжения трубы рвутся, когда образовавшийся лед закупорит воду в перекрытом вентилем звене трубы. Если лед продолжает намерзать на такую пробку, замерзающая вода расширяется, и закупоренная в звене трубы вода оказывается под давлением. Постепенно давление возрастает настолько, что труба разрывается. Вероятность такого происшествия больше в трубе с горячей водой. Это связано с тем, как в трубе замерзает вода. Теоретически вода замерзает при  $0^\circ\text{C}$ , но на практике, чтобы вода замерзла, ее температура должна быть

на несколько градусов ниже. Такая жидкость называется *переохлажденной*.

Холодная вода из-под крана содержит большое число примесей, которые могут служить центрами зародышеобразования. Если вода переохлаждена на несколько градусов, при дальнейшем отводе тепла начинают образовываться кристаллики льда. Сначала образуется напоминающий листья папоротника дендритный лед, растущий в неподвижной воде. После образования льда внутри на стенке трубы образуется ледяное кольцо, постепенно растущее вдоль радиуса внутрь трубы до тех пор, пока ледяная пробка не запрет окончательно трубу. У воды, остающейся между нарастающим льдом и закрытым вентилем, достаточно времени, чтобы сгравировать давление, обусловленное расширением воды во время роста ледяного кольца.

Горячая вода в трубе замерзает сходным образом, однако образование дендритного льда происходит существенно позже, иногда на несколько дней позже, чем в трубе с холодной водой. Дело в том, что при нагревании из воды удаляются многие примеси, которые могли бы служить центрами зародышеобразования при замерзании. Поэтому горячую воду в трубе можно переохладить до существенно более низкой температуры, чем холодную воду. Когда же наконец вода начинает замерзать, дендритный лед, прорастая вдоль радиуса внутрь трубы, быстро запирает ее. Если затем лед продолжает расти внутри трубы, расширяющаяся при замерзании вода между ледяной пробкой и вентилем оказывается под очень большим давлением. В итоге где-то между пробкой и вентилем труба или сочленение труб лопается, хотя сама труба в этом месте может даже оставаться теплой.

Разрыв позволяет вытечь воде, зажатой на этом участке, что само по себе не обязательно приведет к большим неприятностям. Однако, если его не заделать до того, как ледяная пробка растает, последствия могут оказаться значительными. Чтобы этого избежать, жители стран с очень холодным климатом часто зимой оставляют краны чуть приоткрытыми, чтобы при росте ледяной пробки вода просто вытекала через открытый кран, не приводя к росту давления.

В некоторых ситуациях ледяная пробка может оказаться полезной. Например, она может сыграть роль временного вентиля на нуждающемся в починке участке трубы, который починить надо, но всю систему, как, например, в больнице или в жилом районе, отключить от водоснабжения нельзя.

Иногда требуется пустить воду по холодной трубе, из которой раньше воду слили (например, чтобы починить). Проходя через трубу, первая порция воды может отдать тепло стенкам трубы и охладиться до температуры замерзания. Более вероятно, что это произойдет, если труба закопана в землю, а не проложена поверху: от стенок трубы, окруженной землей, тепло отводится быстрее, чем если трубу окружает воздух. Если температура стенок трубы всего на несколько градусов ниже точки замерзания, вода может переохладиться, а затем быстро появится дендритный лед, который перекроет трубу. Однако если труба существенно холоднее (ниже допустимого значения температуры переохлаждения воды), роста дендритного льда не происходит. На стенках трубы образуется ледяное кольцо, но вода продолжает течь.

#### 4.26 • ЧТО БУДЕТ, ЕСЛИ ДОТРОНУТЬСЯ ИЛИ ЛИЗНУТЬ ХОЛОДНУЮ ТРУБУ?

Почему, когда вы дотрагиваетесь до холодной деревянной палки или холодной металлической трубы той же температуры, труба кажется холоднее? Почему рука может прилипнуть к трубе? В фильме «Рождественская история» один из детей решается лизнуть холодную трубу. И убеждается в том, что язык к трубе примерзает. Это правило следует хорошенько запомнить: нельзя лизать холодную трубу. И вообще холодный металл.

**ОТВЕТ •** Ощущение холода, которое вызывает у нас тот или иной предмет, во многом определяется скоростью, с которой тепло передается от пальцев этому предмету. Металл проводит тепло гораздо лучше дерева, поэтому при одной и той же температуре металл кажется холоднее.

Палец прилипает к холодному металлу, поскольку имеющаяся на коже жидкость попадает на холодную поверхность, быстро отводящую тепло, и мгновенно замерзает. Язык влажнее пальцев, и поэтому он примерзает еще сильнее. Если полить водой пальцы, прилипшие к металлу, лед растает, пальцы или язык будут спасены.

#### 4.27 • УХАБЫ ЗИМОЙ И ПИНГО В ЗОНАХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Почему холодной зимой почва вздыбливается и образуются ухабы? Этот эффект называется *пучение при замерзании*. Такие ухабы не только могут повредить мостовую, но и представляют опасность для автомобилистов,двигающихся на высокой скорости. Можно

предположить, что пучение — просто результат расширения воды при замерзании, но, поскольку увеличение объема в этом случае только около 10%, это как будто не может объяснить образование больших ухабов.

Почему при холодной погоде разрушаются скалы? Необходимы ли несколько последовательных циклов замерзания-таяния, чтобы скала разрушилась?

В чем причина образования *пинго* — конических холмов в зонах вечной мерзлоты? Некоторые пинго очень большие: их высота достигает 40 м, а диаметр — 200 м.

**ОТВЕТ •** Когда температура верхнего слоя почвы (или слоя почвы сразу под полотном дороги) опускается ниже точки замерзания, какая-то часть воды в порах между частицами почвы замерзает и расширяется. Так при замерзании начинают образовываться ухабы (происходит *первичное пучение*). При уменьшении количества жидкости уменьшается и давление оставшейся жидкости. Жидкая вода несколько ниже верхнего слоя почвы находится под большим давлением, и поэтому она начинает подниматься вверх к замерзшему слою. Прибывающая жидкость тоже замерзает и расширяется, что приводит к *вторичному пучению*. Ухабы при вторичном морозном пучении значительно выше, и на состояние дорог они влияют гораздо сильнее.

Во многом разрушение дорог связано с таянием льда на них и под ними. При таянии гравий под полотном дороги насыщается водой. Когда легковая машина (или, хуже того, тяжелый грузовик) едет по дороге, ее вес существенно увеличивает давление в воде, так что она поднимается вверх непосредственно под покрытие дороги. Для того чтобы сломать мостовую, этого давления может оказаться достаточно. Идущие следом машины еще больше разбивают покрытие, образуются выбоины, постепенно становящиеся все более глубокими. Под действием веса машин на дорогах с тонким или слабым покрытием образуются канавы и ямы. При езде по такой дороге машины трясут. Каждый раз, когда автомобиль надавливает на покрытие такой дороги, он способствует образованию нового углубления. Через какое-то время дорога будет напоминать старую волнистую стиральную доску, о которую когда-то терли белье при стирке.

Для дорог мягкие зимы опаснее суровых и холодных: при теплой погоде вода успевает подняться к покрытию дороги, а сильный мороз сковывает воду, и она долгое время никуда не перемещается. Повреждения дороги более значительны не тогда, когда держится



сильный мороз, а когда цикл замерзания-таяния повторяется многократно.

Вода, замерзающая в расщелине скалы, расширяется, и расщелина одновременно и удлиняется, и расширяется. Размеры расщелины увеличиваются еще больше, если при замерзании в нее продолжает поступать вода. Однако при достаточно низкой температуре приток воды в трещину затруднен, поэтому быстрее всего скала разрушается, когда температура близка к точке замерзания. В большей мере растрескиванию подвержены осадочные горные породы, и в этом случае необходимости в повторении циклов замерзания-таяния нет. Раскалывание кристаллических горных пород — процесс гораздо более сложный, требующий, чтобы температура долго держалась ниже точки замерзания и вода поступала в трещину достаточно часто или непрерывно.

Пинго бывают по меньшей мере двух типов, и есть по крайней мере два механизма их образования. Бывают так называемые *гидролакколиты* — отдельные холмы, образовавшиеся при промерзании на месте выхода подземного источника, на дне озерной впадины или заболоченного понижения. Под дном озера может залежать полужидкий слой, со всех сторон, кроме верхней, окруженный вечной мерзлотой. Когда из озера уходит вода, уровень вечной мерзлоты начинает подходить к поверхности дна озера. Почва промерзает с боков и снизу, вода выдавливается и собирается в центре бывшего озера. Так поднимаются вверх холмы пинго, внутри которых при замерзании воды образуется ледяное ядро.

*Мерзлотные бугры на склонах* обычно образуются группами в результате *гидравлического напора* подземных вод, поступающих со склонов речных долин и соседних гор. Не до конца понятен механизм, заставляющий воду внутри холма подниматься вверх. Поднявшаяся вода замерзает и расширяется. Если почва в основании холма пористая, вода может подниматься вверх за счет капиллярных сил, то есть поверхностного натяжения. Это означает, что молекулярные силы, обеспечивающие сцепление воды с материалом поры, могут поднять вверх жидкость через небольшие пустоты в грунте. Однако иногда мерзлотные бугры на склонах встречаются и там, где пор в грунте нет.

#### 4.28 • МЕРЗЛОТНЫЕ ПОЛИГОНЫ В АРКТИКЕ

Почему в некоторых местах Арктической низменности (*низменность* на севере Аляски, у побережья Северного Ледовитого океана) и в некоторых районах субарктической тундры земля покрыта мерзлотными

полигонами — огромными многоугольниками из льда? Ледяные блоки уходят на несколько метров под землю, а их ширина достигает ста метров.

**ОТВЕТ •** Когда температура почвы опускается ниже точки замерзания, поверхностные слои почвы уплотняются и проседают, за счет чего на поверхности возникают напряжения. В некоторых местах эти напряжения могут быть настолько велики, что земля, как высыхающая лужа грязи, растрескивается. Со временем трещина в земле растет и вертикально вниз, и, даже существенно интенсивнее, в горизонтальном направлении. Она сама является источником напряжений, раздвигающих грунт. Когда трещина приближается к уже существующей трещине, под действием этих напряжений она поворачивается и пересекается со старой трещиной под углом, близким к прямому. Если несколько трещин пересекаются друг с другом, образуются многоугольники.

Когда трещина образовалась, в нее набивается снег или ее покрывает изморозь, а иногда в трещину попадает талая вода, которая потом замерзает. Так формируются границы ледяных клиньев, из которых затем складываются многоугольники. Похожие многоугольники видны и на поверхности Марса, но там трещины заполнены песком, а не снегом или льдом. Эти гигантские полигоны образовались, вероятно, благодаря другим механизмам. Когда мы туда попадем, мы узнаем каким.

#### 4.29 • КАМНИ, РАСТУЩИЕ В САДУ, И УЗОРЫ НА ЗЕМЛЕ

Почему зимой в местах с холодным климатом из земли «вырастают» камни? В некоторых районах, например в Новой Англии на северо-востоке США, «урожай камней» столь обилен, что их собирают и строят из них каменные заборы.

Почему кое-где «выбравшиеся» из-под земли камни образуют узоры в виде кругов, многоугольников и полос? Иногда эти узоры велики и столь упорядочены, что выглядят искусственными. Например, на норвежском острове Шпицберген можно видеть поражающие воображение каменные круги, внутри которых камней нет. Что является причиной образования этих различных по форме массивов камней?

**ОТВЕТ •** Появление камней на поверхности связано с выпучиванием на морозе, о котором говорилось выше. В начале зимы граница промерзания, глубина,



на которой температура равна 0 °С, постепенно опускается. Если на ее пути оказывается камень, это место она проходит быстрее, чем окружающую его почву. Это связано с тем, что у камня теплопроводность выше, кроме того, в почве имеется вода, которая при замерзании выделяет тепло. Когда граница промерзания опускается ниже камня, к нему примерзает вода из окружающей его снизу и с боков еще не замерзшей почвы. «Лишняя» вода, замерзая, расширяется и толкает камень вверх. Всякий раз, когда камень продвигается вверх, под него понемногу подсыпается почва, укрепляя его в новом положении, так что позже, когда лед растает, опуститься камень не может. После нескольких циклов замерзания-таяния камень достигает поверхности земли, и, возможно, там он пригодится кому-то для забора.

Мигрирующие вверх камни были обнаружены в вертикальных разрезах песчаного дна высохших в незапамятные времена рек. Вдоль стенок таких разрезов камни встречались на разной высоте. Над камнем песок был плотнее, а под камнем был замечен след, вероятно, отмечавший его путь наверх: камень поднимался, а песок заполнял пустоты.

Узоры из камней своим появлением обязаны выпучиванию на морозе, происходившему с завидным постоянством в течение веков. Когда камни выталкиваются из земли, они влияют на скорость, с которой граница промерзания под ними опускается, а это, в свою очередь, влияет на то, как движутся вверх другие камни. При образовании холма выпучивания (*пинго*) вдоль его склонов случаются обвалы, приводящие к скоплению камней. Другие камни скатываются с уже образовавшихся выступов из камней, удлиняя их. Когда камней очень много, из них формируются круги, многоугольники или лабиринты; если камней не так много, появляются каменные острова, а на склонах образуются каменные полосы. Похожие каменные узоры были обнаружены на Марсе. Считается, что это свидетельство существования там подземных вод и чередующихся процессов их замерзания и таяния.

#### 4.30 • БОРОЗДЫ ОТ ВАЛУНОВ

Почему в районах с холодным климатом большие валуны, возвышающиеся на склонах, постепенно сползают вниз? След от такого камня напоминает борозду, оставленную великаном, вспахавшим поле: перед валуном возвышается земляной холм, а позади него большая вмятина.

**ОТВЕТ** • Процессы замерзания и таяния почвы вокруг валуна ослабляют его сцепление с землей. Когда вода в почве (как та, что изначально была вблизи камня, так и та, что поднимается к камню из нижних слоев) замерзает, она расширяется, и валун слегка приподнимается.

Когда земля оттаивает, вода (в почве и талая вода из снега вокруг валуна) размягчает почву. Под действием силы тяжести валун немного смещается вниз по склону. Двигаясь, он толкает перед собой землю, из которой образуется холм, а за собой оставляет глубокий след. Однако сдвинуться валун может только чуть-чуть, поскольку ниже по склону почва не так насыщена водой и не такая мягкая.

#### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

##### 4.31 • БОМБА ИЗ ДОХЛОЙ КОШКИ И ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ПУТЕМ ЗАМОРАЖИВАНИЯ

Когда я только поступил в Массачусетский технологический институт, студенты-старшекурсники рассказывали историю о студенте, назовем его Фредом, который был очень зол на другого студента, пусть он будет Гарри. Однажды, когда Гарри не было дома, Фред пробрался к нему в комнату в общежитии. С собой у него былидохлая кошка и большой бак с жидким азотом. И то и другое он позаимствовал в лаборатории.

Ухватив кошку за хвост, он опустил ее в бак и держал там до тех пор, пока она не охладилась до температуры жидкого азота. Затем он вытащил ее, раскрутил и с силой швырнул в стенку. Кошка разбилась, и ее мелкие кусочки разлетелись по всей комнате, покрыв кровать, стены и потолок. Через несколько минут эти кусочки оттаяли, и комната превратилась в нечто невообразимое. Студенты Массачусетского технологического института вообще славились изощренными проделками, и далеко не всегда их шутки были безобидными. Я надеюсь, что эта история относится к разряду местных легенд, которые распускали студенты старших курсов для устрашения младших.

Нечто похожее описано в рассказе Элизабет Мид-Смит и Роберта Юстейса о тайне запертой комнаты. Рассказ, опубликованный в 1901 году в журнале *The Strand Magazine*, назывался

«Человек, который исчез». Над главным героем, Оскаром Дигби, нависла серьезная опасность: его пригласили на обед некие люди, считавшие, что ему известно, где хранятся несметные сокровища. Полиция, предупрежденная об этой встрече заранее, окружила дом, куда зашел Дигби. Даже мышь не могла проскользнуть через полицейский кордон. В полночь полицейские ворвались в дом и тщательно обыскали его. Но даже разобрав стены, они не обнаружили никаких следов Дигби. Приглушенный стук, который полицейские слышали, ожидая Дигби снаружи, — единственное, чем они располагали для разгадки этого таинственного исчезновения. Что же случилось с Дигби?

Ответ на этот вопрос они получили, когда один из полицейских обнаружил едва заметные следы крови на камнедробилке, стоявшей рядом с большим баком, наполненным сжиженным воздухом. Очевидно, Дигби окунули в бак, заморозили, а потом с помощью машины размололи в порошок, который распылили до прихода полиции. Без тела полицейским только и оставалось, что ужаснуться своей догадке.

#### 4.32 • ФОРМА СНЕЖИНОК

Что определяет форму снежных кристаллов — снежинки?

**ОТВЕТ** • Этот вопрос лишь кажется простым, окончательный ответ на него еще только предстоит получить. Сначала зародыш кристалла образуется на частичке пыли. Молекулы воды постепенно собираются вместе, они сильнее взаимодействуют и образуют гексагональную структуру. Говорят, что такая структура имеет ось симметрии шестого порядка, поскольку кристалл состоит из шести практически идентичных секций, группирующихся (наподобие кусков торта) вокруг центра. По мере роста кристалла новые молекулы мигрируют (диффундируют) по поверхности, пока не пристроятся к нему. Рост кристалла происходит главным образом вдоль его ребер и вершин, поскольку именно здесь кристалл максимально взаимодействует с парами воды в воздухе.

Число способов, которыми новые молекулы могут пристроиться к растущему кристаллу, огромно. Это число зависит от температуры и плотности водяного

пара вблизи кристалла. При одних значениях внешних параметров кристаллы растут в виде пластинок, при других могут образовываться полые столбики и призмы, иглы или звездочки. Тот факт, что при росте снежинки симметрия сохраняется, вызывает удивление. Предлагалось много механизмов, которые должны были объяснить, почему на противоположных концах снежинки узор и скорость роста практически идентичны. Однако снежинка — достаточно маленький кристалл, и можно предположить, что везде вокруг нее внешние условия одинаковы и они, по-видимому, определяют форму и рост снежинки. Другая версия предполагает наличие *обратной связи*: если какой-то луч случайно оказался короче, то он имеет большую частоту колебаний, что ускоряет перемешивание воздуха и оседание молекул воды из атмосферы.

Хотя большинство снежинок обладает симметрией шестого порядка, имеются фотографии снежинок и более высокой симметрии (12-го, 18-го и 24-го порядка). Однако, скорее всего, это объединившиеся вместе две или несколько снежинок, каждая из которых имеет, как обычно, симметрию шестого порядка.

#### 4.33 • КАТАНИЕ НА ЛЫЖАХ

Почему лыжи скользят по снегу?

**ОТВЕТ** • Лыжи плавно скользят по лыжне, поскольку из-за их трения о снег в тонком слое под ними снег подтаивает. Этот слой играет роль смазки. Чем быстрее движется лыжник, тем больше тепла выделяется благодаря трению и, следовательно, тем лучше скольжение. Если двигаться медленно, тепла выделяется мало, и лыжи скользят плохо.

Лыжи лучше делать из материала с низкой теплопроводностью. В этом случае тепло плохо отводится на верхнюю поверхность лыж и больше тепловой энергии приходится на площадь контакта лыж со снегом. Выкрашенные в темный цвет лыжи поглощают больше инфракрасного излучения солнца и могут оказаться теплее светлых лыж. В таком случае даже в пасмурный день при рассеянном свете темные лыжи обеспечивают лучшую смазку.

Если снег очень холодный, за счет трения лыж о снег обеспечить хорошую смазку не получается, и кататься на лыжах трудно. Тащить сани на лыжных полозьях по такому холодному снегу очень тяжело, и некоторые полярники считают, что это так же трудно, как тащить сани по песку.

Лыжи могут плавно скользить по снегу еще и потому, что воздух, остающийся между снегом и лыжами, уменьшает трение и тоже поддерживает лыжи. Такой механизм особенно эффективен при быстром движении. В этом случае лыжи отчасти напоминают судно на воздушной подушке.

#### 4.34 • КАТАНИЕ НА КОНЬКАХ И ИГРА В СНЕЖКИ

Почему коньки скользят по льду? Может ли лед быть слишком холодным для катания на коньках? Труднее ли кататься на коньках, если температура льда чуть ниже точки замерзания? Почему можно слепить снежок и почему он не лепится, если снег слишком холодный?

**ОТВЕТ •** Как и лыжи, коньки скользят по льду только благодаря смазке, роль которой играет вода, либо изначально имеющаяся на ледяной поверхности, либо образующаяся при таянии льда за счет трения при движении коньков. В результате трения нагреваются и лезвия коньков, и лед под коньками, а также капельки воды и кусочки льда, отброшенные в сторону движущимися лезвиями коньков. Если на ледяной поверхности слишком много воды, появляется сила сопротивления, действующая на лезвия коньков и затрудняющая скольжение. Когда температура льда близка к точке замерзания, например при ярком солнце, избыток воды может осложнить катание.

Раньше считалось, что появление слоя водяной смазки обусловлено *таянием под давлением*. Поскольку лезвия коньков тонкие, давление на лед под ними очень велико. С ростом давления температура замерзания льда становится ниже своего обычного значения, равного 0 °С. Иными словами, если лед не слишком холодный, его температура под лезвием конька неожиданно становится выше точки замерзания, и, следовательно, лед должен растаять. Однако ни эксперименты, ни расчеты не подтверждают эту точку зрения.

Хотя в кристалле льда межмолекулярные связи крепко держат молекулы воды на своих местах в кристаллической решетке, на поверхности эти связи не столь сильны. Таяние льда начинается с поверхности. В этом случае говорят о *предплавлении* или о *поверхностном таянии льда*. Слабо связанные молекулы, образующие, по современным данным, аморфный слой на поверхности льда, возможно, понижают трение коньков о лед.

Чтобы сделать снежок, надо взять горсть мягкого снега, сжать ее и, похлопывая, слепить небольшой

шарик. В процессе «изготовления» снежка одни порции снега скользят относительно других, снег сначала частично тает, а затем замерзает и превращается в лед, связывающий снег. Небольшие участки поверхности снежка, находящиеся в состоянии предплавления, тоже могут замерзнуть, и снежок покрывается корочкой льда. Если снег «мокрый» (быстро тает в руках или на солнце), количество льда в снежке может оказаться настолько большим, что получится не снежок, а ледышка. Конечно, играть в снежки такими ледышками ни в коем случае нельзя, ведь они твердые как камень.

Из слишком холодного снега слепить снежок не удастся. Тепла, которое выделяется при трении порций снега друг о друга, недостаточно, чтобы его растопить, и поэтому снег не может превратиться в лед. А когда лед не связывает снег, снежок разваливается.

#### 4.35 • ПРОГУЛКИ ПО ЛЬДУ

Почему ходить по льду гораздо легче, если он очень холодный? Когда вы идете, в какой момент вероятнее всего поскользнуться и упасть? Почему по льду безопаснее ходить в специальных ботинках?

**ОТВЕТ •** Раньше считалось, что при ходьбе по льду давление вызывает его таяние, но этот эффект если и есть, то он очень мал. Избежать скольжения помогает главным образом трение обуви о лед. На мокром льду (лед покрыт слоем воды или снежной каши) обувь на твердой подошве подойдет больше, но на сухом льду мягкая подошва лучше. Очевидно, что в обоих случаях ударяться на льду помогут шипы на подошве: при ходьбе они, как маленькие гвозди, втыкаются в лед, если, конечно, он не слишком холодный и твердый.

#### 4.36 • ИГЛУ

Может ли иглу (конусообразное жилище канадских эскимосов, сложенное из снежных или ледяных блоков) сохранять тепло, когда температура снаружи опускается ниже точки замерзания?

**ОТВЕТ •** Иглу обеспечивает защиту не только от ветра, но и от холода. Стены иглу выполняют роль термоизолятора, поэтому потери излученного человеческим телом или пламенем (даже горячей свечи) тепла происходят очень медленно. Правильно сделанное иглу низкое и широкое. В нем есть приподнятый над полом, на расстоянии около двух третей высоты иглу, лежак. Входят в иглу через тоннель, ведущий к еще одной,

более низкой двери, которая по высоте меньше одной трети высоты иглу. Попад внутрь, человек забирается на лежак. Поскольку теплый (более легкий) воздух поднимается, а холодный (более тяжелый) опускается, на лежаке воздух гораздо теплее, чем внизу у пола. Поэтому человеку в иглу спать относительно тепло. Однако слишком высокое иглу для этого не подходит: теплый воздух будет скапливаться выше лежака.

Если стены толще или они сделаны из не слишком плотного снега (в котором много пустот, заполненных воздухом), теплоотдача через стены уменьшается, тепло внутри иглу сохраняется лучше. Еще один способ улучшить термоизоляцию и избежать сквозняков — забить пространство между блоками внутри и снаружи снегом. Сначала снег и внутренняя поверхность ледяных блоков растают, а затем вновь замерзнут, образовав твердую ледяную корку.

#### 4.37 • СНЕЖНЫЕ РУЛОНЫ

Крайне редко во время сильных метелей на открытой местности появляются большие снежные шары и цилиндры. Некоторые из таких снежных шаров имеют десятки сантиметров в диаметре, а их масса достигает шести килограммов. Цилиндры напоминают свернутые спальные мешки или рулонный газон, иногда внутри они полые. Как же образуются такие странные объекты?

**ОТВЕТ** • Считается, что снежные рулоны образуются, когда снег падает на выпавший ранее и уже покрытый настом снег. Если температура близка к точке замерзания, выпавший снег пристаёт к насту. Сильный ветер может подхватить часть верхнего слоя, состоящего из наста и примерзшего к нему снега, и покатить по полю. Такое образование катится, собирая снег, и его диаметр растёт. Когда ветер порывистый, рулон швыряет в разные стороны. Так появляются снежные фигуры в виде шара или эллипса. Если же ветер дует преимущественно в одном направлении, образуются снежные цилиндры. Такие цилиндры могут быть полыми, если вначале подхваченная ветром полоска снега была длинной.

Начало снежному рулону могут положить и отдельные снежинки, которые несёт ветром по свежевывавшему снегу, и сорванные со своего места камни, катящиеся с заснеженного склона холма. Убедиться в этом можно, вскрыв снежный рулон и обнаружив внутри камень.

#### 4.38 • СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

Что вызывает снежные лавины?

**ОТВЕТ** • Пока до конца не ясно, при каких условиях образуются снежные лавины. Связано это с тем, что необходимо учитывать слишком большое число переменных. Поэтому невозможен и достоверный прогноз, когда и где сойдёт лавина. В то же время многое про лавины известно. *Лавина из рыхлого снега* начинает образовываться в определенном месте из сухого или мокрого, но не слишком слежавшегося снега. Она скользит наподобие осыпавшегося песка. *Лавина из снежных «досок»* представляет собой движение массивных снежных плит. Прийти в движение лавина может по целому ряду причин. Например, если при движении лыжника увеличится давление на снежную плиту, либо из-за дождя, либо когда плита нагреется.

Каждый год много лыжников погибает из-за лавин, которые они сами и вызывают, однако механизм, приводящий к сходу лавины, понятен не до конца. Для схода лавины необходим слабый слой снега, погребенный под снежной плитой. Такой слабый слой может образоваться, например, так: пусть в начале сезона снег падал на землю, температура которой оставалась выше точки замерзания. Затем температура на поверхности снега опускается и становится ниже температуры замерзания. Распределение температуры (снизу снег более теплый, а сверху он холоднее) направляет вверх водяной пар, где он конденсируется на снежинках. Снежинки переходят в состояние, которое в гидрологии называют *глубинным инеем*, когда имеется слой снежного покрова, состоящий из не слишком прочно связанных друг с другом кристалликов льда. Это и есть слабый слой. Если затем на него начинает падать свежий снег, все готово для образования лавины, поскольку слабый слой легко сдвигается. Это напоминает масло, которое легко намазывают ножом на хлеб.

Лыжник может вызвать лавину, если его давление на снег передается слабому слою. При относительно твердой поверхности снега он не оказывает воздействия на слабый слой и не вызывает движения снежной «доски». Когда снег несколько более рыхлый, например его нагрело солнце, давление лыжника может нарушить слабый слой и привести к сходу лавины. Так утром, когда еще холодно, трасса может быть безопасной, но днем на солнце она становится опасной.

#### 4.39 • УЗОРЫ ИЗ ТАЮЩЕГО СНЕГА

Почему иногда при таянии снега на земле или мощеной дороге образуются долго сохраняющиеся глыбы снега, конфигурация которых иногда напоминает геометрически правильные шестигранники или полосы?

**ОТВЕТ** • При таянии снега температура в горизонтальном направлении может меняться только вблизи поверхности — в тонком слое земли, покрытом тонким слоем из смеси снега и талой воды. В глубине, под этими двумя слоями, в горизонтальном направлении температура не меняется. Допустим, где-то в верхнем слое температура снега оказалась ближе к температуре таяния, чем в остальной массе снега. Если снег там тает, требуется энергия, чтобы молекулы воды могли покинуть свои места в кристаллической структуре льда. Эту энергию тающий снег может получить от окружающего снега, находящегося на некотором расстоянии от этого места. Там, где снег теряет энергию, его таяние или замедляется, или останавливается. Так образуются снежные глыбы, существующие очень долго. Промежутки между такими глыбами определяются максимальным расстоянием, с которого тающему снегу может передаваться энергия.

#### 4.40 • ЗАЧЕМ ПОСЫПАТЬ СОЛЬЮ ЛЕД НА ТРОТУАРЕ?

Почему, когда зимой тротуары и мостовые покрываются льдом, их посыпают солью? Почему иногда эффективнее использовать хлорид кальция (крупную каменную соль), а не хлорид натрия (поваренную соль)? Или вопрос только в цене?

**ОТВЕТ** • Предположим сначала, что на поверхности льда имеется слой воды и что температура и воды, и льда равна  $0^{\circ}\text{C}$ , то есть соответствует обычной температуре замерзания воды. На границе раздела между двумя состояниями воды наблюдается повышенная активность на молекулярном уровне: молекулы воды непрерывно переходят из льда в жидкую воду и обратно. Однако если число молекул, ушедших из льда, равно числу молекул, перешедших в лед из воды, количество льда не меняется.

Если воду посыпать солью, происходит диссоциация (распад) молекул соли на положительные и отрицательные ионы. Молекулы воды группируются вокруг ионов каждого из типов — происходит гидратация ионов. Гидратация связывает молекулы воды, они не могут перейти в лед. Теперь в лед переходит

меньше молекул воды, но покидает лед то же самое их количество, и, следовательно, общее количество льда уменьшается. Это означает, что лед начинает таять. Если талая вода в достаточной степени разбавляет соляной раствор, ситуация возвращается к исходной: количество покидающих лед молекул воды становится равным количеству приходящих в него молекул. Следовательно, таяние льда прекращается.

Внутренняя энергия молекул воды в жидком состоянии больше, чем когда молекулы закреплены на своих местах в жесткой кристаллической структуре. Когда молекула переходит в лед, она отдает часть своей энергии; когда молекула переходит из льда в воду, она получает такое же количество энергии. Если количество покидающих лед и поступающих в него молекул равно, баланс энергий поддерживает оба процесса. Но что происходит, когда соль уменьшает количество молекул, переходящих в лед? Как поставляется энергия тем молекулам, которые все еще покидают лед? Если система «лед — вода» находится не в помещении, поступление энергии происходит благодаря наличию тротуара, мостовой и воздуха. Хотя лед тает, температура всей системы «лед — вода» не меняется и остается равной температуре окружающей среды.

Однако если извне в систему «лед — вода» поступает недостаточно энергии, молекулы воды должны сами «поставлять» энергию, необходимую для таяния льда. При этом сначала понижается температура воды, а затем и льда. В этом случае говорят, что соль *понижает* точку замерзания воды. Температура падает до тех пор, пока количество молекул, перешедших из воды в лед, опять не сравняется с количеством молекул, перешедших из льда в воду.

Постепенно охлаждая соленую воду в очень холодном морозильнике, можно наблюдать, как опускается точка замерзания. Однако существует предел, ниже которого точку замерзания опустить нельзя. Для хлорида натрия эта предельная температура составляет около  $-21^{\circ}\text{C}$ , а для хлорида кальция — около  $-55^{\circ}\text{C}$ . Более низкая предельная температура у хлорида кальция — одна из причин, почему на дорогах используют его: так дорожное покрытие удастся очистить ото льда при гораздо более сильных морозах.

#### 4.41 • ДОМАШНЕЕ МОРОЖЕНОЕ

Домашняя мороженица состоит из металлического контейнера, вставленного в деревянную чашу и окруженного слоем колотого льда, смешанного с солью крупного помола. Охлажденную в холодильнике смесь



сливок, сахара и других добавок переливают в контейнер, куда вставляют мешалку. Мальчиком я размешивал эту смесь вручную, а теперь подключаю мороженицу к розетке, и вместо меня работает мотор.

Почему наружная часть мороженицы делается из дерева? Почему контейнер металлический? Зачем нужны колотый лед и соль? Зачем смесь сливок и сахара надо размешивать? Почему ее нельзя просто заморозить в морозильнике? Что произойдет, если температура смеси опустится только чуть ниже точки замерзания обычной воды? А если она опустится слишком низко?

**ОТВЕТ** • Температура замерзания смеси (та температура, при которой в ней начинает образовываться лед) ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , так как входящие в нее ингредиенты затрудняют образование льда. Чтобы достичь такой температуры, металлический контейнер следует обложить льдом с солью (см. предыдущую задачу). Тогда температура льда и образовавшейся при таянии воды будет меньше  $0^{\circ}\text{C}$ , а значит, тепло будет отводиться от смеси в контейнере. Однако соли не должно быть слишком много, иначе лед с водой окажутся слишком холодными и тепло будет отводиться слишком быстро. В этом случае смесь вблизи стенок контейнера быстро заморознет, что затруднит перемешивание. Тепло надо отводить постепенно, чтобы вся смесь находилась в одном и том же состоянии. Чаша со льдом должна быть сделана из дерева или другого плохо проводящего тепло материала для того, чтобы лед не растаял благодаря высокой температуре в комнате.

В мороженице используется колотый лед, поскольку, если взять кубики льда большего размера, число точек, где они соприкасаются со стенками контейнера, слишком мало и смесь будет охлаждаться слишком медленно. Если размешивать смесь, предварительно не охладив ее, из сливок получится не мороженое, а масло, отделившееся от пахты (молочной сыворотки).

Сливки размешивают, преследуя две цели. 1. Размешивание, перемещая по кругу образовавшиеся мелкие кристаллики и обволакивая их сливками, препятствует росту крупных. Мороженое будет зернистым и невкусным, если допустить рост крупных кристаллов льда. Именно так и происходит, когда смесь сливок и сахара просто замораживают в морозильнике. Размешивая смесь сливок с сахаром, вы добиваетесь того, что кристаллики льда остаются очень маленькими, а мороженое получается однородным. 2. Размешивают сливки с сахаром еще и для того, чтобы взбить

сливки, насытив их пузырьками воздуха. В этом случае мороженое скорее представляет собой замороженную пену, а не ледышку. Пузырьки стабилизируют частички жира в сливках. Увеличение объема мороженого за счет воздушных пузырьков называется *взбитостью*. В легком воздушном мороженом половина объема может приходиться на воздух, поэтому при покупке надо смотреть не на объем, а на вес.

Перемешав смесь, налейте ее в контейнер и поставьте в холодную чашу со льдом с солью. На этой стадии оставшаяся в смеси жидкость замерзает. Говорят, что мороженое *застывает*. Если все сделать правильно, маленькие кристаллики льда будут распределены равномерно и мороженое будет однородным и приятным на вкус.

Если рыхлый лед слишком долго держать в морозильнике, он станет зернистым, даже если температура все время будет ниже точки замерзания. Это связано с тем, что соприкасающиеся маленькие кристаллики объединяются, образуя кристаллы большего размера. Направление процесса определяется выигрышем энергии за счет уменьшения полной поверхности льда при слиянии мелких кристалликов. Долго хранящееся мороженое тоже может стать зернистым, но надо учитывать, что слияние маленьких кристалликов льда, покрытых жиром и другими примесями, замедляется.

Рассказывают, что во время Второй мировой войны американские летчики, базировавшиеся в Англии и выполнявшие полеты на бомбардировщиках В-17 «Летающая крепость», тоже делали мороженое. Контейнер со смесью сливок и сахара они ставили в задний пулеметный отсек, так что контейнер трясся и заморозал, как пулеметчик в хвосте самолета. Когда летчики возвращались на базу, мороженое было готово.

#### 4.42 • ПЬЕМ ГОРЯЧИЙ КОФЕ, ЕДИМ ГОРЯЧУЮ ПИЦЦУ

Почему безопасно пить (пусть маленькими глоточками) горячий обжигающий кофе? Почему при одной и той же температуре горячей пиццей обжечься легче, чем супом?

**ОТВЕТ** • Очевидно, опасность обжечься определяется не только температурой еды, которую кладут в рот, но и количеством пищи, ее теплопроводностью и тем, как долго пищу держат во рту. Маленькие глоточки кофе не причинят вреда, даже если он настолько горячий, что обжигает, если разлить его на себя, особенно

на одежду. Это довольно часто происходит, когда пьют горячий кофе за рулем. Если вылить на себя горячую жидкость, она быстро впитается одеждой и, находясь в контакте с кожей достаточно времени, передаст ей большое количество тепла.

Напротив, маленький глоточек горячего кофе лишь на мгновение касается небольшого участка слизистой ротовой полости. Однако есть еще две причины, почему вы не обжигаетесь, когда потягиваете горячую жидкость. Во-первых, в этом случае воздух смешивается с жидкостью, остужая ее. Во-вторых, жидкость распадается на капли, каждая из которых способна отдать совсем немного тепла.

Любую пищу, куда входит горячий сыр, надо есть с осторожностью. И на это есть две причины. Во-первых, бывает, что поверхность сыра выглядит не слишком горячей, но внутри его температура достаточно высокая. Во-вторых, еще хуже, если сыр пристанет к нёбу. Тогда к слизистой рта от сыра переходит большое количество тепла, так что, обжегши нёбо за секунду, мучиться придется несколько дней.

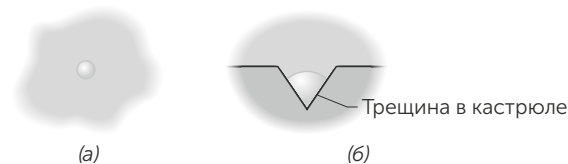
#### 4.43 • КИПЯТИМ ВОДУ

Почему, если кипятить в кастрюле воду, пузырьки образуются задолго до того, как ее температура достигнет температуры кипения? Почему наиболее громкий шум доносится из кастрюли раньше, чем вода полностью закипит? И вообще, почему, когда воду греют на плите в кастрюле, она закипает?

**ОТВЕТ •** При повышении температуры сначала из воды выходят пузырьки воздуха. Они образуются на дне кастрюли, там, где тепло от плиты передается воде. Давление воздуха внутри пузырька раздувает его, что приводит к увеличению его поверхности, тогда как поверхностное натяжение (обязанное взаимному притяжению молекул воды) сжимает пузырек, уменьшая его поверхность. У маленьких пузырьков кривизна поверхности очень большая, поэтому сила поверхностного натяжения «переигрывает» давление, и такие пузырьки схлопываются (рис. 4.5а). Поэтому пузырьки воздуха не образуются не только в объеме кастрюли, но даже и непосредственно над ее дном.

Однако в трещинах (или царапинах) на дне кастрюли (рис. 4.5б) могут сформироваться пузырьки с менее искривленной поверхностью. В этом случае «схлопывающая» сила поверхностного натяжения сравнительно мала. Такие пузырьки увеличиваются в размерах

до тех пор, пока не станут настолько большими, что могут оторваться от трещины. Поскольку воздух легче воды, они поднимаются к поверхности воды. Этот процесс прекращается, когда практически весь воздух выходит из жидкости.



**Рис. 4.5 / Задача 4.43.** а) Кривизна небольшого пузырька воздуха очень велика, велика и сжимающая его сила. б) Кривизна пузырька в трещине меньше, меньше и сжимающая его сила.

Вскоре после этого дно кастрюли становится достаточно горячим, и вода начинает испаряться. Теперь в трещинах образуются пузырьки, наполненные паром. Сначала они почти сразу лопаются, издавая характерный резкий звук, распространяющийся по воде, по стенкам кастрюли и по воздуху. Вода продолжает испаряться, пузырьки растут и постепенно становятся настолько большими, что могут оторваться от трещины и начинают всплывать вверх. Однако наверху, попав в более холодную воду, пузырьки схлопываются, водяной пар конденсируется и превращается опять в жидкость. Каждый раз, когда пузырек схлопывается, раздается характерный щелчок.

#### 4.44 • КАК ВАРИТЬ ЯЙЦО

От чего зависит время, которое требуется, чтобы сварить яйцо вкрутую? Почему это время увеличивается, когда яйцо варят высоко в горах? Почему во время варки скорлупа обычно трескается и как этого избежать?

**ОТВЕТ •** Чтобы сварить яйцо вкрутую, температура желтка должна подняться примерно до 70 °С. Температуру желтка можно повысить только за счет передачи тепла от воды желтку. Скорость теплопередачи зависит от разности температур между водой, в которой варится яйцо, и содержимым яйца. Если налить воду из-под крана, а затем постепенно повышать ее температуру до температуры кипения, потребуется от 10 до 15 минут. Время варки уменьшается, если яйцо опустить в кипящую воду, но тогда треснет скорлупа и часть содержимого яйца вытечет.

Время варки зависит от высоты, поскольку от высоты зависит скорость испарения воды, то есть количество молекул воды, покидающих ее поверхность.

Молекулы на поверхности воды связаны друг с другом силами притяжения. Если температура воды повышается, повышается и тепловая энергия этих молекул (они двигаются быстрее). Некоторые из них могут разорвать силы притяжения и покинуть поверхность. Часть ушедших с поверхности молекул сталкивается с молекулами воздуха и отскакивает обратно в воду. При температуре кипения воды количество покидающих воду молекул существенно превосходит число молекул, возвращающихся обратно в воду при столкновениях. Кроме того, переход воды в пар именно при кипении сильно возрастает потому, что происходит испарение воды в пузырьки и выбрасывание этого пара в атмосферу при всплытии пузырька.

В горах плотность молекул воздуха над поверхностью воды меньше, а значит, меньше вероятность их столкновений с молекулами воды. Значит, там количество ушедших с поверхности воды молекул может существенно превосходить число вернувшихся обратно за счет столкновений, даже если температура ниже той, при которой это происходило бы на меньшей высоте. Да и пузырьки начнут всплывать при меньшей температуре. Короче говоря, температура кипения тем ниже, чем больше высота. А при более низкой температуре кипения времени, чтобы сварить яйцо вкрутую, потребуется больше.

Скорлупа яйца треснет, если холодное яйцо опустить в кипящую воду. Трещина появляется благодаря избыточному давлению газа, образующегося внутри яйца и распирающего его. Если давление повышается быстро, оно разрывает скорлупу, а из трещины выходит и поднимается цепочка пузырьков газа. Прокалывая скорлупу иголкой так, чтобы образовалось отверстие, через которое будет выходить газ, можно предотвратить повышение давления внутри яйца.

#### 4.45 • КАК ГОТОВИТЬ В ПЕЧКЕ ИЛИ НА ОТКРЫТОМ ОГНЕ

Чтобы мясо подрумянилось, его жарят на открытом огне, обжаривают в масле на сковородке или запекают в духовке. Почему золотистой корочки не появится, если мясо варить или готовить в микроволновке? Почему мясо зажаривается только снаружи, а не все целиком? Если на этикетке указано время приготовления купленного куска мяса, потребуется ли в два раза больше времени, если другой кусок мяса будет весить в два раза больше?

**ОТВЕТ** • Образование румяной корочки на мясе — результат химической реакции углеводов с аминокислотой (так называемая реакция Майяра). Поскольку для прохождения реакции требуется высокая температура (выше точки кипения воды), мясо надо нагреть на открытом огне, в духовке или в масле. Когда используются два первых способа приготовления, тепло передается поверхности мяса главным образом с помощью инфракрасного излучения, а в последнем случае благодаря теплопроводности и конвекции (от сковородки через горячее масло). Внутри мясо постепенно нагревается в результате передачи тепла от его поверхности внутрь. Но температура внутри куска мяса не поднимается выше температуры кипения воды, и поэтому там мясо не зажаривается. Если мясо варить в кипящей воде или готовить в микроволновке, его температура даже на поверхности не превышает температуру кипения воды, а значит, зажариться мясо не может.

Когда готовят некоторые блюда из мяса, например бифштекс, мясо сначала обжаривают на сильном огне, а затем продолжают готовить, убавив огонь. Обжаривание приводит к образованию на мясе румяной корочки, но она не предохраняет мясо от потери жидкости, как думают некоторые хозяйки. Она лишь улучшает вкус мяса.

Мясо можно представить себе как протеиновую матрицу, удерживающую достаточно большое количество воды. Сначала мясо прочно удерживает воду: ни под действием силы тяжести, ни при надавливании кухонного ножа вытекание воды не происходит. Однако когда мясо готовят, при повышении температуры образуется свободная вода. Теперь ее выдавливают и сила тяжести, и давление ножа. В любом куске мяса большая часть воды теряется, когда его температура достигает 60 °C. Когда вода вытекает, объем мяса уменьшается. Поэтому хорошо прожаренный стейк может оказаться на удивление маленьким.

Некоторые предпочитают готовить жаркое в духовке. Они ставят туда мясо на несколько часов и устанавливают температуру, которая ниже температуры кипения воды. В этом случае потери воды невелики, поскольку за время приготовления вода на поверхности мяса до конца не испаряется.

Приготовить жаркое в сильно разогретой духовке или бифштекс на углях сложно, поскольку температура внутри мяса может подняться слишком высоко. При этом большая часть жидкости может испариться, и мясо окажется пересушенным. Поэтому, когда

температура внутри куска достигает требуемого значения, его надо постоянно проверять либо с помощью термощупа, либо делать небольшие надрезы и смотреть, какого цвета оно внутри. Однако определить температуру мяса по его цвету трудно, хотя при повышении температуры содержащийся в мясе кислородсвязывающий белок миоглобин, который отвечает за передачу кислорода из легких мускулам, меняет цвет, становясь из красного бурым.

Зная рецепт и время приготовления куска мяса или индейки определенного веса, вкусное блюдо не всегда удастся приготовить: разные духовки готовят с разной скоростью (их термометры плохо откалиброваны) и разные куски мяса проводят тепло с разной скоростью. Однако есть общее правило. Если известно, какое время  $T$  необходимо для приготовления куска мяса заданного веса, то на приготовление куска весом вдвое больше потребуется  $2^{2/3} T$ , а кусок весом втрое больше будет готов за время  $3^{2/3} T$ . Видите закономерность? Коэффициент, указывающий во сколько раз увеличился вес мяса, надо возвести в степень  $2/3$ . Это правило — следствие того, что объем и вес пропорциональны кубу линейных размеров, а время распространения тепла пропорционально квадрату линейных размеров.

#### 4.46 • КАК ГОТОВИТЬ НА КОСТРЕ

Готовить на костре можно, используя обычную посуду (например, сковородку) обычным способом (поместив над огнем). Но иногда, особенно в ситуации «выживания», могут пригодиться и другие, не столь привычные приемы. Как можно использовать алюминиевую фольгу, большую консервную банку, бумажный пакет, камни или апельсин, чтобы приготовить, скажем, яйца или мясо?

**ОТВЕТ** • Алюминиевую фольгу можно разместить так, чтобы она направляла отраженное инфракрасное излучение костра на пищу, которую нужно приготовить. Один из способов это сделать — устроить из фольги навес. «Крышу» навеса надо наклонить так, чтобы отраженное излучение было направлено на пищу, уложенную на другой лист фольги.

Из большой консервной банки можно смастерить печку. Для этого надо пробить дырки в стенках банки чуть выше дна, а в верхней части боковой стенки вырезать полоску, чтобы получился клапан. Затем поставить банку вверх дном на тлеющие угли. Они нагреют воздух внутри и банку. Можно готовить либо прямо

на горячем дне банки, либо поставить сверху другую банку меньшего размера и варить пищу в ней. Угли можно добавлять, подгребая их снизу, через клапан.

Продукты можно завернуть в алюминиевую фольгу и закопать в угли. Однако при таком способе готовки пища местами может подгореть. Лучше сделать два слоя фольги, проложив между ними бумагу. Между слоями фольги останется воздух, он замедлит передачу тепла от углей к продукту и уменьшит вероятность, что пища где-то подгорит. На том же принципе основано приготовление еды в коже апельсина. Надо срезать сверху примерно треть плода, удалить мякоть и положить в образовавшееся углубление, например, яйцо. Такую «кастрюльку» можно поставить прямо в угли, накрыв ее срезанной верхушкой апельсина. Жидкость в коже апельсина уменьшит вероятность появления слишком горячих участков.

Обычно температуру воды нельзя поднять выше точки кипения, которая значительно ниже температуры, при которой загорается бумага. Поэтому до тех пор, пока вода или водосодержащие продукты покрывают дно бумажного пакета, в нем можно готовить пищу. Например, в бумажный пакет можно разбить одно или несколько яиц, загнуть его верхний край несколько раз, чтобы не выходил пар, проткнуть его сверху палочкой и, держа за нее, поместить пакет над горячими углями. Вода в яйцах не позволит температуре на дне пакета подняться выше температуры кипения воды, но этого будет достаточно, чтобы приготовить яйца.

Курицу или другую птицу можно приготовить с помощью горячих камней. Камни надо завернуть в алюминиевую фольгу, затем нагреть их на горячих углях. Когда камни раскалятся, их надо поместить внутрь тушки курицы, обернуть ее фольгой и укутать несколькими слоями листьев или газеты. Камни отдадут тепло курице, и через некоторое время она будет готова. Газета или листья изолируют курицу от окружающего воздуха. Без них тепло, поступающее от камней, будет уходить наружу через поверхность курицы и внутри тушки температура до нужного уровня не поднимется. А курица должна быть хорошо прожаренной, тогда можно не опасаться сальмонеллеза.

#### 4.47 • КАК ПРИГОТОВИТЬ ПИЦЦУ

Почему, когда пиццу посыпают обычным сыром, он хорошо плавится и пицца сверху приобретает светло-коричневый румянец в виде отдельных пятен? А если взять обезжиренный сыр, ничего подобного не случается.



**ОТВЕТ** • Пиццу готовят на горячем противне. Передача тепла от противня пище происходит тремя способами: посредством теплопроводности, благодаря инфракрасному излучению стенок духовки и за счет конвекции горячего воздуха вдоль поверхности пиццы (в особенности при включенном вентиляторе, который гоняет воздух). Тепло постепенно проникает внутрь пиццы. Это необходимо главным образом для того, чтобы пропеклось тесто. Предполагается, что сыр плавится однородно по всей поверхности, а затем приобретает светло-коричневый оттенок. Поверхность пиццы коричневеет там, где в сыре образуются пузыри, то есть в тех местах, где вода, испаряясь, образует внутри сыра пузыри из пара. Когда при росте пузырей их поверхность становится тоньше, она поглощает больше тепла и поджаривается.

Если пиццу посыпать обезжиренным натертым сыром, вода из него испарится очень быстро, и пересушенные стружки сгорят, а не расплавятся и не сольются. Чтобы избежать этого, когда используют для пиццы обезжиренный или низкокалорийный сыр, сверху ее сбрызгивают маслом. Масляная пленка предотвращает быстрое испарение воды. Тогда происходит и плавление, и слияние стружки сыра, и образование пузырей, а значит, поверхность пиццы приобретает правильный коричневатый оттенок.

#### 4.48 • ПОЧЕМУ В МИКРОВОЛНОВКЕ МОЖНО РАЗОГРЕТЬ ОБЕД?

Как микроволновое излучение нагревает пищу в микроволновке? Почему в большинстве микроволновых печей используется вращающаяся подставка? Действительно ли пища в микроволновке сначала готовится изнутри, а потом снаружи? Почему в микроволновой печи на продуктах не образуется корочки, как на газовой или электрической плите, и пища не обладает характерным вкусом жареного?

Почему в нагретую в микроволновке воду не следует сразу добавлять какой-нибудь порошок, например растворимый кофе или какао? Почему микроволновку не следует использовать для приготовления яиц в скорлупе или яиц без скорлупы, но с целым желтком? Почему опасно есть разогретую в микроволновке выпечку?

**ОТВЕТ** • Как и видимый свет, микроволны, или микроволновое, сверхвысокочастотное излучение, — это электромагнитное излучение, но длины микроволн гораздо больше, чем у видимого света. (Слово

«излучение» вообще относится не только к радиоактивному излучению. Оно описывает тот факт, что нечто излучается или испускается.) Микроволны проникают в большинство продуктов и в основном поглощаются имеющейся внутри них водой. Молекулы воды представляют собой *электрический диполь*. Электрический диполь — это два заряда, расположенные на некотором расстоянии, то есть один конец диполя заряжен положительно, а другой отрицательно. Помещенный в электрическое поле, электрический диполь ориентируется в направлении поля. В микроволновке электромагнитное поле осциллирует как по направлению, так и по напряженности. Это значит, что молекулы воды все время меняют направление, пытаясь сохранить ориентацию вдоль поля.

Энергия передается от микроволн молекулам именно из-за этих колебаний. Переданная энергия переходит в тепло, в результате нагревается и вода, и продукты, содержащие воду. В микроволновке температура пищи никогда не превышает температуру кипения воды. Температура пищи, готовящейся на плите, гораздо выше. В этом случае при жарке мяса происходит денатурация оксимиоглобина, а это как раз и означает, что мясо зажаривается. Именно поэтому часто говорят, что у приготовленного в микроволновке мяса нет ни аромата, ни поджаристой корочки: оно мягкое и «бездушное».

Микроволны проникают внутрь готовящейся или разогреваемой пищи. Если ее объем не слишком велик, они одновременно нагревают всю порцию или прогревают ее верхний слой, если порция большая. В этом случае требуется время, чтобы прогрелся весь кусок.

Разогретый в микроволновке кусок пиццы или пирожок с кремом или вареньем могут представлять опасность, если их сразу начать есть. Соус или крем внутри этих продуктов содержат много воды, поэтому они разогреваются гораздо быстрее корочки из теста. Когда пиццу или пирожок вынимают из микроволновки, корочка кажется не слишком горячей, но сыр или крем внутри могут оказаться существенно горячее, и, откусив, вы сильно обожжетесь.

Микроволны генерирует электронно-вакуумный прибор, который называется магнетрон. Чтобы обеспечить однородное распределение микроволн относительно готовящейся пищи, ее обычно помещают на вращающуюся подставку. В микроволновках первых поколений использовали металлический вентилятор с наклонными лопастями, отражавшими микроволны. Проходя через поток микроволн, лопасти рассеивали



их в широком интервале углов. Без «распыления» микроволн за счет отражения или вращения пищи на готовящемся блюде имелись бы *активные места* (те, где пища нагревается быстро) и *пассивные места* (где пища нагревается медленно). Определить, где активные места, а где пассивные, можно, поместив плоский ровный кусок сыра в микроволновку без вращающейся подставки. Активные места — там, где сыр прежде всего начнет плавиться и пузыриться.

Если воду греют на обычной плите в стоящей на огне кастрюле, переданная от огня энергия идет на испарение жидкости и образование пузырьков пара в трещинках на дне кастрюли. Эти трещинки играют важную роль. Чтобы пузырек образовался и рос, ему надо справиться с поверхностным натяжением, притяжением молекул. У маленького пузырька в объеме воды на это мало шансов: у таких пузырьков поверхность раздела между жидкостью и паром сильно искривлена. Большая кривизна означает, что сжимающая пузырек сила, действующая со стороны воды, просто схлопывает пузырек. Однако если маленький пузырек образуется в трещинке, поверхность раздела «пар — жидкость» искривлена не так сильно, сжимающая сила не столь велика и пузырек не только может «выжить», но и начинает расти по мере того, как в него испаряется все больше воды. Поэтому при нагревании воды на обычной плите процесс кипения начинается в трещинках на дне кастрюли.

Когда вода в кастрюле на огне нагревается до температуры кипения, тепло передается воде через ту поверхность, где могут образовываться пузырьки пара. Температура воды не может перейти через точку кипения, поскольку тепло тратится на образование пузырьков пара.

Процесс нагревания воды в микроволновке идет совсем по-другому. Здесь тепло поглощается не через поверхность, а в объеме воды, где поверхностное натяжение легко схлопывает образовавшиеся пузырьки пара. Это значит, что переход воды из жидкого состояния в пар затягивается. Вода продолжает поглощать тепло, и температура поднимается выше обычной точки кипения. В этом случае говорят, что вода *перегрета*. Со временем пузырьки пара начинают образовываться, несмотря на противодействие со стороны поверхностного натяжения.

Предположим, что из микроволновки вынули чашку с перегретой водой до того, как началось образование пузырьков. Но без пузырьков трудно определить,

что вода горячая. Если в эту перегретую воду всыпать ложку порошка, крошеного льда или какие-то другие крупинки, пузырьки пара начнут образовываться внезапно на всех уголках и во всех трещинках всыпанных крупинок. Кипение может быть столь бурным, что очень горячая вода выплеснется из чашки. В этом случае легко получить тяжелые ожоги.

В микроволновке яйцо в скорлупе, неразбитый желток или любой закрытый сосуд с водой с большой вероятностью взорвутся. Вода в них будет нагреваться до тех пор, пока почти мгновенно не начнется бурное кипение, при котором образуется большое количество пара. Из-за резкого расширения воды сосуд развалится. Иногда яйцо не взрывается в микроволновке, но может взорваться после того, как его вынули, если его случайно толкнуть. Тогда не только вся кухня будет в яичных брызгах, но и вы можете получить ожог. Небольшие взрывы, их еще называют *микроволновый всплеск*, могут случаться, если в микроволновке готовить зеленую или лимскую фасоль, когда в закрытом объеме содержится небольшое количество воды.

При пользовании микроволновкой следует обратить внимание на вопросы безопасности. Чаще всего утечка энергии происходит вдоль дверцы микроволновки, перекосившейся от длительного употребления.

#### 4.49 • КАК ЖАРИТЬ КУКУРУЗНЫЕ ЗЕРНА

Почему лопаются попкорн? Иными словами, из-за чего кукурузные зерна так разбухают и почему они так громко «стреляют»?

**ОТВЕТ** • Попкорн делают из сахарной кукурузы. Когда зерна кукурузы нагревают горячим воздухом, жарят в масле на сковороде или ставят в микроволновку, они взрываются. Перикарпий зернышка кукурузы (его оболочка) представляет собой что-то вроде небольшого закрытого сосуда, в котором содержатся крахмал и вода. Когда зернышко кукурузы нагревается, часть воды переходит в пар, но большая ее часть остается жидкой. Поскольку жидкость находится в закрытом «сосуде», давление в нем увеличивается, а значит, повышается температура кипения заключенной в нем воды.

Когда температура воды достигает примерно 180 °С, давление внутри зерна кукурузы превышает атмосферное почти в 8 раз. При таком давлении стенки перикарпия разрываются, давление падает до атмосферного, точка кипения воды снижается до своего обычного значения, и вода внутри «сосуда»

из перикарпия оказывается сильно перегретой. Она испаряется так быстро, и при этом выделяется такое количество тепла, что объем расплавленного крахмала увеличивается во много раз по сравнению с его исходным значением. Резкое расширение сопровождается распространением по воздуху звуковых волн — кукурузное зерно «выстреливает».

При увеличении объема кукурузные зерна становятся пышными. Поскольку попкорн именно за это и ценят, при его производстве объем зернышек увеличивают максимально. Чем больше воды имеется в перикарпии кукурузного зернышка, тем сильнее будет взрыв и, следовательно, тем сильнее увеличится его объем. Однако если воды внутри перикарпия будет слишком много, он либо вообще не взорвется, либо взрыв будет очень слабым. Это связано с тем, что лишняя вода уменьшает жесткость стенок перикарпия.

#### 4.50 • КАК ГОТОВИТЬ ЯИЧНИЦУ-БОЛТУНЬЮ

Почему, готовя яичницу-болтунью, вы должны перемешивать яйца? Почему жарить ее надо на очень слабом огне?

**ОТВЕТ** • Чтобы получилась хорошая яичница-болтунья, на несильно разогретую сковородку надо разбить яйца (и добавить молока, если вам так больше нравится). Во время готовки яичницу-болтунью надо непрерывно помешивать. На то есть две причины. Во-первых, надо распутать свернутые в клубок молекулы белка, входящие в состав яйца. И во-вторых, надо разбить комочки, образующиеся в результате коагуляции при нагревании. Если остановиться, яйцо на сковородке получит слишком много тепла и зажарится до корочки. Если сковородка слишком горячая, белковые молекулы, пока их распутывают и нагревают, теряют присоединенные к ним молекулы воды. Из воды образуются капли, а затем и небольшие лужицы. Некоторым нравится, когда болтунья плавает в таких лужицах, а другие, наоборот, любят хорошо прожаренную яичницу без лишней влаги. Правда, тогда она напоминает теплую желтую картонку.

Если передача тепла происходит достаточно медленно и вода из белков не выделяется и если вы хорошо перемешивали яичницу, так что она не подгорела и в ней нет крупных комочков, болтунью надо жарить не слишком долго. Тогда тепло, исходящее от горячей сковородки, довершит процесс приготовления. Яичница-болтунья не пересушится и не размокнет, будет

однородной и вкусной. Соль надо добавлять непосредственно перед едой. Если это сделать раньше, соль поможет воде отделиться от белков. Если вы хотите добавить в яичницу-болтунью овощи или другие продукты, содержащие воду, постарайтесь заранее приготовить их или хорошенько обсушите. И положите эти продукты на сковородку в самом конце готовки.

Омлет отличается от яичницы-болтуньи по крайней мере в двух отношениях. Во-первых, чтобы получились пузырьки воздуха, белок отделяют от желтка и взбивают. При этом в ячеистой структуре взбитых белков задерживаются пузырьки воздуха. Затем аэрированный белок опять соединяют с желтком. Во-вторых, желательно, чтобы омлет сверху и снизу поджарился. Тогда смесь белка с желтком будет готовиться внутри образовавшейся корочки. Для этого смесь взбитого белка с желтком подержите на сковородке чуть подольше, чтобы снизу образовалась корочка. После этого омлет можно сложить пополам. Тогда поджаристые корочки окажутся и сверху, и снизу, а между ними будет доходить омлет: расширяющиеся внутри пузырьки воздуха и пара сделают его пышным.

#### 4.51 • ГЕЙЗЕРЫ И КОФЕЙНЫЙ ПЕРКОЛЯТОР

Почему пар и вода, содержащая различные добавки, бьют из гейзера фонтаном, а не изливаются спокойно? Почему извержение некоторых гейзеров, например «Старого служаки» в Йеллоустонском национальном парке, происходит периодически?

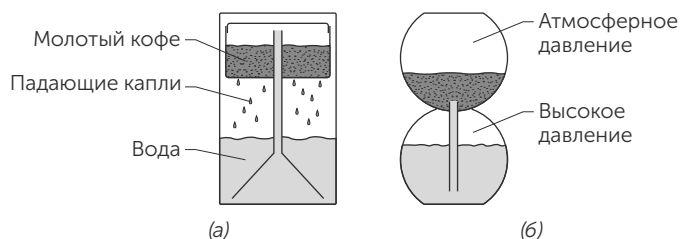
Обычный кофейный перколятор\* состоит из перевернутой воронки, помещенной на дне кофеварки, а на трубке сверху держится контейнер с молотым кофе (рис. 4.6а). Как готовится кофе в такой кофеварке?

**ОТВЕТ** • «Старый служака» — наверное, самый изученный гейзер. Видеокамера зафиксировала и как гейзер заполняется водой, и как происходит извержение. На самом деле этот гейзер — трещина глубиной до 200 м. По ее стенкам вниз стекают холодная и горячая вода, просачивающиеся сквозь расщелины в соседних скалах. Источник тепла, нагревающий воду, — магма, расположенная на глубине нескольких километров.

«Старый служака» оживает, когда внизу, на глубине 6–7 м, температура воды поднимается выше точки кипения, соответствующей этой глубине. (С глубиной

\* Кофейный перколятор — кофеварка, где горячая вода многократно, по замкнутому циклу, проходит через емкость с молотым кофе. *Прим. пер.*

возрастает давление, а следовательно, и температура кипения воды.) Пузырьки пара поднимаются и отдают тепло находящейся выше воде, температура которой ниже точки кипения на этой глубине. Однако скоро и эта вода нагревается до температуры кипения, а затем в результате стремительного расширения превратившейся в пар воды из гейзера вверх выбрасывается столб воды и пара.



**Рис. 4.6 / Задача 4.51.** а) Перколятор с перевернутой воронкой. б) Перколятор из колб.

Затем процесс повторяется, но как скоро это произойдет, зависит от того, сколько воды осталось в гейзере после предыдущего выброса. Обычно интервал между выбросами составляет либо около часа либо около полутора часов. Это означает, что имеется два преимущественных места поступления воды в трещину, причем поступающая вода имеет в этих случаях разную температуру.

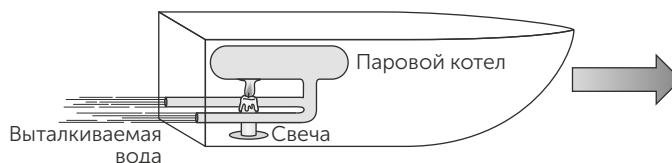
Когда перколятор, нижняя камера которого представляет собой перевернутую воронку, ставят на горячую конфорку, вода на дне внутри воронки нагревается и частично превращается в пар. Быстрое расширение пузырьков пара проталкивает через трубочку вверх узкую струйку воды. Вода попадает в контейнер с молотым кофе, а затем, пройдя через кофе, стекает вниз. Процесс продолжается до тех пор, пока кофе не станет достаточно крепким.

Другой распространенный перколятор состоит из двух стоящих друг на друге колб, плотно соединенных резиновой прокладкой (рис. 4.6б). Молотый кофе находится в верхней, открытой колбе, а воду наливают в нижнюю. Колбы соединяет узкая трубочка, нижний конец которой находится ниже уровня воды в колбе снизу. Когда вода в нижней колбе достаточно нагревается, расширившийся воздух и водяной пар выдавливают воду по трубочке в верхнюю колбу. Затем перколятор снимают с огня. При остывании нижней колбы там конденсируется водяной пар, давление воздуха падает и становится ниже атмосферного давления. Поскольку верхняя колба открыта, давление

в ней равно атмосферному. Благодаря разности давлений в двух колбах жидкость выталкивается через трубочку из верхней колбы в нижнюю. В результате этого движения вверх-вниз вода проходит через молотые кофейные зерна, из них экстрагируются растворимые вещества и напиток становится крепче. Когда вся вода стечет в нижнюю колбу, кофе готов.

#### 4.52 • ИГРУШКА «ПАРОВАЯ ЛОДОЧКА»

Лодочку, изображенную на рис. 4.7, приводит в движение вода, вытекающая через две торчащие из «парового котла» трубочки на ее корме. Паровым котлом может служить отдельный объем, а может просто трубка, изогнутая несколько раз. Чтобы подготовить лодочку к плаванию, надо наполнить паровой котел и трубки водой, запустить лодочку в таз с водой, а затем поставить под котел зажженную свечку. Когда вода в котле нагреется и начнет образовываться пар, давление повысится и вытолкнет воду из трубочек на корме лодки.



**Рис. 4.7 / Задача 4.52.** Вырывающаяся из трубочек вода приводит в движение игрушечную лодочку.

**ОТВЕТ •** Когда вода выталкивается из трубочек, некоторое количество пара из котла попадает в трубочки, где конденсируется, поскольку там температура ниже. И движение, и конденсация приводят к понижению давления в газе. Когда давление падает, вода за кормой лодочки втягивается в трубочки, заполняя их опять. Затем цикл «выталкивание — заполнение» повторяется, и лодочка плывет вперед.

Резко выталкиваемая из трубочек вода — это реактивная струя, направленная от кормы, и, следовательно, лодочка должна двигаться вперед. Ее не отбрасывает назад во время наполнения трубочек, поскольку это происходит медленно и вода затекает в трубочку под разными углами (интервал углов приблизительно составляет полусферу). Поэтому сила, тянущая лодочку назад, слабая. Таким образом, всякий раз, когда из трубочек выталкивается вода, лодочка продвигается вперед, но она не сдает назад, когда трубочки заполняются водой.

#### 4.53 • ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ И ДЛИНА

Почему большинство мостов состоит из секций, между которыми оставляют узкие зазоры? Почему старые железнодорожные пути делали из коротких состыкованных рельсов, между которыми всегда оставляли зазор? В поезде, едущем по таким рельсам, стоял грохот, пассажиров сильно трясло: когда колеса наткнулись на стыки, вагон подбрасывало, и возникающие колебания становились источником звука и тряски. Почему у современных железнодорожных путей зазоров нет?

**ОТВЕТ** • Большинство материалов, используемых при строительстве мостов, расширяются при нагревании и сжимаются при охлаждении. Если в течение года конструкция из таких материалов испытывает значительные изменения температуры, она должна допускать изменение размеров. Иначе расширение приведет к потере устойчивости при изгибе.

Изначально рельсы были короткими. Они состыковывались, а между ними оставлялись зазоры, допускающие возможность теплового расширения. В современных рельсах зазоров практически нет. Теперь делают бесстыковые железнодорожные пути из сварных рельсов. Они настолько надежно крепятся к шпалам, что изгибаются очень редко. Обычно рельсы укладывают при температуре, средней между максимальным и минимальным годовыми значениями. Кроме того, эти рельсы укладывают так, чтобы они могли немного изгибаться вбок.

Трубопровод, уложенный на дне океана, не закреплен, и когда по трубам течет теплая нефть, тепловое расширение может привести к их изгибу. До тех пор пока изгиб не слишком большой, неприятностей, скорее всего, не будет.

При проектировании самолета «Конкорд» пришлось допустить тепловое расширение корпуса при сверхзвуковом полете. Дело в том, что из-за трения о воздух обшивка самолета разогревалась. В носовой части температура поднималась до 128 °C, а в хвостовой — до 90 °C. Окна кабины были теплыми на ощупь, а удлинение корпуса при разных условиях полета и по разным источникам составляло от 12 до 30 см.

Корпус самолета-разведчика SR-71 (его рекорд высоты и скорости для серийных самолетов до сих пор не побит) нагревался в полете до 400 °C и удлинялся примерно на ту же величину, хотя его длина была почти такой же, как у «Конкорда». Дело в том, что

коэффициент термического расширения у титана примерно втрое меньше, чем у алюминия.

Материалы, используемые в стоматологии, разрабатывают с учетом того, чтобы их температурное расширение или сжатие не наносило вреда соседним зубам. Иначе глоток горячего кофе, которым вы запили холодное мороженое, запомнится вам надолго.

Причин, приведших к аварии, в результате которой 50 миллионов американцев и канадцев остались без электричества в августе 2003 года, было много. Но одной из них стало необычное происшествие в Огайо. В тот день по сети шел большой ток, и провода линии электропередачи разогрелись существенно больше, чем обычно. Когда температура проводов повысилась, увеличилась и их длина на каждом из участков между опорами. Провода провисли, и один из провисших участков оказался так близко к дереву, что ток пошел через дерево в землю. Этот участок вышел из строя, что привело к нестабильности энергосистемы, результатом которой стало ее отключение.

#### 4.54 • РАЗРУШЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ

Железнодорожные цистерны необычайно надежны и, как правило, разрушаются, только если происходит столкновение на большой скорости. Однако цистерна может повредиться и в том случае, когда забывают о законах физики. Вот реальная история. В конце дня железнодорожная бригада вымыла цистерну изнутри очень горячей водой. До конца смены рабочие не успели завершить работу, поэтому они наглухо закрыли цистерну и разошлись. Когда утром рабочие вернулись, то увидели, что цистерна, сделанная из очень прочной стали, раздавлена. Как будто какой-то циклоп из фантастического фильма наступил на нее. Что привело к деформации цистерны?

**ОТВЕТ** • Когда цистерну мыли, ее заполнили очень горячим паром. Пар — это газ, состоящий из молекул воды. В конце смены рабочие задраили все люки, и пар остался внутри. В тот момент давление в цистерне равнялось атмосферному, поскольку во время мытья люки были открыты. Ночью цистерна остыла, остыл и пар, большая часть которого сконденсировалась. Это значит, что уменьшилось как число молекул газа, так и его давление, в то время как объем остался постоянным. В результате давление газа упало. В какой-то момент той ночью оно понизилось настолько, что внешнее

атмосферное давление вдавило внутрь стенки цистерны. Цистерна не пострадала бы, если бы рабочие оставили люки открытыми. Тогда в цистерну поступал бы воздух и давление внутри и атмосферное давление снаружи были бы равны.

#### 4.55 • КАК НА ВЕРЕВКЕ СОХНЕТ БЕЛЬЕ

До того как стиральные машины с сушкой получили широкое распространение, белье вывешивали сушиться на веревках. Его прикрепляли к веревке прищепками, и оно висело (на солнце или в тени), пока не высохнет. Почему высыхает рубашка, повешенная таким образом? В частности, почему сначала белье становится сухим сверху, а затем уже снизу?

**ОТВЕТ •** Сразу приходит в голову, что висящая рубашка высыхает прежде всего сверху, потому что вода стекает вниз и капает с подола рубашки. Действительно, какое-то время, примерно первые полчаса, процесс высыхания идет именно так. Вода, стекая к подолу рубашки, образует достаточно большие капли, которые отрываются и каплют вниз. Однако, когда капание прекращается, рубашка все еще остается влажной. Если бы после этого она сохла только из-за того, что ее нагревает солнце, она вся высохла бы примерно с одной скоростью, а не сначала сверху, а потом внизу. Рубашка высыхает сначала сверху из-за того, что в результате изменения температуры вдоль нее образуется конвекционный поток воздуха.

После того как вода стекла, рубашка остается влажной потому, что поверхностное натяжение задерживает воду в порах (свободном пространстве между нитями). Рассмотрим столбик воды, застрявшей в одной из таких вертикальных пор. Снизу и сверху соприкасающиеся с воздухом поверхности этого столбика искривлены. Как результат поверхностного натяжения (взаимного притяжения молекул воды) обе эти искривленные поверхности создают некоторую силу, действующую на столбик воды. Если сверху пора шире, чем снизу, суммарная сила направлена вниз, туда же, что и действующая на столбик воды сила тяжести. Тогда вода будет двигаться вниз. Однако если сверху пора уже, чем снизу, суммарная сила, обязанная поверхностному натяжению, направлена вверх. Поэтому, несмотря на действие силы тяжести, столбик воды может удерживаться на месте. Вода, попавшая в такую пору, задерживается в ней и после того, как основная масса воды стекла.

Вода постепенно испаряется из таких пор-ловушек. На испарение требуется энергия: молекулы воды надо оторвать от поверхности. Поэтому испарившаяся вода уносит какое-то количество энергии, охлаждая оставшуюся в поре воду, а также окружающие ее ткань и воздух. Поскольку при охлаждении воздух становится плотнее, холодный воздух движется вниз по рубашке, впитывая влагу из расположенных ниже столбиков воды в порах. Так линия, отделяющая влажную часть рубашки от сухой, опускается вниз вслед за опускающимся холодным воздухом.

Если вы хотите воспользоваться физикой как оправданием, чтобы несколько часов позагорать, скажите всем, что ваша цель — изучение движения линии высыхания вниз по рубашке при конвективной сушке.

#### 4.56 • ТЕПЛОЕ ПАЛЬТО

Почему вы замерзнете, если войдете в холодную комнату одетым как на пляж? Как пальто удерживает тепло?

**ОТВЕТ •** Вы чувствуете, что вам холодно, если отдаете в окружающее пространство больше тепла, чем получаете от него. Есть четыре причины, почему происходит потеря тепла. 1. При прямом контакте с более холодным объектом за счет теплопроводности. Например, когда садитесь на холодную скамейку. 2. Путем излучения в инфракрасном диапазоне в окружающее пространство. Но вы и получаете энергию, поглощая внешнее по отношению к вам инфракрасное излучение. Однако если вокруг вас холоднее, потери энергии будут больше. 3. Благодаря конвекции вы теряете энергию при движении воздуха вблизи вас. Если воздух холоднее, потеря энергии происходит при столкновении с вами молекул воздуха. 4. Энергию можно потерять и в результате испарения пота с кожи. Именно поэтому человек потеет, когда выполняет физические упражнения. Переход из жидкости в пар требует энергии, которая отбирается у вашей кожи. При ветре скорость испарения увеличивается, поэтому растет и скорость, с которой происходит потеря энергии.

Назначение пальто, как и всякой одежды, — уменьшить все потери энергии. Например, «одежда» животных, шкура и шерсть, затрудняет потери за счет конвекции и испарения на ветру. Пальто еще и обеспечивает наличие защитного слоя воздуха вокруг участка тела. Поскольку воздух очень плохо проводит тепло, этот слой защищает вас от потери энергии за счет проводимости. Еще лучше, если под пальто надето несколько



слоев одежды. Они обеспечивают несколько изолирующих слоев воздуха.

Меховая одежда не дает замерзнуть, поскольку воздух в какой-то степени удерживается в пространстве между шерстинками. Однако если стоять на ветру, этот воздух легко выдувается. Поэтому пальто мехом внутрь теплее: мех укрыт от ветра.

Для открытых участков тела, например рук или лица, восприятие холода можно оценить с помощью так называемого *ветро-холодового индекса*, или *индекса Сэйпла*. Он определяется как температура, которая при отсутствии ветра вызывает у человека те же ощущения. Точно рассчитать этот коэффициент сложно, поскольку надо учитывать, что люди по-разному адаптируются к холоду. Конечно, при холодном ветре существует угроза обморожения. Обычно обморожения кожи не происходит при температурах выше  $-10^{\circ}\text{C}$ , однако при заметном ветре есть риск получить обморожения и при  $-5^{\circ}\text{C}$ . При понижении температуры и усилении ветра угроза быстро возрастает.

#### 4.57 • ТЕПЛЫЕ РАСТЕНИЯ

Когда в конце зимы выпадает снег, вокруг симплокарпуса вонючего (*Symplocarpus foetidus*) он быстро тает. А при глубоком снеге вокруг этих растений могут образовываться ямки. Почему так происходит?

**ОТВЕТ •** Распространенный в Северной Америке и Азии симплокарпус вонючий (в США его называют скунсовой капустой) — одно из немногих растений, обладающих способностью поднимать свою температуру выше температуры окружающей среды. Это растение способно растопить снег вокруг себя, поскольку благодаря повышенной температуре оно теряет большое количество энергии путем инфракрасного излучения. Симплокарпус вонючий, как птицы и млекопитающие, способен к *терморегуляции*. Это значит, что растение способно поддерживать свою температуру, даже когда температура окружающей среды меняется.

#### 4.58 • ШЕРСТЬ БЕЛОГО МЕДВЕДЯ

Почему волоски на коже белого медведя полые?

**ОТВЕТ •** Шерсть белого медведя представляет собой ловушку для солнечного излучения, поскольку видимые и инфракрасные лучи спектра, многократно отражаясь в волосках, достигают кожи. Здесь это излучение поглощается, повышая тепловую энергию кожи.

Ультрафиолетовые лучи тоже поглощаются волосками, но их вклад в обогрев кожи очень невелик. Мех белого медведя удерживает тепло, в частности, потому, что полые волоски плохо проводят тепло. Утверждение, что они в какой-то мере напоминают оптоволокно, ошибочно. У оптоволокну сердцевина должна иметь коэффициент преломления выше, чем оболочка, а у полых волосков «хозяина Арктики» ситуация обратная.

#### 4.59 • ЧЕРНАЯ ОДЕЖДА И ЧЕРНЫЕ ОВЦЫ В ПУСТЫНЕ

Обычно считается, что белая одежда прохладнее, что при жаре она предпочтительнее черной. Однако бедуины в Синайской пустыне, где температура может быть чрезвычайно высокой, иногда предпочитают черную одежду белой. С чем связан их выбор?

Если вы вдруг потеряетесь в пустыне, повысится ли ваш шанс выжить, если вы снимете с себя всю одежду, чтобы исключить поглощение ею солнечных лучей?

Овцы у бедуинов обычно черные. И это не результат направленной селекции, но, как представляется, естественная адаптация к окружающей среде. Почему черный шерстный покров овцы помогает ей выжить?

**ОТВЕТ •** Черная одежда интенсивнее поглощает солнечный свет и нагревается до более высокой температуры, чем белая. Но температура воздуха внутри одежды бедуинов и температура их кожи определяются не только цветом одежды. Более высокая температура черной одежды, вероятно, компенсируется лучшей конвекцией воздуха под ней. В частности, если воздух попадает под одежду снизу, он нагревается, поднимается вверх и выходит через ворот. Такая одежда чем-то напоминает трубу. При порывистом ветре развевающаяся одежда еще усиливает циркуляцию воздуха.

Если, оказавшись в пустыне, вам требуется надеть облегающую одежду, не допускающую циркуляции воздуха, белая одежда меньше разогревает кожу, чем черная. Обычно, опасаясь обгореть, люди предпочитают выходить одетым. Если воды в избытке, одежда должна быть из пористой ткани. Тогда испарение пота охлаждает кожу. Однако если воды не хватает, требуется одежда, уменьшающая испарение с кожи. В противном случае очень скоро появляется опасность обезвоживания. В классическом научно-фантастическом романе Фрэнка Герберта «Дюна» природные условия на песчаной планете, населенной людьми, были настолько неблагоприятны, что им приходилось носить

непроницаемые костюмы, чтобы сохранить драгоценную влагу.

Черная шерсть овец бедуинов позволяет им пережить суровую зиму Синайской пустыни. Цвет шерсти не имеет значения, пока овца не окажется под прямыми солнечными лучами. Тогда черный цвет шерсти способствует лучшему поглощению солнечного света, а значит, овце теплее и ее метаболизм уменьшается. Зимой, когда пищи для овец недостаточно, низкий метаболизм является преимуществом.

#### 4.60 • СКОРОСТЬ ОСТЫВАНИЯ ЧАШКИ КОФЕ

Предположим, вы приготовили себе чашку горячего кофе, но намерены выпить его позже. Предположим также, что кофе вы пьете с молоком. Когда надо добавлять молоко, если вы хотите, чтобы кофе был максимально горячим: сразу или тогда, когда вы соберетесь его пить? Надо ли, доливая молоко, одновременно помешивать кофе? Надо ли в чашке с кофе оставлять ложку? Зависит ли скорость остывания от того, белая чашка или черная? Или от того, светлая или темная в ней жидкость?

**ОТВЕТ** • Для ответов на эти вопросы надо принять во внимание три фактора. 1. Чем горячее кофе, тем быстрее он отдает тепло. Если бы только это было важно, молоко следовало бы добавлять сразу, чтобы уменьшить температуру, а следовательно, и потери энергии. 2. Добавляя порцию более холодного молока в горячий кофе, мы получаем смесь некоторой промежуточной температуры. Падение температуры кофе будет тем больше, чем горячее он был, когда добавлялось молоко. Если бы было важно учитывать только это, молоко следовало бы добавить перед тем, как пить кофе. 3. Присутствие молока, вероятно, уменьшит испарение воды, а следовательно, и связанные с этим тепловые потери.

Некоторые исследователи утверждают, что в обычных условиях черный кофе остывает примерно на 20% быстрее, чем кофе с молоком. Скорее всего, это означает, что остывание определяется механизмом, идущим у нас под номером 3, а не различиями в инфракрасном излучении. Они также обнаружили, что, когда температура молока ниже комнатной (возможно, его только что вынули из холодильника), кофе будет горячее, если молоко добавляют сразу. Однако, если температура молока выше комнатной (такое случается редко), чтобы рассчитать правильно, когда следует добавлять молоко, надо учесть несколько факторов, в том числе — сколько

пройдет времени, прежде чем вы приступите к кофе. С учетом всего этого молоко лучше добавить сразу.

Размешивание может оказать разное влияние, поскольку оно отражается и на составе приповерхностного слоя, и на его температуре. Металлическая ложка, погруженная в кофе, отводит вверх тепло по всей своей длине, а выступающая из кофе часть отдает тепло в атмосферу. Пластмассовая ложка никакого влияния не оказывает.

Чтобы ответить на вопрос о влиянии цвета, надо рассмотреть скорость, с которой тепло уходит с поверхности кофе. В диапазоне видимого света белая поверхность испускает больше энергии, чем черная, но основные потери тепла путем излучения с поверхности чашки (или самого кофе) лежат в инфракрасном диапазоне. В этом случае разница в излучении не столь велика. Следовательно, неважно, какого цвета чашка и поверхность напитка.

Крышка на чашке кофе или слой взбитых сливок помогут дольше сохранить кофе горячим, поскольку они уменьшают испарение и связанные с этим потери тепла.

#### 4.61 • ХОЛОДНАЯ ВОДА В ПОРИСТОМ ГЛИНЯНОМ КУВШИНЕ

Почему в странах с жарким, засушливым климатом воду держат в пористых (пропускающих влагу) кувшинах и, чтобы охладить, ставят их в проветриваемое и затененное место? Когда мы с родителями отправлялись на машине в путешествие по юго-западу Соединенных Штатов, они притачивали пористую тару с водой к переднему бамперу. Когда мы останавливались, воздух и машина были раскалены, но вода была холодной. С чем это связано?

**ОТВЕТ** • При испарении молекулы воды покидают объем кувшина и уходят в воздух. Энергия тратится на преодоление сил притяжения, удерживающих молекулы на поверхности воды. Если хаотическое движение этих молекул в воздухе возвращает их обратно на поверхность воды (это может произойти при столкновении молекул воды с молекулами воздуха), энергия возвращается в объем воды. Но если дует ветерок, освободившиеся молекулы уносятся и не могут восполнить потерю энергии. В этом случае поверхность воды энергию теряет. Если такие потери происходят достаточно интенсивно, температура воды падает, несмотря на то, что окружающая среда передаст воде заметное

количество энергии. Таким образом, если пористый кувшин держать в тени, ветерок охлаждает воду, унося те молекулы, которые испарились из проступившей через поры воды. Аналогичным образом охлаждалась вода во фляге моих родителей. Машина затеняла флягу от солнца, а пронесшийся мимо воздух уносил испарившиеся молекулы воды, просочившейся через ее стенки.

Такой способ охлаждения можно использовать по-разному. Например, на пикнике в жаркий день можно поместить еду в пористую глиняную посуду, вдобавок предварительно смоченную водой. Тогда еда часами будет оставаться сравнительно холодной. Можно и самому почувствовать прохладу в жаркий день, если смочить одежду водой и стать в тенистое продуваемое место. Так можно даже простудиться!

Известно, что южноамериканская лягушка *Phyllomedusa sauvagii* удивительным образом использует испарение для понижения своей температуры. Обычно весь день она проводит с закрытыми глазами, но, когда в жаркий день ее температура становится выше 40 °С, лягушка периодически открывает и закрывает глаза. Открыв глаза, лягушка их выпучивает, и они охлаждаются с помощью испарения. Когда глаза закрыты, они втягиваются и прижимаются к мозгу, охлаждая его. Таким образом, эта лягушка способна охлаждать свой мозг за счет испарения жидкости из открытых глаз.

#### 4.62 • ПЬЮЩАЯ ПТИЧКА

Популярную игрушку «пьющая птичка» можно использовать и на уроках физики, и для развлечения. Птичка начинает раскачиваться, если смочить ее головку водой. Тогда она будет медленно наклоняться вперед, пока неожиданно не займет почти горизонтальное положение. После одного или двух таких наклонов птичка выпрямляется. Если поставить перед ней стакан воды, куда птичка может опускать клюв, она будет кланяться и кланяться очень долго. Что заставляет птичку двигаться? Можно ли заставить ее кланяться, не смачивая головку водой? Предположим, что такое возможно. Тогда птичка будет раскачиваться и при высокой влажности. Но если использовать воду, при высокой влажности птичка не захочет кланяться.

**ОТВЕТ •** Тельце птички (ее нижняя часть) заполнена легко испаряющейся жидкостью, обычно хлористым метилом (дихлорметаном,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ). Незаполненное пространство тельца и головки наполнено парами этой жидкости. Головка и клюв покрыты фетром. Шея

представляет собой длинную трубочку, идущую вниз от головки к тельцу. Птичка закреплена на горизонтальной оси на шее, между тельцем и головкой, и может свободно вращаться относительно ног и подставки.

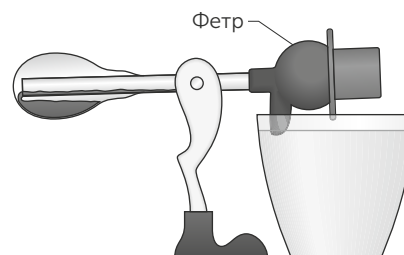


Рис. 4.8 / Задача 4.62. Пьющая птичка готова выпрямиться.

Когда головку смачивают, вода начинает испаряться в окружающий воздух. Поскольку испарение требует затраты тепловой энергии, фетр, головка и пары жидкости внутри нее охлаждаются. (Подув на головку, испарение можно сделать более интенсивным.) Вместе с температурой внутри головки уменьшается и давление. Поскольку область тельца, заполненная парами, с головкой непосредственно не связана, давление там оказывается выше давления в головке, и эта разность давлений заставляет жидкость постепенно подниматься по трубочке. Перетекшая жидкость утяжеляет головку птички и заставляет ее поворачиваться вокруг закрепленной на ногах оси. Вначале движение птички плавное, а потом она неожиданно проворачивается вперед, занимая почти горизонтальное положение. Затем птичка, слегка ударяясь о край стакана с водой или о ту часть ноги-опоры, которая ограничивает вращение, отскакивает обратно.

В тот момент, когда птичка занимает почти равновесное положение, нижний конец трубочки поднимается выше уровня жидкости в тельце. В этот момент две заполненные парами области оказываются связанными, и давление в них выравнивается. При движении вверх трубочка наклоняется, жидкость стекает обратно в тельце птички, прежнее распределение ее веса восстанавливается, и птичка до конца выпрямляется. Если при наклоне птичка погружает клюв в воду и вода просачивается через фетр на головке, птичка повторно наклоняется попить воды.

Есть несколько разных способов заставить птичку кланяться, не смачивая ее головку водой. Например, фетр можно смочить спиртом, испаряющимся даже при высокой влажности воздуха, но он может испортить фетр. А еще можно выставить птичку на яркое

солнце, затенив только ее головку и верхнюю часть шейки. Если вдобавок покрасить тельце черной краской, птичка начнет вам радостно кланяться.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 4.63 • БОЛЬШИЕ ПЬЮЩИЕ ПТИЦЫ

В 1960-х годах появилась идея, что большие «пьющие птички» — идеальное устройство для ирригации в условиях засушливого климата Ближнего Востока. (Патент на похожее устройство был получен еще в 1888 году.) Птиц предполагалось размещать вдоль канала с водой. Чтобы запустить устройство и начать полив, покрытую фетром голову птицы следовало смочить водой. После этого птица должна была наклониться вперед, а приделанный к ней ковш и труба — наполниться водой из канала, которую птица выливали бы на участок поля, находящийся выше уровня воды в канале. При каждом наклоне птица смачивала бы клюв в канале.

Для усиления экономического эффекта другой черпак можно было бы поместить с противоположного конца птицы, а ее саму поставить между двумя параллельными каналами. Тогда при раскачивании птицы взад-вперед воду можно было бы перекачивать из нижнего канала в верхний, расположенный на уровне поля.

А вот еще более смелое предложение. Предположим, что гигантскую «пьющую птицу» установили на мелководье у берегов Калифорнии. Веревками птица соединяется с зубчатыми колесами устройства на берегу. Непрерывно наклоняясь, птица макает клюв в воду, что заставляет колеса вращаться, а их движение преобразуется в электрическую энергию. Стая гигантских птиц, расположившихся вдоль береговой линии, может вырабатывать электроэнергию для целого штата.

Я решил не рекламировать эту идею после того, как один из моих сотрудников указал на таящуюся в ней опасность. На протяжении всей истории человечества люди боготворили источники энергии, такие как огонь и солнце. Угроза, исходящая из моего предложения, состояла в том, что могла вызвать появление культа поклонников «пьющих птиц». Выстроившись в ряд вдоль берега, они примутся кивать в унисон с птицами. Поскольку культов и так достаточно, я отказался от этой идеи.

### 4.64 • ТЕПЛОВАЯ ТРУБКА И КАРТОФЕЛЬНЫЕ КОЛЮЧКИ

Чтобы потратить меньше времени на приготовление в духовке куска свинины или крупной индейки, можно воткнуть в мясо снизу вверх и под углом *тепловую трубку*. Это приспособление состоит из полой запаянной трубки с пористой вставкой внутри. В трубку налить небольшое количество жидкости (например, воды). Нижний конец трубки — либо большой сплошной металлический цилиндр, либо кусок металла поменьше с несколькими ребрами. Кажется, что тепловая трубка устроена неправильно: непонятно, почему она внутри полая. Ведь она должна передавать тепло разогретой духовки внутрь мяса. Не лучше ли было бы для этой цели использовать сплошной металлический стержень?

Когда пекут картофель, многие хозяйки втыкают в клубни гвоздики (или металлические пруты), чтобы жар духовки попадал внутрь картофеля. Считается, что, поскольку металл проводит тепло гораздо лучше, чем картофель, воткнутый гвоздик позволит уменьшить время, необходимое для приготовления печеной картошки. Обычно на это требуется около часа. Почему же такие «картофельные колючки» позволяют уменьшить это время всего-то на несколько минут?

**ОТВЕТ •** Сплошной металлический стержень переносит тепло внутрь жарящегося куска мяса благодаря теплопроводности. Но это медленный процесс. Ускорить перенос тепла позволяет тепловая трубка. Когда мясо внутри еще холодное, тепловая трубка переносит тепло в несколько тысяч раз быстрее, чем сплошной металлический стержень того же размера.

Тепло передается быстро благодаря жидкости в трубке и устройству ее нижнего торчащего наружу конца. У него большая площадь поверхности, поэтому здесь интенсивно поглощается тепловая энергия, поступающая как от разогретого воздуха внутри духовки, так и благодаря тепловому излучению ее стенок. Постепенно жидкость внутри трубки превращается в пар, на что требуется большое количество энергии. Затем горячий пар поднимается по наклонной трубке в другой ее конец, где мясо холодное. Поскольку вокруг холодно, пар конденсируется, и при этом высвобождается тепловая энергия, затраченная на образование пара. Высвободившееся тепло расходится от трубки вглубь мяса. Одновременно конденсат спускается обратно в горячий конец либо по стенкам трубки, либо по пористой вставке. Когда жидкость вновь попадает



в горячую часть трубки, она превращается в пар, и цикл повторяется. Поскольку в процессах парообразования и конденсации участвует большое количество тепловой энергии, передача тепла в мясо происходит существенно быстрее, чем за счет теплопроводности сплошного металлического стержня.

Обычным «картофельным колючкам» не удастся существенно сократить время приготовления картошки, поскольку их торчащие наружу концы настолько малы, что очень медленно поглощают тепло от нагретой духовки. Если бы они были массивнее или на них были бы ребра, то скорее оправдали бы возлагаемые на них надежды.

#### 4.65 • ЗАПОТЕВШИЕ ЗЕРКАЛА

Почему, когда вы принимаете горячий душ в прохладной ванной комнате, зеркало или оконное стекло запотевают? Почему капельки жидкости сначала образуются в верхней части стекла? Почему стекло останется незапотевшим, если, перед тем как принимать душ, вы покроете его тонкой пленкой из мыла или моющего средства?

На зеркале можно оставить послание. Напишите его уголком куска мыла или обмакнув палец в любое другое моющее средство. Надпись будет почти не видна, пока вы не включите душ. Она проявится, как только стекло запотеет: покрытые мылом участки останутся чистыми.

Почему иногда на мостовой выступает вода, хотя дождя не было и вокруг везде сухо? Почему холодным зимним днем оконное стекло запотевают изнутри, а не снаружи? Из-за того, что в помещении влажность больше? Нет, обычно там влажность ниже. И поэтому у многих людей зимой возникает сухость кожи, а электростатические разряды чаще случаются зимой, а не летом.

**ОТВЕТ •** Количество водяного пара в воздухе обычно определяется как *относительная влажность*, соотношенная с предельно допустимым количеством пара в воздухе, так называемым *пределом насыщения*. Например, относительная влажность 50% означает, что количество пара в воздухе равно половине предельного значения. Когда принимают горячий душ в закрытом помещении, относительная влажность может стать равной 100%. В этом случае какая-то часть пара, продолжающая поступать в воздух из душа, будет конденсироваться, образуя капли воды на различных поверхностях, включая зеркало.

Еще одна причина, по которой на зеркале образуются капли, связана с тем, что в более холодном воздухе предел насыщения ниже. Если зеркало холодное, а вы принимаете душ, очень влажный воздух около него охлаждается, предел насыщения понижается, и часть пара конденсируется на зеркале. Обычно горячий влажный воздух из душа заполняет верхнюю часть комнаты. Поэтому процесс конденсации пара на зеркале начинается сверху.

Хотя зеркало может казаться чистым, оно покрыто пылью и тонкими пленками грязи (например, это может быть жир, попавший на зеркало, по которому провели пальцем). Конденсирующиеся молекулы воды притягиваются друг к другу сильнее, чем к грязи на зеркале. Взаимное притяжение заставляет их собираться в мельчайшие капельки, покрывающие зеркало и препятствующие четкому отражению.

Можно избежать образования мелких капелек, нанеся тонкий слой мыла на стекло. Мыло уменьшает поверхностное натяжение воды (оно определяется взаимным притяжением молекул воды), и поэтому вода тонким, равномерным слоем растекается по намывленному участку зеркала, где четкость отражения восстанавливается. Практически тот же эффект можно получить, проведя по зеркалу пальцем, смазанным моющим средством.

Иногда случается, что мостовые становятся влажными, когда вокруг все сухо. Это возможно, когда асфальт, отдавая тепло, остывает. Тогда воздух вблизи асфальта становится холоднее, и предел насыщения понижается. Это означает, что часть пара будет конденсироваться на мостовой.

#### 4.66 • ЗАПОТЕВАНИЕ СТЕКОЛ ОЧКОВ

Почему, когда в холодную погоду человек в очках входит в теплую комнату, на линзах образуются капельки воды? Почему капельки воды через какое-то время исчезают, даже если линзы не протереть? Где прежде всего стекла станут чистыми?

Почему линзы запотевают, когда из помещения, где поддерживается обычная комнатная температура, вы входите в парную? Зависит ли место, где начинают отпотевать линзы, от материала, из которого сделана оправка?

**ОТВЕТ •** В обоих примерах линзы охлаждаются соседним с ними воздухом, в результате чего понижается *предел насыщения* воздуха и часть водяного пара



конденсируется на линзах (см. предыдущую задачу). Сконденсированная жидкость образует мелкие капельки, и линзы запотевают. Это значит, что капельки настолько меняют прозрачность линз, что изображение становится нечетким.

Когда в холодную погоду человек входит с улицы в теплую комнату, капельки воды сначала исчезают на оправе вблизи носа. Излучая тепло, нос подогревает часть оправы благодаря теплопроводности через носовые упоры или по воздуху, и путем конвекции, когда нагретый телом человека воздух поднимается вверх. Тепло затем передается линзам, нагревает их, капельки воды превращаются в пар, и линзы отпотевают.

Когда человек входит в парную, отпотевание происходит по-другому, поскольку разность температур между воздухом и линзами больше. В этом процессе нос уже не играет столь существенной роли; капельки воды, образовавшиеся на стеклах, важнее. Когда водяной пар конденсируется в жидкость, молекулы воды теряют некоторое количество энергии. В парной эта выделившаяся энергия разогревает и линзы, и оправу. Однако температура возрастает быстрее вблизи центра стекол, поскольку обычно *теплопроводность* оправы больше (требуется больше энергии, чтобы ее температура увеличилась). Другой источник поступающего на стекла тепла — конвекция горячего воздуха парной вдоль стекол очков.

Если бы линзы были плоскими, отпотевание началось бы в центре и постепенно распространялось бы к оправе. Выпуклые линзы лучше обдуваются воздухом, что ускоряет отпотевание в центре. Центр вогнутых линз хуже обдувается теплым воздухом и поэтому нагревается медленнее. Если линзы вогнуты очень сильно, отпотевание может начаться и вблизи оправы, несмотря на ее большую теплопроводность.

#### 4.67 • КАК МОЖНО ЗАПАСТИСЬ ВОДОЙ В ПУСТЫНЕ

Как жук *стенокара* из семейства *чернотелок*, обитающий в пустыне Намиб в юго-западной части Африки, добывает питьевую воду, когда рано утром на землю опускается туман? Как люди, живущие в пустыне Атакама на севере Чили, собирают воду из воздуха, приходящего со стороны Тихого океана?

**ОТВЕТ** • Жуки-чернотелки из рода *Stenocara* взбираются на песчаную дюну с наветренной стороны и, наклонившись, принимают характерную позу: голова

опущена вниз, а брюшко поднято вверх, так что спинка жука образует наклонную плоскость. Надкрылья, прикрывающие брюшко, покрыты неровными рядами выпуклых бугорков. У этих бугорков *гидрофильная* поверхность, то есть они могут связывать молекулы воды. Понижения между выпуклостями покрыты воскоподобным веществом, а значит, у них *гидрофобная* поверхность, то есть с ними молекулы воды не связываются. На бугорках мельчайшие капельки тумана собираются в капли. Пока капля небольшая, гидрофильные взаимодействия, удерживающие каплю на выпуклости, превышают силу тяжести, из-за которой капля скатывается по наклоненному телу жука. Постепенно капля растет и наконец отрывается от выпуклости. Капли движутся между рядами бугорков, как по извилистому каналу, постепенно скатываясь вниз, пока не достигнут рта стенокары.

Чтобы собрать воду из надвигающегося со стороны океана тумана, жители пустыни Атакама используют «туманоуловители» — мелкочаеистые сети, на которых конденсируется вода. Мелкие капли сливаются, растут, становятся все тяжелее и соскальзывают вниз в желоб, а по нему стекают в водосборники. За день удается таким образом набрать до 11 000 литров воды, и этого хватает на всю деревню.

Похоже, некоторые каменные строения, не так давно обнаруженные на Крымском полуострове, были конденсатными ловушками и служили для сбора воды во время влажных ночей. После захода солнца камни отдают тепло ночному небу в виде инфракрасного излучения. Ясной ночью они, вероятно, отдают больше энергии, чем получают, и поэтому остывают, а их температура становится ниже температуры воздуха. Водяной пар, соприкасаясь с относительно холодными камнями, конденсируется и образует капли. Капли растут и постепенно достигают такого размера, что отрываются от удерживающей их поверхности и стекают либо в углубление, где собирается вода, либо, пройдя по трубе, собираются в центральном бассейне. Такой способ сбора воды был, по-видимому, малоэффективным.

В некоторых книгах по выживанию в экстремальных ситуациях предлагается следующий способ добычи воды. На солнечном месте надо вырыть в земле или песке яму. Банку без крышки поместить в центр ямы и накрыть яму пленкой, в середину которой положить камешек, чтобы это место провисло и оказалось прямо над банкой. Край пленки вокруг ямы засыпать землей или заложить камнями. Когда это сооружение, чем-то

напоминающее теплицу, нагревается солнечными лучами, вода испаряется из почвы на дне ямы. После захода солнца яма остывает, на обратной стороне пленки конденсируется водяной пар и образуются капли. Став достаточно большими, они скатываются вниз по пленке и падают в банку. Когда в банке соберется достаточно воды, ее можно пить. Чтобы влаги было больше, в яму можно бросить кактус, предварительно измельчив его.

Рассказы о естественных водоемах без источников, где вода собирается в результате конденсации влаги из атмосферы, — миф. Влага в атмосфере не так много, чтобы образовывались водоемы, способные обеспечить водой людей и животных.

#### 4.68 • ТРЕЩИНЫ НА ГРЯЗИ

Почему на высохшей грязи появляются трещины? Как правило, такие трещины сначала перпендикулярны друг другу. Почему затем из этих трещин могут образоваться многоугольники (тогда грязь будет напоминать кафельный пол) и почему иногда края такого многоугольника заворачиваются вверх? Бывает, что верхний слой грязи сворачивается в трубочку, отрывается и укатывается в сторону.

Почему иногда после дождей на дне пересохших водоемов образуются гигантские многоугольники? Они могут достигать 300 м в диаметре, а образующие их разломы имеют до метра в ширину и до пяти метров в глубину.

**ОТВЕТ •** Плоский слой грязи начинает высыхать с поверхности. При этом верхний слой грязи сжимается и в нем возникают механические напряжения. Выделим на поверхности высыхающей грязи какую-то область. Ей бы надо сжаться, но ее растягивает окружающая грязь. Однако низ высыхающего слоя грязи удерживается на месте находящейся под ним почвой. В случайных точках на поверхности грязи напряжения становятся настолько большими, что поверхность растрескивается, уменьшая тем самым напряжения. Такие трещины затем растут и в длину по горизонтали, и вертикально вниз. Там, где развивающаяся трещина подходит к уже существующей трещине, поверхностные напряжения ее разворачивают так, чтобы трещины пересеклись под прямым углом (рис. 4.9а), поскольку максимальные напряжения, раскрывающие трещину, направлены параллельно уже существующей трещине. После завершения начальной стадии формирования трещин развивается вторичная система трещин

на грязи. Эти трещины начинаются как прямые линии, но затем, углубляясь, они начинают *ветвиться* (расщепляться), как показано на рис. 4.9б. В зависимости от скорости, с которой высыхает грязь, пересечение вторичных трещин с трещинами, образовавшимися на первой стадии, приводит к делению высыхающей поверхности грязи на многоугольники.



**Рис. 4.9 / Задача 4.68.** а) Развивающаяся трещина пересекается под прямым углом с уже существующей трещиной. б) Развивающаяся трещина разветвляется и завершает образование многоугольника.

Если верхний тонкий слой многоугольника из грязи высыхает быстро, он сжимается. Сжатие может привести к заворачиванию краев этого слоя вверх, так что сам он становится вогнутым. Когда края слоя поднялись, слой начинает сохнуть снизу. В результате он может вообще скрутиться в трубку. В редких случаях верхняя поверхность грязевых многоугольников сохнет медленнее, чем нижняя, соприкасающаяся с грязью. Такое возможно, например, когда вода из грязи быстро стекает по склону. Тогда края многоугольника могут *завернуться вниз*.

Похоже, гигантские многоугольники образуются по тем же причинам, что и небольшие грязевые многоугольники.

Трещины и многоугольники на грязи — примеры растрескивания, вызванного *усыханием* (высушиванием). Можно привести много других примеров, например усыхание краски, смеси кукурузного крахмала с водой или смеси кофе с водой. Если провести эксперименты со смесью воды с крахмалом или кофе, обнаружится, что характерный размер многоугольника зависит от толщины слоя. Чем тоньше слой, тем меньше многоугольник. Если же слой становится совсем тонким, вместо многоугольников образуются мелкие, расположенные хаотично трещинки. Можно изменить «узор» из трещин, смазав жиром дно контейнера с высыхающей смесью, что уменьшит трение между смесью и контейнером. А чем меньше трение, тем меньше возникающие напряжения и тем меньше образуется трещин.

#### 4.69 • ВЗДУВШИЕСЯ УПАКОВКИ В САМОЛЕТЕ

Бывает, что в самолете вам приносят продукты, у которых повреждена упаковка. Например, маленькая порционная упаковка сливок для кофе может оказаться вскрытой вдоль края крышечки. Если сливки закрыты, обратите внимание, что крышечка упаковки выпячена. Когда самолет начинает садиться, вздутие постепенно исчезает. По какой причине упаковка сливок открывается или выпячивается во время полета?

По той же причине неопытный путешественник может попасть в трагикомическую ситуацию, если во время утомительного полета встряхнет закрытую баночку с соком, а затем быстро, повернув отверстием к себе, откроет ее. Вполне вероятно, что сок выплещется и окатит его с головы до ног. Бывалый путешественник знает, что открывать баночку надо медленно, отвернув отверстие от себя.

Почему иногда при наборе высоты болят уши? Почему при посадке самолета иногда кажется, что уши заложило?

**ОТВЕТ •** Давление в салоне самолета поддерживается, но все же оно меньше давления на земле. Поэтому, когда самолет взлетает, воздух или другой газ внутри мягких порционных упаковок со сливками, соком или заправкой для салата должен увеличить свой объем. Иногда это приводит к тому, что упаковка вскрывается. Если упаковка сока или заправки для салата не нарушена, когда баночку встряхивают, ее содержимое покрывает крышечку изнутри. Если после этого быстро сорвать крышечку, газ внутри упаковки, расширяясь, вырвется из отверстия вместе со всем содержимым.

Неприятные ощущения в ушах во время полета связаны с давлением воздуха в среднем ухе. Среднее ухо — полость за барабанной перепонкой. Обычно давление в среднем ухе совпадает с давлением окружающей среды. Равенство давлений достигается благодаря евстахиевой трубе — каналу, соединяющему полость среднего уха с глоткой. Однако если при взлете самолета, когда внешнее давление на барабанную перепонку снижается из-за понижения давления воздуха в салоне, евстахиева труба не открывается, внутреннее давление остается таким же, как на земле. Из-за разности давлений барабанная перепонка выгибается наружу. Зевая или глотая, боли в ушах можно избежать, поскольку тем самым вы открываете евстахиеву трубу и давление в среднем ухе падает.

Когда самолет снижается, давление в салоне увеличивается и постепенно становится равным давлению

на уровне земли. Теперь разность давлений вдавливает барабанную перепонку. С этим справиться не так просто: пониженное давление в среднем ухе держит евстахиеву трубу закрытой. Но все же, если еще более энергично зевать и глотать, евстахиева труба может открыться, что позволит давлению в среднем ухе возрасти и сравняться с давлением на земле.

Пониженное давление в самолете может стать причиной и других неприятностей. Так как обычно в багажном отделении давление не поддерживается, упакованные в чемодан бутылки и даже кажущиеся прочными жестяные банки могут самопроизвольно откупориться.

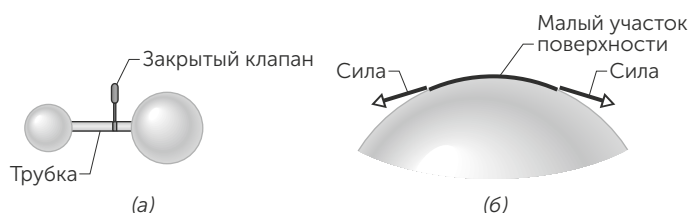
#### 4.70 • ВЫДУВАЕМ ПУЗЫРИ И НАДУВАЕМ ВОЗДУШНЫЕ ШАРЫ

Почему, когда вы начинаете надувать круглый резиновый воздушный шар, процесс идет трудно сначала, но потом, когда шар уже частично надут, становится гораздо легче? Почему, когда вы надуваете продолговатый воздушный шар, он начинает раздуваться в каком-то определенном месте, а не по всей длине? Почему, если продолжать надувать такой шар, вздутие будет перемещаться вдоль «колбасы»?

Предположим, что два мыльных пузыря разного радиуса соединены трубочкой, у которой есть закрытый клапан (рис. 4.10а). Что произойдет, если открыть клапан и позволить воздуху перетекать из одного шарика в другой? Что случится, если мыльные пузыри заменить воздушными шарами и открыть клапан?

**ОТВЕТ •** Раздувая сферический мыльный пузырь, мы увеличиваем давление воздуха в нем в сравнении с тем, которое там уже есть. Давление воздуха внутри пузыря зависит от кривизны его поверхности. Чтобы понять это, рассмотрим небольшой участок поверхности пузыря (рис. 4.10б). Соседние участки поверхности растягивают его в разные стороны. Равнодействующая растягивающих сил слева и справа, которые сами по себе от растяжения оболочки не зависят, направлена к центру пузыря, и именно она определяет давление воздуха в нем. Когда шарик маленький, он сильно искривлен, равнодействующая сила велика, и давление внутри пузыря тоже большое. Такой пузырь раздуть трудно. Когда пузырь становится больше, его кривизна уменьшается, направленная к центру сила становится меньше, а значит, меньше и давление внутри. Такой пузырь выдуть легче.

С резиновым воздушным шаром дело обстоит иначе: растяжение его оболочки требует увеличения давления. Когда вы надуваете такой шар, оболочка сопротивляется растяжению, что повышает давление, необходимое для дальнейшего увеличения размера шара. Однако, когда он достигает определенного размера, последующее уменьшение кривизны настолько понижает давление внутри шара, что дальше надувать его становится легче. Кроме того, примерно при том же размере шара у резины уменьшается сопротивление растяжению, что также помогает надувать шар дальше. Однако, когда шар станет гораздо больше, сопротивление растяжению оболочки опять сильно возрастает.



**Рис. 4.10 / Задача 4.70.** а) Два мыльных пузыря (или шарика) на трубке, закрытой клапаном. б) Силы слева и справа от малого участка поверхности пузыря.

Некоторые изначально идеально сферические резиновые шары, раздувшись до определенного размера, могут заметно отличаться от сферы. Вскоре после того, как надувать шар становится легко, и перед тем, как это опять станет трудно из-за того, что резина слишком растянута, с одной из его сторон может появиться заметное вздутие. По этому поводу М. Дж. Севелл из Университета Рединга заметил: «Даже если природе предложить сферу, не на всех этапах накачивания она выбирает ее».

Когда надувают продолговатый шар, он сначала раздувается в самой слабой точке, обычно совсем рядом с отверстием, через которое поступает воздух. Область на поверхности пузыря, соединяющая выпуклость с еще не надутой частью, вогнута. Когда в пузырь поступает дополнительный воздух, растяжение вогнутой части помогает раздуть «колбасу» в этом месте, и таким образом передний край выпуклости движется вдоль шара.

Когда два пузыря соединены открытой трубкой, высокое давление в маленьком пузырьке проталкивает воздух через трубку в пузырь большего радиуса, где давление меньше. Поэтому маленький шарик схлопывается, а большой раздувается. Как правило, так

ведут себя пузырьки углекислого газа в пенной шапке, но обычно этого не замечают. Конечно, там пузырьки не соединены трубками, но углекислый газ может *диффундировать* (распространяться) через стенки из одного пузырька в другой. Меньшие пузырьки теряют газ, передавая его соседнему пузырьку большего размера, и постепенно схлопываются. Этот процесс известен как *оствальдовское созревание*. Поскольку скорость диффузии азота гораздо меньше скорости диффузии углекислого газа, в пене пива, где азот используют вместо углекислого газа, пузырьки существуют гораздо дольше.

Если пузырьки заменить резиновыми шариками, результат может оказаться иным. В зависимости от суммарного количества воздуха в них либо их радиусы сравняются, либо один шарик станет больше другого.

#### 4.71 • КАК ПЕЧЬ ПИРОГИ В ГОРАХ

Почему, если вы печете бисквитный торт «Пицца ангелов» высоко в горах, рецепт надо изменить, добавив еще муки и воды?

**ОТВЕТ •** Бисквит поднимается как благодаря расширению пузырьков воздуха, захваченных взбитым маслом, так и за счет образования пара при испарении воды (часть воды содержится в яйцах). Поскольку на высоте атмосферное давление ниже, пузырьки воздуха могут настолько увеличиться в размере, что прочности внутренней структуры бисквита окажется недостаточно и он развалится. Избежать этого можно, уменьшив количество сахара, размягчающего бисквит. Но тогда он будет более жесткий и менее сладкий. Другое решение — увеличить количество муки, что сделает бисквит более прочным. Можно уменьшить и количество разрыхлителя, тогда будет образовываться меньше пузырьков.

На высоте вода кипит при более низкой температуре, чем на уровне моря. Это значит, что, если бисквит пекут в горах, испарение происходит легче и торт теряет больше воды. Чтобы восполнить эти потери, рецепт надо скорректировать — добавить еще воды.

#### 4.72 • ШАМПАНСКОЕ В ТОННЕЛЕ

В ноябре 1872 года в Лондоне было завершено строительство тоннеля под Темзой. Высокопоставленные гости спустились вниз, чтобы отпраздновать это событие. Поскольку при строительстве тоннель держали под давлением (чтобы не дать просочиться воде из почвы под рекой), гости сначала вошли в тамбур, где давление

воздуха поднималось до тех пор, пока не сравнялось с давлением в тоннеле. Внутри тоннеля в честь окончания работ открыли шампанское, но, к удивлению гостей, оно совсем не пенилось. После торжественной части гости покинули тоннель через тот же тамбур.

Когда давление в шлюзе понизилось до обычного атмосферного давления, приглашенные почувствовали сильное недомогание, а одного из гостей потребовалось срочно отправить обратно в тамбур, где повторно повысили давление. Что же пошло не так?

**ОТВЕТ •** Когда открывают бутылку с шампанским, растворенная в нем углекислота выходит в виде пузырьков углекислого газа (образуется пена). До того содержимое бутылки находится под большим давлением, и углекислый газ вблизи пробки над поверхностью вина находится в равновесии с углекислотой в растворе. Поэтому в среднем количество молекул углекислоты, покидающих раствор, равно количеству молекул углекислого газа, покидающих пространство под крышкой и растворяющихся в вине. Однако как только бутылку открывают, давление углекислого газа понижается и на какое-то время нарушается равновесие между углекислотой в растворе и углекислым газом над вином. Поэтому число молекул углекислоты, покидающих раствор, становится больше числа возвращающихся молекул углекислого газа. Конечно, при этом сразу возникает поток пузырьков — паров углекислого газа, окруженных жидкой пленкой.

Так происходит при нормальных условиях, но в тоннеле высокое давление затруднило образование пузырьков. Поэтому большая часть углекислоты осталась в растворе. Когда гости пили шампанское, они проглотили большое количество растворенной в нем углекислоты. После того как они покинули тамбур, давление воздуха стало ниже, чем в тоннеле, и растворенная в шампанском углекислота вышла из раствора. Углекислый газ заполнил внутренние органы, у некоторых это вызвало отрыжку. Гораздо хуже было тем, у кого углекислый газ заполнил желудок.

Еще недавно при сооружении тоннелей под реками и заливами строителям приходилось работать в условиях высокого давления. Когда заканчивалась смена и они возвращались на поверхность, им приходилось проходить процедуру декомпрессии, во многом сходную с той, которую проходят глубоководные водолазы. Дело в том, что, когда человек вдыхает воздух под давлением, молекулы азота из воздуха попадают

в кровь. При выходе из той части тоннеля, где давление высокое, туда, где давление меньше, азот получает возможность образовывать пузырьки. Эти пузырьки собираются в сгустки, когда двигаются с кровотоком по большим венам (к сердцу). Двигаясь от сердца, они попадают в небольшие кровеносные сосуды и блокируют их. Эти пузырьки могут стать причиной сильных болей, длительной болезни или даже смерти.

В наши дни тоннели прокладывают с помощью управляемых на расстоянии буровых установок, и рабочим приходится гораздо реже спускаться в участки тоннеля с высоким давлением. А в некоторых случаях тоннели вообще не бурят, а собирают из готовых секций, которые опускают на дно реки и подгоняют друг к другу.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 4.73 • ЯЗЫК В БУТЫЛКЕ

Одна маленькая девочка решила допить из бутылки шоколадный напиток. Она засунула в бутылку язык, а потом сделала глубокий вдох. Девочка надеялась, что жидкость потечет ей в рот. Но из-за того, что воздуха в бутылке стало меньше, давление в ней уменьшилось и язык застрял. Причин могло быть две: либо при вдохе девочка втянула в себя слишком много воздуха, либо, засовывая туда свернутый трубочкой язык, она вытолкнула какую-то часть воздуха из бутылки. Как бы то ни было, разница давлений воздуха внутри бутылки и снаружи не позволяла девочке вытащить язык. Ничего не смог сделать и медперсонал в отделении скорой помощи, куда обратились родители девочки. Язык удалось вытащить только с помощью профессионального стекольщика — он разрезал стекло.

### 4.74 • ГРОЗА ЗИМОЙ

Почему зимой грозы с громом и молниями менее вероятны, чем летом?

**ОТВЕТ •** Грозы возникают, когда нижняя часть атмосферы нестабильна, то есть когда за счет выталкивающей силы вверх быстро движутся значительные объемы теплого воздуха (теплый воздух легче холодного). Так происходит, когда температура резко меняется с высотой: теплый воздух вблизи земли выталкивается вверх в область более холодного воздуха.



Однако, если воздух содержит водяной пар, для наступления грозы изменение температуры с высотой может и не быть столь резким. Дело в том, что часть пара в поднимающемся воздухе конденсируется и образуются капли воды. Переход пара в жидкость происходит с выделением большого количества энергии. При этом воздух нагревается, и действующая на данный объем воздуха выталкивающая сила ускоряет его подъем. Это создает предпосылки для развития неустойчивости и грозы.

Обычно зимой температура с высотой уменьшается постепенно, а воздух вблизи земли слишком холодный, чтобы содержать большое количество водяного пара. Поэтому маловероятно, что значительные объемы воздуха будут с ускорением двигаться вверх. А это означает, что воздух достаточно стабилен и условий для развития грозы нет. Однако бывало, что я слышал гром во время снежной бури.

#### 4.75 • ДЫМ ИЗ ТРУБЫ

При порывистом ветре форма идущей из трубы струи дыма непрерывно хаотически меняется. Но что происходит, если ветер дует с постоянной во времени и одинаковой по высоте скоростью? Не будет ли струя дыма, расширяясь, подниматься вверх под некоторым углом к вертикали? Странно, но так происходит не всегда. Дымовая струя может выглядеть так, как изображено на рис. 4.11а. Чем определяется ее форма? Почему на ветру некоторые наклоненные струи дыма делятся надвое (рис. 4.11б)?

В безветренный день струя дыма, как правило, поднимается и расходится в горизонтальном направлении, напоминая узкую букву V, стоящую прямо. Почему же струи дыма, выходящие из некоторых труб, сначала сужаются, а потом расширяются?

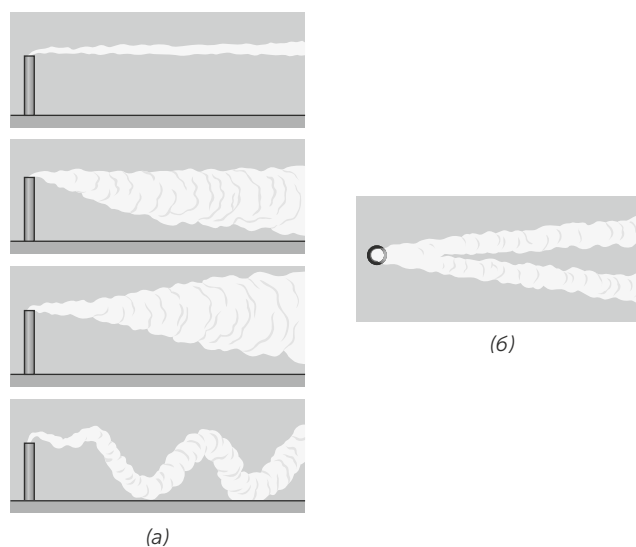
**ОТВЕТ •** Вырывающийся из труб промышленных предприятий газ и дым\*, который он увлекает с собой, устремляются вверх. Газ будет и дальше подниматься, только если он горячее окружающего воздуха. Разность температур обеспечивает разность плотностей, а она — архимедову силу, ускоряющую движение газа вверх. В других трубах, включая домашние каминные трубы, газ поднимается за счет такого же механизма.

Бывает, что даже если изначально газ горячее воздуха, двигаясь вверх он не может, поскольку при

\* Дым — это летучие продукты горения с мелкими несгоревшими частичками. *Прим. пер.*

подъеме газ остывает. Температура газа понижается из-за уменьшения давления воздуха с высотой. Рассмотрим небольшой объем газа. Чтобы скомпенсировать понижение давления, газ должен расшириться. Расширяясь, газ совершает работу, для чего отбирает энергию у хаотически двигающихся молекул газа. Отдавая энергию, молекулы замедляются, газ остывает. Если температура газа опускается ниже температуры воздуха, архимедова сила становится меньше веса, и газ вынужден опускаться.

Вода, содержащаяся в газе, также влияет на его поведение при подъеме. Если газ остывает ниже температуры конденсации, из водяного пара образуются капли. Переход из пара в жидкость происходит с выделением энергии, что способствует разогреву газа, несмотря на то, что он расширяется. Сходные рассуждения можно привести и для движущегося вниз газа. В этом случае повышающееся давление приводит к сжатию газа и его разогреву. Чтобы газ продолжал опускаться, он должен оставаться холоднее воздуха.



**Рис. 4.11 / Задача 4.75.** а) Струи дыма из высокой трубы при постоянном ветре, дующем в горизонтальном направлении. б) Вид сверху на разделившуюся струю дыма.

Соотношение температур газа и воздуха определяет, будет газ опускаться или подниматься, но при ветре форма струи, изгибающейся на ветру, зависит от турбулентности (завихрений) воздуха. Если турбулентные вихри мелкие, двигаясь от трубы, струя постепенно расширяется. Если завихрения крупные, струя может образовывать петли. На самом деле это не совсем

петли: каждый выделенный объемчик газа движется почти по прямой линии, а не вверх или вниз. Появление петель связано с тем, что благодаря турбулентности расположенные рядом объемчики газа двигаются вдоль разных прямых линий.

В качестве примера рассмотрим струю в форме конуса. Она образуется, когда при движении вверх температура газа быстро становится ниже температуры воздуха, а при движении вниз — быстро становится выше температуры воздуха. В результате часть газа остается примерно на уровне трубы. Однако умеренная турбулентность непрерывно перемешивает газ по вертикали. Струя дыма стелется, расширяясь наподобие веера, если в данный момент температура воздуха возрастает с высотой. Это называется *температурной инверсией*. В этом случае слой «захваченного» газа уже, а турбулентность может перемешивать его только по горизонтали. Впрочем, особо горячие порции газа могут прорваться вверх, образуя боковые струи.

Струя может разделиться надвое из-за того, что в центре трубы газ поднимается быстро, а вдоль ее стенок — медленнее. Когда струя выходит из трубы, газ начинает циркулировать, двигаясь вверх в центре и вниз по краям. Этот вихрь расщепляет струю, а затем ее разделенные части распространяются по ветру в разных направлениях.

Когда газ из трубы выходит медленно (например, когда выходное отверстие трубы камина широкое, а огонь в нем не слишком сильный), струя сначала сжимается и набирает скорость, а затем расширяется, приобретая V-образную форму. Фактически форма струи дыма такая же, как и у спокойно текущей из крана струи воды, но только струя дыма направлена вверх.

#### 4.76 • ДЫМОВЫЕ СИГНАЛЫ И ГРИБОВИДНОЕ ОБЛАКО

Индейцы знают, как, контролируя дым костра, передавать сигналы на большое расстояние. Чтобы костер хорошо дымил, в него надо подбросить хворост, а затем на короткое время накрыть мокрым одеялом. Если затем одеяло убрать, вверх взметнется столб дыма, который можно будет увидеть издали. Почему, если сигнал подают рано утром или под вечер, дым, достигнув определенной высоты, начинает стелиться горизонтально? В этом случае струя дыма напоминает шляпку гриба или ядерный гриб.

Австралийские аборигены тоже умеют использовать костры для передачи сигналов, но они не накрывают

костер одеялом, а приподнимают горящие поленья длинными жердями. В то время как несколько человек заняты этим, другие подбрасывают в костер хворост. При подъеме горящих поленьев увеличивается поток воздуха, проходящий через огонь, костер разгорается, а добавленный хворост позволяет получить много дыма. У них сигнальный дым также принимает форму шляпки гриба. Более того, тщательно координируя свои действия, туземцы могут отправить вверх шесть таких «шляпок», расположенных строго одна над другой. Как туземцы контролируют высоту, на которой будет появляться каждая из таких «шляпок»?

Почему при сильных взрывах, включая наземные и подземные ядерные взрывы, образуются грибовидные облака?

**ОТВЕТ •** Клубы дыма стелются горизонтально на той высоте, где газ, переносимый дымом, охлаждается до температуры окружающего воздуха (см. предыдущую задачу). Появление шляпки гриба наиболее заметно, когда имеет место *инверсия* температуры воздуха, то есть температура воздуха возрастает с высотой. Такое может произойти утром или вечером, когда земля остывает. Австралийцы контролируют высоту каждой из «шляпок» по интенсивности горения костра. Когда температура пламени повышается, клубы дыма и горячий газ поднимаются выше.

Во время Второй мировой войны дымовые завесы использовались для маскировки различных объектов, например фабрик. Ночью, особенно при ярком лунном свете, они помогали защитить их от воздушных бомбардировок. Плотный, маслянистый дым черного цвета получали от сгорания дизельного топлива в устройствах, аналогичных тем, которые используют, укрывая дымом сады во время сильных заморозков. Не слишком горячий дым поднимался незначительно, выходя из высокой трубы топки. Таким образом, в безветренную погоду образовывался тонкий горизонтальный слой дыма, способный скрыть объект.

При ядерном взрыве образуется раскаленный огненный шар, стремительно разогревающий воздух. Затем этот воздух быстро поднимается, увлекая за собой вверх воздух приземного слоя, грязь, мусор и капельки воды, из которых образуется ствол грибовидного облака. Как и в случае костра, поднявшийся воздух со временем остывает до температуры окружающего воздуха, а затем разносится в горизонтальном направлении, формируя шляпку гриба.

#### 4.77 • ОГОНЬ В КАМИНЕ

Почему никогда не удается разжечь хороший огонь, укладывая щепки вокруг одного полена? Почему поленьев должно быть по крайней мере два, а лучше три? Почему, пока поленья горят, их надо время от времени ворошить? Почему огонь в камине обогревает комнату? Почему плохой камин дымит, то есть дым от такого камина идет в комнату, а правильно сложенный камин не дымит?

В чем смысл стеклянного экрана, прикрывающего топку камина? Как следует складывать поленья для лучшего обогрева комнаты?

**ОТВЕТ** • Поверхность бревна начинает гореть, когда ее температура поднимается выше некоторого определенного значения — *температуры возгорания*. Горящие щепки могут поджечь бревно с одной стороны, но, когда они прогорят, инфракрасное излучение с поверхности бревна и конвекция горячих газов вверх от бревна скоро понизят температуру его поверхности ниже температуры горения. Чтобы поддержать горение, необходимо расположить вблизи него еще по крайней мере одно полено, а лучше два. В этом случае их горящие поверхности благодаря излучению, конвекции горячих газов и передаче тепла по воздуху разогревают друг друга, и их температура остается выше температуры горения.

Именно так следует разжигать костер. Но огонь в камине горит не в открытом пространстве — частично он окружен стенками. Газ и горячие кирпичи пода\* камина создают инфракрасное излучение, направленное на горящую поверхность бревна, благодаря чему оно остается достаточно горячим. С другой стороны, стенки камина могут ограничивать количество кислорода, необходимого для поддержания горения. В идеальной ситуации достигается равновесие между количеством тепла, выделяемого при горении, и потерями энергии путем конвекции горячих газов, уходящих в трубу (хорошо, если не в комнату), теплопроводностью через заднюю стенку камина и теплом, излучаемым в комнату. Огонь разгорается, если подбросить в камин дров или если усиливается направленный в камин и выходящий через трубу поток воздуха.

Комната обогревается главным образом благодаря тепловому излучению, проходящему через просветы

\* Под — элемент конструкции печи или камина, на который кладут горящий материал, в нашем случае — бревна или уголь. *Прим. пер.*

между поленьями. Поленья время от времени ворошат, чтобы несгоревшие участки были направлены в пространство между поленьями. Тогда часть горячей поверхности поленьев будет повернута к жерлу камина и какое-то время именно эти участки поленьев будут отдавать тепло комнате. В то же время, попав внутрь камина, загорятся новые участки поверхности поленьев.

Горячий воздух и продукты горения устремляются вверх в трубу и проходят через сужение трубы, ширина которого контролируется *заслонкой*. Движение вверх происходит под действием выталкивающей силы: из-за высокой температуры воздух в трубе легче воздуха как в комнате, так и на улице. Чем выше труба, тем лучше в ней тяга, поскольку это позволяет и воздуху, и газам приобрести большее ускорение до того, как они достигнут ее конца. Если снаружи дует ветер, он уносит выходящий воздух и газы, увеличивая тягу. Из трубы с плохой тягой дым выходит клубами, а на место вырвавшегося из трубы горячего воздуха в нее сверху затекает холодный воздух с улицы.

Дым из трубы может попадать в комнату по нескольким причинам. Среди них есть, например, такая. Когда воздух втягивается в камин, он отражается от стенок и, захватывая дым, проходит над огнем обратно в комнату. Внутренняя часть правильно построенного камина высокая, так что его передняя стенка может остановить эту циркуляцию. Если заглушка или играющая ее роль часть трубы открыты слишком широко, обратный поток воздуха с улицы может привести к попаданию дыма в комнату. Когда огонь в камине слабый или сам камин непропорционально большой, скорее всего, дело именно в этом.

Поскольку камин обогревает комнату главным образом благодаря тепловому излучению, его заднюю и боковые стенки обычно делают наклонными, чтобы отраженное излучение уходило в комнату. Излучение будет более направленным, если поленья сложить на подставке так, чтобы между ними были просветы, причем большое полено должно быть сзади, а поленья меньшего размера сверху и по бокам. В этом случае огонь остается внутри сложенного «домика», а тлеющих угольков больше со стороны комнаты, чем со стороны задней стенки камина.

Чтобы дрова в камине горели, к ним должен поступать воздух из комнаты. Вместе с воздухом из помещения уходит тепло. Потери тепла можно снизить, загородив камин экраном из огнеупорного стекла. Такое

стекло позволяет видеть горящие дрова; оно не задерживает излучаемое внутрь тепло, одновременно затрудняя поступление теплого воздуха из комнаты. А огонь поддерживается воздухом, проходящим через отверстие на уровне пола, где в комнате самый холодный воздух.

В некоторых каминах при потушенном огне может образоваться обратный поток воздуха в комнату. Обычно такие камины защищены от прямого попадания солнечных лучей, поэтому воздух в них холоднее нагретого солнцем воздуха на улице. Холодный воздух в трубе камина плотнее и тяжелее воздуха снаружи. Он опускается вниз по трубе, попадает в комнату, выдвигая наружу воздух из комнаты либо через открытые двери и окна, либо через щели вокруг них.

#### 4.78 • ПЛАМЯ СВЕЧИ

Как горит свеча? Откуда поступает к ней горючее? Почему пламя свечи в основном желтое, а по краям оно обычно голубое (рис. 4.12)? Почему между фитильком и желтой частью пламени имеется темный конус? Почему сажа от свечи черная, хотя от догорающей свечи поднимается белый пар?

**ОТВЕТ** • Твердым горючим для свечи является либо парафин, либо стеарин (стеариновая кислота), либо смесь того и другого. Тепло от пламени поглощается материалом свечи (положим, это парафин). Парафин плавится и превращается в жидкость. Под действием капиллярных сил жидкость движется по фитилю вверх. Поднимаясь по фитилю и нагреваясь от пламени свечи, жидкий парафин переходит в газообразное состояние, а затем уносится вверх и от свечи потоком горячих газов (конвекция).

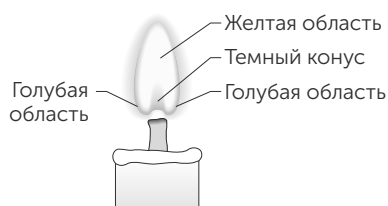


Рис. 4.12 / Задача 4.78. Структура пламени свечи.

Некоторые углеводороды, выделяющиеся при переходе в газообразное состояние, поднимаются и образуют темный конус непосредственно над фитильком, но их температура, вероятно, не превышает 600–800 °С.

Для горения этих углеводородов необходим кислород, но кислород должен *диффундировать в пламя* (распространяться по пламени), а в область темного конуса его попадает недостаточно. Итак, углеводороды в темном конусе интенсивно свет не испускают.

Некоторые углеводороды попадают в область, окрашенную в голубой цвет. Ее называют *зоной реакции*. Это самая горячая часть пламени, где имеется в избытке кислород. Молекулы углеводородов разделяются на более мелкие, в том числе на молекулярный углерод  $C_2$  и углеводород  $CH$ . В момент образования эти молекулы находятся в возбужденном состоянии. Они быстро переходят в невозбужденное состояние, испуская яркий свет с длинами волн главным образом в синей части видимого спектра. Именно поэтому мы видим голубое свечение по краю пламени свечи. В темной комнате, где горит только свеча, иногда можно заметить слабое свечение, окружающее пламя. Это свечение — результат рассеяния света пламени внутри глаза. Художники часто изображают такое свечение, рисуя короткие волнистые линии, отходящие от пламени свечи.

Углеводороды, попадающие из темного конуса и зоны реакции в светящуюся желтой частью пламени, образуют крохотные частички твердого углерода, которые затем сгорают в кислороде. Температура этих частиц такова, что они светятся желтым цветом. Это основной цвет пламени свечи.

Если скорость, с которой углеводороды попадают в желтую область, совпадает со скоростью образования твердых частиц, пламя не коптит. Однако, когда скорость подачи углеводородов слишком велика (так бывает, если фитилек слишком широкий), свеча начинает дымить: над пламенем поднимается темный дым. Это не полностью сгоревшие частички углерода. Если поместить в пламя скрепку для бумаги, образуется копоть, которая покрывает скрепку.

Если скорость подачи горючего не согласуется со скоростью его сгорания, пламя либо потухнет, либо начнет мигать. Свеча тухнет, если пламя не настолько сильное, чтобы растопить достаточно парафина (горючего), или капиллярные силы не поставляют нужное количество горючего для поддержания пламени. Мигание происходит, когда имеется механизм обратной связи между пламенем и подачей жидкого горючего. Предположим, пламя ярко вспыхнуло, что привело к увеличению теплового излучения и количества растопленного парафина. Если фитилек медленно поставляет в пламя эту добавочную жидкость, когда горючего

на кончике фитилька становится мало, пламя ослабевает. Но когда избыточное жидкое горючее достигает верхнего конца фитилька, пламя вспыхивает опять, и цикл повторяется.

Чтобы задуть свечу, надо дуть достаточно долго. Надо избавиться не только от несгоревших частиц углерода в желтой части пламени и от вступающих в реакцию углеводородов в его голубой области, но и от углеводородов из горячего фитилька, переходящих в газообразное состояние, пока вы дуете. На самом деле, когда свеча уже потухла, из фитилька продолжают выходить газообразные углеводороды, но из них уже не образуются твердые частицы и не горят. Если эти углеводороды представляют собой просто отдельные молекулы, вы их просто не заметите. Однако когда эти углеводороды конденсируются, они рассеивают свет, и мы видим слабый беловатый дымок, поднимающийся от фитилька.

#### 4.79 • КАК ПОТУШИТЬ ПОЖАР, ЗАЛИВАЯ ЕГО ВОДОЙ

Почему костер, сложенный из дров, можно потушить водой? Почему на пожарном рукаве иногда есть распылительная насадка, так что получается не сплошная, а мелкокапельная струя воды? Обычно пожарные, врываясь в горящую закрытую комнату, сначала направляют струю воды на потолок, даже если горит только пол. Зачем они так делают?

**ОТВЕТ** • Несколько процессов ответственны за то, что водой можно потушить или хотя бы уменьшить огонь. 1. Вода отбирает тепло с горящих поверхностей и у газообразных продуктов сгорания (которые могут продолжать гореть) и охлаждает их настолько, что горение прекращается. 2. Вода поглощает какую-то часть теплового излучения, испускаемого горящими веществами, снижая вероятность того, что температура окружающих материалов повысится настолько, что они загорятся. 3. Вода занимает место воздуха вблизи огня, уменьшая тем самым количество поступающего к месту горения кислорода, необходимого для продолжения горения.

В первом процессе скорость поглощения тепла зависит от площади поверхности воды. Поскольку, если превратить сплошную струю в мелкокапельную, эта площадь увеличивается, пожарные используют распылительную насадку.

В закрытой комнате при пожаре вскоре кончается необходимый для горения кислород. При этом

в воздухе остаются несгоревшие горючие вещества. Более того, они могут продолжать накапливаться там, исходя от находящихся в ней раскаленных предметов. Разогретые горючие вещества собираются под потолком. Когда пожарный врывается в комнату, в нее через пробитое отверстие или открытую дверь врывается воздух. Воздух несет с собой кислород, который быстро достигает горючих веществ вблизи потолка. Эти вещества вспыхивают, и через верхнюю часть того же отверстия из объятых пламенем помещения устремляется поток горящих легковоспламеняющихся веществ. Несгоревшие горючие вещества, вынесенные из комнаты этим потоком, попадают туда, где воздуха в избытке. Огненный шар вырывается наружу, и происходит то, что пожарные называют *вспышка*. Иначе говоря, *пламя охватывает еще и соседнее помещение*. Это происходит так быстро, что пожарный, открывший комнату, может оказаться внутри огненного шара. Поэтому, как только пожарный получает доступ в горящую комнату, он направляет распыленную струю к потолку, где скапливаются горючие вещества, пытаясь таким образом предотвратить вспышку. Вероятность образования вспышки и необходимость описанных выше мер возрастает, когда строители уменьшают приток воздуха внутрь здания в целях экономии на отоплении или охлаждении.

#### 4.80 • КАК ПОТУШИТЬ РАСТИТЕЛЬНОЕ МАСЛО

Обычное растительное масло, которое используют хозяйки, может самовоспламениться (вспыхнуть), если нагреется до температуры, превосходящей так называемую *температуру возгорания*. Огонь можно потушить водой, но стоит ли ее использовать, чтобы потушить горящее растительное масло на сковороде, стоящей на плите?

**ОТВЕТ** • Чтобы погасить пылающее растительное масло, накройте сковородку крышкой или каким-либо другим сплошным куском металла и поддержите сковородку закрытой некоторое время. Попадая на горячее масло, капли воды тонут в нем, как в бассейне с водой. Но затем каждая капля делится на множество мелких капелек. В масле эти капельки так быстро нагреваются, что молниеносно превращаются в пар. Переходя в пар, вода расширяется, и в результате мгновенного увеличения объема горячее масло с поверхности расплескивается в разных направлениях. Времени, чтобы остыть в воздухе, у раскаленного масла недостаточно,



и оно может обжечь вас или повредить кухонный стол. Соприкасаясь с открытым пламенем, такие капли масла могут вспыхнуть и поджечь стены. Таким образом, попытка залить сковородку с горящим маслом водой может привести к тяжелым последствиям из-за взрывоподобного превращения жидкости в пар.

#### 4.81 • ТРАВЯНЫЕ И ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ

Как распространяются травяные пожары (травяные палы)? Как движется лесной пожар и как загораются дома, когда такой пожар достигает населенных районов?

**ОТВЕТ •** Основная причина распространения травяных пожаров — языки пламени, соприкасающиеся с травой на границе пожара. Распространению такого пожара способствует ветер, который перебрасывает пламя на все новые участки. Пожар продвигается быстрее и тогда, когда он захватывает места, расположенные выше границы пожара. Например, когда пожар поднимается вверх по стене каньона. Горящие угли, поднятые вверх конвекцией горячих газов от пожара, падают на еще не тронутые пожаром места, поджигая там траву.

Низовые лесные пожары, во время которых сгорает лесная подстилка, растительность на земле и подлесок, распространяются практически так же. Однако *верховой пожар*, когда горит даже самый верхний ярус леса, распространяется совсем по-другому. Передача энергии от огня еще не загоревшимся деревьям происходит в основном благодаря тепловому излучению. Представьте себе, что вы стоите около огромного костра. Вы чувствуете тепло, вам может быть даже слишком жарко из-за того, что вы поглощаете тепловое излучение костра. Приблизительно это и происходит при верховом пожаре, когда деревья становятся такими горячими, что воспламеняются, приводя к распространению пожара. Основными источниками теплового излучения являются, во-первых, твердые горючие материалы (стволы деревьев) и, во-вторых, горючие газы (в пламени полыхающих крон). Тепловое излучение твердых горючих материалов перехватывается носящимися в воздухе частицами, поэтому оно не слишком хорошо проникает внутрь не загоревшихся пока деревьев. Тепловое излучение пламени проникает внутрь таких деревьев лучше, особенно если ветер изгибает пламя в их направлении, так что край пламени или пламя по всей длине оказывается направленным непосредственно на стволы. Тогда большая часть теплового излучения

пламени перехватывается соседними деревьями, которые тоже загораются.

Когда верховой пожар приближается к домам, внешние стены, смотрящие на огонь, разогреваются до температуры возгорания. Однако выступающий карниз крыши может предохранить стены от воздействия теплового излучения. И деревья между огнем и стенами тоже могут защитить их, особенно если эти деревья горят плохо. Конечно, дом может загореться и от горящих головешек, упавших на крышу.

#### 4.82 • ОГНЕННЫЙ СМЕРЧ

В конце Второй мировой войны немецкий город Дрезден подвергся массовой бомбардировке самолетами союзников. На город сбрасывали зажигательные авиабомбы. Когда бомбардировка началась, в районе города ветер был слабым, примерно 4 м/с. Почему скорость ветра повысилась до 20 м/с (больше 64 км/ч)? По некоторым оценкам, скорость доходила даже до 50 м/с.

**ОТВЕТ •** Примерно через 30 минут после начала бомбардировки отдельные очаги пожаров по всему городу объединились в один гигантский костер. В этих условиях улицы города превратились в доменные печи. Горячие газы, более легкие, чем окружающий их холодный воздух, устремились вверх. Поднимаясь, они охлаждались, смешиваясь с воздухом и излучая энергию в инфракрасном диапазоне. Однако охлаждение происходило достаточно медленно, так что столб горячего газа поднялся на высоту около 7 км. Поскольку наверху столба температура газа равнялась температуре окружающего воздуха, он растекался в горизонтальном направлении.

Мощный восходящий поток засасывал воздух снизу и переносил его в охваченные огнем районы. Поднялся ураганный ветер, способствовавший возникновению мощнейшего пожара. Ветер всегда приводит к распространению огня, но в Дрездене радиальный поток, переносивший воздух с периферии пожара в его центр, привел к тому, что пожар стал устойчивым (стационарным). Создалась ситуация, которая теперь называется *огненный смерч*. Он привел к неисчислимым человеческим жертвам и разрушил почти все здания в городе.

Иногда при огненных ураганах восходящие потоки закручиваются в спираль, образуя вихрь. И при не столь сильных, но все же крупных пожарах также образуются огненные вихри, напоминающие песчаные. Они очень опасны, поскольку способствуют распространению огня.

#### 4.83 • ПОДДЕРЖАНИЕ НУЖНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В МУРАВЕЙНИКАХ И ЗДАНИЯХ

На севере Австралии термитники называют магнитными не потому, что они сами или термиты в них намагничены. Дело в том, что эти высокие клинообразные сооружения, как стрелки компаса, ориентированы с севера на юг. Латинское название этих термитов — *Amitermes meridionalis* — связано с тем, что свои жилища они ориентируют в направлении земных меридианов. Почему постройки термитов ориентированы подобным образом?

В странах с умеренным климатом немало зданий, где летом в помещении жарко, даже если открыты все окна. Можно ли улучшить вентиляцию этих зданий, не используя дорогостоящие кондиционеры?

**ОТВЕТ** • Разумное устройство жилища магнитных термитов помогает им поддерживать комфортную для них температуру. Широкая и высокая восточная сторона термитника поглощает достаточно солнечного света на восходе солнца. Такая же противоположная сторона поглощает солнечный свет на закате. Когда солнце стоит высоко в небе, площадь поверхности, на которую падают солнечные лучи, относительно мала. Действительно, если смотреть на термитник сверху, его площадь будет гораздо меньше, чем если смотреть на него с востока или запада. Поэтому количество солнечного света, поглощенного в течение жаркого дня, меньше, чем утром или вечером, когда прохладно. В результате внутри термитника весь день поддерживается примерно одинаковая температура.

В Англии в проект некоторых зданий начали включать *солнечные башни*. Одна сторона (или угол) такой башни, обращенная днем к солнцу, выполнена из прозрачного стекла, а сверху имеется вентиляционное отверстие, которое можно открывать или закрывать по мере необходимости. Дно башни связано с каждым этажом здания. Солнце нагревает воздух в башне. Поскольку теплый воздух легче холодного, нагретый воздух движется вверх и выходит через вентиляционное отверстие, а на его место через все открытые окна здания втягивается воздух с улицы. Если здание и башня спроектированы правильно, постоянный поток воздуха проходит через все открытые помещения в здании.

В Иране, где жарко днем и холодно ночью, традиционные постройки адаптированы к местному климату. Дома строят группами, чтобы они отбрасывали

друг на друга тень. У некоторых зданий есть *бадгир*, что в переводе с иранского означает *ветролов*. Эта высокая башня улавливает воздушный поток, направляет воздух в низ башни, затем через подземный тоннель (где воздух охлаждается землей), а потом он поступает в полуподвальный этаж здания. Если на пути воздуха есть вода, влажные стенки тоннеля или фонтан на нижнем этаже, воздух охлаждается еще и за счет испарения воды: тепло из воздуха тратится на переход воды из жидкого состояния в газообразное.

#### 4.84 • ПОЧЕМУ НАГРЕВАЮТСЯ ОРАНЖЕРЕИ И ЗАКРЫТЫЕ МАШИНЫ

Почему в оранжереях так тепло? Используется ли в них специальное стекло, каким-то образом улавливающее инфракрасное излучение? Почему в салоне закрытой машины становится жарко, если оставить ее на солнце в теплый летний день?

**ОТВЕТ** • В оранжерее тепло главным образом потому, что там замкнутое пространство, в котором нет или почти нет циркуляции воздуха. Теплый воздух не имеет возможности покинуть оранжерею, и его не замещает стелющийся по земле более холодный воздух. В сознании многих людей укрепились мнение, что крышу оранжереи делают из стекла или пластика, которые задерживают тепло. Это не так. Возможно, эта мысль ошибочно переносится на оранжереи и парники потому, что при описании непрозрачности земной атмосферы для теплового излучения часто используют термин *парниковый эффект*.

Закрытая машина, припаркованная на солнце в жаркий летний день, — это своего рода парник. Внутри нее нет циркуляции воздуха, поэтому в салоне может стать очень жарко. Действительно, если солнечный свет падает на переднее ветровое стекло, приборная панель и руль могут нагреться так, что к ним нельзя будет притронуться. Если опустить окна или открыть двери, благодаря циркуляции воздуха их температура постепенно, хотя и медленно, будет понижаться. Поскольку черная краска поглощает видимый свет лучше, чем белая, можно подумать, что в черной машине будет жарче, чем в белой. Однако машина разогревается главным образом за счет поглощения инфракрасного излучения, а не видимого света, а в инфракрасном диапазоне черный и белый цвета поглощают примерно одинаково.

#### 4.85 • ОСТРОВА ТЕПЛА

Почему в некоторых районах города, особенно в центре, обычно теплее, чем в пригородах? Например, летом в городе может быть жарко, воздух там неподвижен, тогда как в пригородах стоит вполне приятная погода. Является ли наличие в городе большого количества выделяющих тепло машин основной причиной появления таких *островов тепла*?

**ОТВЕТ** • Несколько факторов способствуют появлению островов тепла в городах. Высокие здания блокируют и перенаправляют воздушные потоки, которые могли бы принести в город прохладу. В городе потери тепла на испарение меньше, поскольку дождевая и талая вода быстро уходит в канализационную систему. Дорожное покрытие и строительные материалы лучше поглощают солнечный свет и сохраняют тепло, чем покрытые травой участки и лесопосадки.

Если здания примерно одной высоты и ночью они охлаждаются за счет излучения тепла крышами, на их уровне может образоваться слой холодного воздуха. Этот слой препятствует подъему теплого воздуха с уровня тротуаров, и поэтому тепло задерживается в городе, как в ловушке. Если улицы города покрыты толстым слоем пыли (сильно загрязнены), положение еще хуже: верхняя поверхность этого слоя испускает тепловое излучение в небо, и тем самым на уровне крыш температура еще больше понижается. В какой-то мере город, конечно, за ночь охлаждается, но совсем не так, как пригород.

В жарких местах, например на юго-западе Соединенных Штатов, поглощение солнечного света поверхностями может представлять серьезную опасность. Так температура асфальтового покрытия достаточно легко повышается до 70 °C, тогда как прикосновение к поверхности, температура которой выше 50 °C, уже может вызвать ожог. Даже стоять на пустой асфальтированной парковочной площадке бывает трудно из-за интенсивного инфракрасного излучения.

#### 4.86 • ТЕРМОДИНАМИКА АПТЕЧНОЙ РЕЗИНКИ

Быстро растяните аптечную резинку, держа ее над верхней губой (поверхность кожи используется здесь как термометр). Почему резинка нагреется настолько, что вы это почувствуете? Все еще растянутую резинку отведите подальше от губы и подержите так несколько минут. Затем поднесите ее обратно к губе и сведите пальцы, чтобы резинка быстро сжалась. Почему она становится прохладной?

**ОТВЕТ** • Молекулы резины, из которой сделана аптечная резинка, представляют собой длинные цепочки, изогнутые и перепутанные, как спагетти на тарелке. Когда резинку растягивают, эти молекулы распрямляются, а часть работы, затраченной на растяжение, переходит в тепловое движение молекул. Тепло, которое вы ощущаете на губах, обязано более интенсивному тепловому движению этих молекул. Если резинка сжимается, работу совершают молекулы резины: они опять изгибаются и перепутываются. Эта работа совершается за счет энергии теплового движения, а следовательно, чувствуется, что резинка стала холоднее.

Если аптечную резинку нагреть, дополнительная тепловая энергия позволяет молекулам перепутаться еще сильнее, и поэтому резинка укорачивается. Когда она охлаждается, уменьшение тепловой энергии молекул означает, что тесно переплестись они не могут, и поэтому резинка становится длиннее.

Тот факт, что резина сжимается при нагревании и растягивается при охлаждении, можно положить в основу некоего устройства, но, к сожалению, это будет только игрушка. Установим колесо так, чтобы оно вращалось вокруг оси, проходящей через его центр. Вторую ось сместим относительно оси вращения, а круглую резинку, растянув, протянем от второй оси так, чтобы она охватывала колесо по периметру. Теперь опустим колесо в таз с теплой водой на глубину, равную его радиусу. Тепло, полученное от воды, приведет к тому, что погруженный в воду кусок резинки сожмется, и колесо медленно повернется. Когда резинка окажется над водой, сжатый участок охладится и удлинится, а оказавшись опять под водой, сожмется, и колесо вновь провернется.

#### 4.87 • ФЁН И ШИНУК

*Фён* — это теплый сухой ветер, дующий с гор в долины. Впервые на такой ветер обратили внимание в Альпах, где неожиданный фён может привести к очень быстрому таянию и испарению снежных сугробов. В Соединенных Штатах подобный ветер называют *шинук* (по самоназванию группы индейских племен). Шинук возникает на восточных склонах Скалистых гор. Один из впечатляющих примеров: вблизи города Хавр в Монтане шинук за три минуты привел к повышению температуры с -12 до +6 °C. Что же вызывает фён или шинук?

**ОТВЕТ** • Появление таких ветров обусловлено многими причинами. И не все они до конца понятны, но кое-что уже известно достоверно. Рассмотрим шинук.

Воздух с Тихого океана,двигающийся к Скалистым горам, а затем вверх по наветренной стороне Скалистых гор, высыхает: большая часть содержащегося в нем водяного пара конденсируется. Переход пара в жидкость сопровождается выделением энергии, так что воздух становится теплее, чем если бы такого перехода не было. Когда, перевалив через Скалистые горы, воздух спускается в долины с подветренных склонов, он нагревается еще сильнее, поскольку при его движении давление постепенно возрастает. (Подобный эффект можно заметить, накачивая шины велосипеда.) Поэтому, достигнув основания Скалистых гор, воздух оказывается теплым и относительно сухим, что может вызвать быстрое таяние и даже испарение снега.

Один исследователь описывал, как из холодной долины он на машине заехал туда, где дул шинук и воздух был пропитан влагой от испарившегося снега. За несколько секунд его холодное ветровое стекло покрылось инеем. Если бы он ехал с той же скоростью, что и на шоссе, внезапная потеря видимости могла привести к тяжелым последствиям.

#### 4.88 • ИСПЫТАНИЕ КИПАЩЕЙ ВОДОЙ

Испытание кипящей водой — одно из «чудес», которое демонстрируют японские синтоисты. Исполнитель опускает две связки бамбуковых веток в кипящую воду, затем резко вытаскивает их, разбрызгивая кипящую воду на себя и на костер под сосудом с кипящей водой. Когда вода достигает костра, оттуда поднимаются клубы пара, но исполнитель остается целым и невредимым. Почему кипящая вода его не обжигает?

**ОТВЕТ •** Подброшенная в воздух вода распадается на множество мелких капель. Эти капли тут же остывают, поскольку запасенное ими количество тепла невелико и они быстро передают его на свою поверхность, а затем — окружающему воздуху. Когда капли попадают на исполнителя фокуса, они могут быть еще горячими, но не обжигающими. Если бы то же самое количество воды опускалось по воздуху как одна большая капля, вода отдала бы воздуху меньшее количество тепла, поскольку площадь поверхности такой большой капли меньше суммарной площади маленьких капель. Это значит, что при попадании на кожу большая капля была бы горячее и вполне могла бы обжечь. Конечно, если бы исполнитель просто лил на себя кипящую воду, она, скорее всего, совсем не успевала бы остыть и, попав на кожу, уж точно обожгла бы его.

#### 4.89 • ЭНЕРГИЯ В ТЕПЛОЙ КОМНАТЕ

Представьте, что холодным зимним днем после катания на лыжах вы вернулись в нетопленный дом. Прежде всего вы подумаете о том, что надо растопить печку. Но ради чего вы это делаете? Должна ли за счет этого повыситься внутренняя (тепловая) энергия воздуха в помещении до уровня, при котором вы почувствуете себя комфортно? Это предположение представляется логически обоснованным, но оно ошибочно: печка не меняет внутреннюю энергию воздуха. Как такое может быть? И если так, зачем надо топить печку?

**ОТВЕТ •** Воздух проникает в любую комнату. Когда после включения отопления температура воздуха поднимается, молекулы воздуха выходят из помещения через всевозможные отверстия, поддерживая давление в комнате равным наружному атмосферному давлению. Хотя кинетическая энергия отдельных молекул повышается, полная кинетическая энергия воздуха в комнате не увеличивается, поскольку молекул в комнате остается меньше.

Почему же, включив отопление, то есть повысив температуру в комнате, мы чувствуем себя комфортнее? Человек мерзнет, поскольку испускает инфракрасное излучение и обменивается энергией с молекулами воздуха, ударяющимися о его тело. Когда вы включаете отопление, увеличивается количество поглощаемого вами излучения, исходящего от нагретых поверхностей (стен, потолка, пола, мебели), восполняя ваши потери энергии на инфракрасное излучение. Кроме того, увеличивается кинетическая энергия молекул воздуха, ударяющихся о ваше тело, и, следовательно, увеличивается приобретаемая вами в результате этих столкновений энергия.

#### 4.90 • ОРИЕНТАЦИЯ ЛЕДНИКА

До изобретения холодильников люди в странах с холодным климатом сохраняли в ледниках зимний лед, чтобы использовать его летом. Одним из условий создания хорошего ледника была его правильная ориентация. Говорят, что ледник должен смотреть на восток, чтобы вскоре после восхода солнца на него падал солнечный свет. Не кажется ли вам, что это неправильно, ведь прямые солнечные лучи должны повысить температуру внутри ледника и растопить лед?

**ОТВЕТ •** Ориентацию ледника выбирали так, чтобы избежать (или, по крайней мере, уменьшить) конденсацию в нем влажного воздуха. Процесс



конденсации — переход воды в жидкое состояние — сопровождается выделением большого количества тепла. Это тепло передается льду и ускоряет его таяние.

Поэтому ледник строили так, чтобы солнечный свет проникал внутрь него на заре, нагревал внутри воздух, уменьшая тем самым возможность конденсации. Ночью конденсация тоже угрожает льду, но солнце ночью не светит, поэтому наилучшим решением было использование утреннего солнечного света.

#### 4.91 • ИГРУШЕЧНЫЙ РАДИОМЕТР

В 1872 году Уильям Крукс изобрел радиометр — устройство для измерения энергии, испускаемой источником света. Но сегодня это только забавный сувенир, который продают в магазинах научных игрушек. Радиометр представляет собой герметичную стеклянную колбу, из которой частично откачан воздух. Внутри колбы имеется металлическая втулка, к которой прикреплены четыре металлических лопасти-лепестка. Одинаково раскрашенные лепестки, белые с одной стороны и черные с другой, могут вращаться вокруг вертикальной иглолочки. Если такую вертушку поставить вблизи источника света, лепестки вместе со втулкой вращаются вокруг иглолочки, причем вращение тем быстрее, чем ярче свет. Что вызывает вращение и что определяет его направление? Как можно изменить направление вращения лепестков?

**ОТВЕТ •** Часто думают, что движение лепестков происходит за счет давления света, но этот эффект слишком мал, чтобы его можно было заметить с помощью такой игрушки. И, кроме того, за счет давления света она вращалась бы в направлении, противоположном тому, которое мы видим. Давление света может привести лепестки в движение, поскольку кванты при отражении и поглощении передают поверхности импульс. Передаваемый импульс больше там, где свет отражается. Следовательно, солнечный свет, падающий на лепестки, сильнее давит на их белые стороны, чем на черные, а значит, лепестки должны двигаться черной стороной вперед. Именно так вращались бы лепестки, если бы из колбы откачали почти весь воздух.

Однако воздух, оставшийся в колбе, существенно больше влияет на лепестки. Поскольку лепестки поглощают свет (инфракрасное излучение и видимый свет), их черные стороны нагреваются чуть сильнее, чем белые. Молекулы воздуха, оставшиеся в колбе, сталкиваются с лепестками и приводят их в движение. Чем

быстрее молекулы двигаются, тем сильнее они подталкивают лепестки. За счет разницы температур от черной стороны каждого из лепестков молекулы отскакивают быстрее, чем от белой. Соответственно, нажим на черные стороны больше, и лепестки вращаются вокруг иглолочки белой стороной вперед. Если свет выключить, через какое-то время температуры с разных сторон лепестков выравниваются (система приходит в *тепловое равновесие*), давления тоже выравниваются, и трение останавливает вертушку.

#### 4.92 • КОЛОДЦЫ С ВОДОЙ И БУРЯ

Когда моя бабушка была девочкой, питьевую воду качали из колодца вручную. Бабушка уверяла, что при ненастной погоде воду качать было легче, но она была такой мутной, что пить ее было опасно. Результат не зависел от того, шел ли дождь. Похоже, артезианские колодцы тоже чувствительны к погоде: независимо от того, идет ли дождь, во время бури вода в них поднимается легче. Почему же колодцы реагируют на погоду?

**ОТВЕТ •** Хотя общий уровень воды в колодце зависит от количества выпавших в данном месте дождей или от таяния снега, изменение атмосферного давления может изменить уровень воды в колодце на несколько сантиметров. Когда во время бури атмосферное давление падает, уровень воды в колодце поднимается. Увеличившийся приток воды может приносить с собой частички глины и песка, делая воду непригодной для питья.

Потоки воздуха в системе пещер также чувствительны к изменению атмосферного давления. Когда давление повышается, воздушный поток направлен вглубь пещеры, а когда падает — наружу из пещеры. В узких проходах, где скорость воздушного потока больше, движение воздуха заметнее.

#### 4.93 • «СТОЛБЫ» ИЗ НАСЕКОМЫХ И РАЧКОВ

Почему насекомые (москиты и летающие муравьи) иногда собираются во множестве и кружат в воздухе, образуя как будто столбы густого дыма над деревьями? Возникает ощущение, что на дереве разложили небольшой костер. Иногда такие «столбы» из насекомых формируются над купами деревьев и шпилями зданий. Однажды пожарные выехали на тушение пожара в церкви, но оказалось, что «дым» над ее шпилем — всего лишь насекомые.

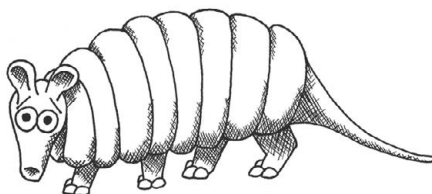


Почему живущие на мелководье рачки артемии *Artemia salina* иногда собираются в «столбы» над подводными камнями, освещенными солнцем? Почему такой «столб», иногда достаточно плотный, поднимается над камнем, но отклоняется от направления к солнцу?

**ОТВЕТ** • Бывает, что на закате деревья остывают медленнее, чем окружающая их земля, и от них исходит тепло. Очевидно, тепло привлекает насекомых;

возможно, играет роль и влага, конденсирующаяся из остывающего при подъеме воздуха.

Рачки артемии тоже собираются в теплых конвекционных столбах воды, нагретых солнцем. Им нравится тепло, и, возможно, в такой теплой воде больше пищи, но солнечный свет они не любят. Поэтому рачки, поднимаясь с током воды, отклоняются от направления солнечных лучей. Добравшись до поверхности, они плывут обратно на дно, а затем снова заплывают в теплую восходящую струю, чтобы еще раз на ней «прокатиться».



## Глава 5

# Электричество и магнетизм

## Сверкнула молния — жди грома!

### 5.1 • МОЛНИЯ

Откуда берется молния и почему при грозе грохочет гром и вспыхивает свет? Поскольку молнию видно издалека, значит ли это, что она очень широкая?

**ОТВЕТ •** Молния — это очень мощный электрический разряд (искра), проходящий между тучами и землей. Хотя этот разряд был детально исследован и его параметры измерены, основная причина образования зарядов в тучах и спусковой механизм, приводящий к появлению молнии, до сих пор не до конца ясны. Известно несколько механизмов разделения зарядов в туче, в том числе захват ионов, всегда имеющихся в воздухе, движущимися каплями и кристаллами, столкновения градин с более мелкими кристалликами льда, а также слияние и дробление капель. Электроны из кристалликов льда переходят в градины, которые после этого опускаются в нижнюю часть тучи, туда же переносят заряд падающие капли. В результате, поскольку электроны несут отрицательный заряд, основание тучи становится отрицательно заряженным, а верхняя часть тучи, потерявшая эти электроны, становится положительно заряженной. Все же небольшое количество положительных зарядов остается и у основания тучи.

На земле в обычных условиях имеется избыток свободных электронов, но когда над каким-то местом повисает заряженная туча, электроны оттуда уходят, поскольку их отталкивают отрицательные заряды, собравшиеся в основании тучи. Так место под тучей становится положительно заряженным. Эти заряды на земле и соответствующее распределение зарядов в туче приводят к появлению большого электрического поля между землей и тучей. Если оно превысит некоторое критическое значение, возникнет разряд, начинающийся у основания тучи.



Рис. 5.1 / Задача 5.1

Затем по направлению к земле начинает распространяться зигзагообразный *ступенчатый лидер*, который по дороге *ионизует атомы*, выдирая с их внешних орбит электроны, и переносит вниз часть отрицательных зарядов с тучи. Он слишком слабо светится и невидим для глаза, но сфотографировать его можно. Длина ступенек составляет примерно 50 м (поэтому его называют ступенчатым), причем путей распространения ступенчатого лидера вниз очень много, и они весьма разветвленные. Хотя наблюдателю на земле обычно кажется, что молния идет вертикально вниз, часть ее пути в основном горизонтальна. Лишь когда молния приблизится к поверхности земли, она начинает «замечать» некоторые объекты на земле, например высокие деревья.

От таких объектов вверх вытягиваются каналы, образованные ионизованными атомами, — *восходящие стримеры*. Когда один из этих стримеров встречается со ступенчатым лидером, канал замыкается, возникает *проводящий путь* между тучей и землей, и электрическое поле ускоряет электроны, находящиеся у поверхности земли вдоль этого пути. Проводимость канала возрастает, и по нему протекает основной ток, причем в направлении от земли к туче. Этот ток называется

возвратным ударом, вот он и есть та молния, которую мы обычно видим. Поскольку электроны ускорены полем, они по пути сталкиваются с молекулами воздуха, выбивают из них электроны и сильно поднимают температуру воздуха на своем пути. При нагревании воздух так быстро расширяется, что возникает ударная волна, которая и образует удар грома. Когда освободившиеся электроны рекомбинируют с молекулами воздуха, вспыхивает ярким светом молния. Хотя молния может быть яркой и мощной, толщина проводящего пути, в котором вся эта активность происходит, около сантиметра в диаметре.

Когда проводящий путь установился, к его верхней части начинают стекаться электроны из других частей тучи, и из нее вниз может быть послано несколько электронных импульсов. Эти множественные импульсы можно увидеть — они проявляются в виде мерцающей молнии. Если во время формирования множественных импульсов проводящий канал будет сдуваться в сторону сильным ветром, вместо единичной молнии можно увидеть несколько параллельных молний, напоминающих свисающую с облака ленту.

В большинстве молний образуется распространяющийся сверху вниз ступенчатый лидер, и электроны перемещаются от тучи к земле. Однако идущий вниз ступенчатый лидер может начаться и в более высоких, положительно заряженных слоях тучи, и тогда электроны будут двигаться от земли к туче. А еще ступенчатый лидер может начаться на земле, скорее всего, в каких-либо высоких точках типа небоскребов, и распространяться от них вверх. Такой ступенчатый лидер, направляющийся к нижней части тучи, переносит электроны на землю, а лидер, направляющийся к верхней ее части, переносит электроны на тучу. Можно определить, что эти ступенчатые лидеры идут от земли, по тому, что они ветвятся *снизу вверх*. В конце грозы иногда происходят разряды между облаками, и тогда на нижней части грозовых туч можно увидеть *молнию-паутину* — красивейшую, медленно расширяющуюся во все стороны светящуюся картину.

## 5.2 • МОЛНИИ, ЛЮДИ, КОРОВЫ И ОВЦЫ

Почему прямое попадание молнии обычно приводит к смерти? Почему иногда при ударе молнии с человека срывает одежду и обувь? Оказавшись в грозу на улице, что должен сделать человек, чтобы свести опасность удара к минимуму? Например, должен ли он спрятаться под деревом или встать на открытом месте?

Должен ли он стоять неподвижно, присесть или убежать? Могут ли у человека волосы встать дыбом и является ли это сигналом опасности?

Почему во время грозы могут пострадать целые группы людей, например бейсболисты во время матча, ведь молния может попасть только в одного игрока? Тем не менее при ударе молнии иногда падают все игроки.

Почему во время грозы коровы, овцы и лошади обычно находятся в большей опасности, чем люди?

Есть много рассказов о том, как Бенджамин Франклин — известный американский ученый и государственный деятель — при приближении грозы запускать воздушного змея, чтобы продемонстрировать электрические свойства молний. Почему его не убило молнией?

**ОТВЕТ •** Человека может ранить или убить молнией пятью различными способами.

1. Наиболее очевидный способ: при прямом попадании молнии большой ток (движущиеся электроны) может пройти через грудь, остановить сердце, парализовать мышцы, с помощью которых человек дышит, и вызвать внутренние ожоги. Впрочем, если одежда человека сильно промокла, то есть стала проводящей, ток может не попасть внутрь тела, и тогда человек может остаться жив.
2. Можно получить повреждения, если прикоснуться к предмету, например автомобилю, в момент, когда в него попадает молния. Часть тока при этом пройдет через человека.
3. Можно получить повреждения, если стоять рядом с предметом, например с деревом, в который попала молния. Часть тока может пробить воздушный зазор и пройти через человека. Этот разряд называется *боковым разрядом*. Если повезет, ток в этом случае может оказаться не настолько большим, чтобы убить жертву.
4. Менее очевидный способ получить повреждение или погибнуть от удара молнии, связан с током молнии, проходящим по поверхности земли (*земным током*). Если человек одной ногой стоит ближе к месту попадания молнии в землю, а другой дальше, ток может пройти от ближней ноги через тело, а затем вниз по второй ноге (рис. 5.2а). Если этот ток достаточно велик, он может временно парализовать жертву. Ток через

землю может сбить с ног целую группу людей, например игроков бейсбольной команды.

5. Пятый способ еще более изощренный. Как уже объяснялось выше, обычно при грозе ступенчатый лидер, совершающий свой извилистый путь от тучи вниз, встречается на этом пути с коротким восходящим стримером, в котором молекулы воздуха ионизованы. В момент встречи происходит полноценный разряд с огромным током. Другие восходящие стримеры обычно тоже образуются, но они не входят в контакт со ступенчатым лидером. Хотя ток в этих «тупиковых» стримерах не достигает значения полноценного тока молнии, однако если такой стример пройдет через тело человека, это может привести к летальному исходу.



**Рис. 5.2 / Задача 5.2.** а) Земной ток может пройти через тело человека, если он расставит ноги. б) Овца, спасающаяся от удара земным током.

Появившиеся на коже человека ожоги могут иметь вид *дендритного* узора в виде разветвленной папоротникообразной структуры, известной под названием *фигур Лихтенберга*, поскольку ток расходится из начальной точки по коже в разных направлениях. Некоторые люди, обладающие живым воображением, могут решить, что это фотография цветка, изображение ландшафта или образ их духовного гуру, но молния не фотографирует, не рисует и не пишет иконы. Если на человеке надето что-то металлическое, от удара молнии металл может разогреться до высоких температур и вызвать ожог. Если одежда и обувь человека сильно промокли, при ударе молнии их может сорвать, поскольку ток нагревает воду, она мгновенно превращается в пар и увеличивается в объеме.

Лучший совет человеку, оказавшемуся в грозу на открытом воздухе, — отойти от высоких деревьев и вообще от всяких высоких проводящих конструкций,

в которые может ударить молния, найти какое-нибудь углубление или овраг, спрятать голову, чтобы в нее не попала молния, и свести ноги вместе, чтобы уменьшить риск поражения тела током, текущим через землю. Неплохой выход — бежать, поскольку при беге только одна нога в каждый момент времени касается земли. Впрочем, голова при этом поднята, и это нехорошо. Коровы, лошади и овцы скорее рискуют пострадать от земных токов, чем человек, поскольку их передние и задние ноги находятся на большем расстоянии, и, следовательно, через их туловище может протечь больший ток. Люди могут соединить ноги вместе, а овцы — нет (рис. 5.2б).

Что делать, если неприятность случилась? Если пострадавший не дышит, немедленно приступают к искусственному дыханию, уложив человека на спину на твердую поверхность. Оценивают сердечную деятельность, прощупав пульс на сонной артерии или приложив ухо к грудной клетке. Если сердцебиение не выслушивается, начинают непрямой массаж сердца. Молния может поразить человека и внутри дома через внешнюю незаземленную воздушную телевизионную антенну, но не через комнатную антенну, стоящую на телевизоре. А также через телефонную линию, но не через мобильный телефон или телефон, подключенный с помощью оптоволокну. Может — через водопроводную систему или домовую электропроводку. В общем, во время грозы лучше почитайте эту книгу или поболтайте с друзьями по мобильному телефону, а ванну отложите на потом.

Еще один совет по безопасности. Чаще всего молния ударяет, когда туча находится прямо над головой, но она может ударить и когда туча уходит. Бывает, что неосторожные и нетерпеливые люди выходят из своего убежища слишком рано...

Если волосы на голове встали дыбом, значит, электрическое поле между землей и тучей очень велико и молния может ударить в любой момент. И нужно немедленно прятаться. (Времени на селфи с дурацкой прической у вас точно нет!) В обычной ситуации туча заряжена отрицательно, а земля — положительно, и пряди волос тоже заряжаются большим положительным зарядом. Поэтому они пытаются отодвинуться друг от друга как можно дальше, даже если для этого им приходится преодолеть силу гравитационного притяжения.

Если верить рассказам рыбаков (неподтвержденным), грозовая туча может заставить заброшенную

леску парить над водой. Если рыбаки говорят правду, леска и поверхность воды должны быть одинаково заряжены. Вода может зарядиться из-за тучи над ней, а леска — либо по той же причине, либо на ней может появиться заряд при забрасывании, когда она размазывается из катушки спиннинга.

Бенджамина Франклина не убило при запусках воздушного змея, поскольку он проводил такие эксперименты до начала грозы. Он был здравомыслящим человеком и прекрасно понимал, что прямое попадание молнии убьет и змея и, возможно, его самого.

### 5.3 • МОЛНИЯ, АВТОМОБИЛИ И САМОЛЕТЫ

Почему людям в автомобилях молния обычно не страшна?

Почему для самолетов молния иногда может быть опасна?

**ОТВЕТ •** Автомобиль — надежное укрытие от молнии, поскольку металл хорошо проводит электрический ток. Поэтому, если молния попадет в него, ток пойдет по корпусу и не поразит пассажиров. Однако кабриолет (автомобиль с откидываемой непроводящей крышей), равно как и автомобиль с пластиковым корпусом, защитой не будет. Человек в машине, в которую может ударить молния, не должен притрагиваться к наружной поверхности автомобиля или к чему-то прикрепленному к внешней антенне. Целесообразно также закрыть окна, по которым течет дождь (вода проводит ток). У автомобиля имеются также четыре плохо проводящие ток шины, но эти шины не защищают от удара молнии, которая уже пробилла несколько километров плохо проводящего ток воздуха. Кроме того, шины, скорее всего, будут мокрыми.

Поскольку самолет тоже сделан из металла, он предохраняет пассажиров от удара молнии. А вот самолеты, сделанные с использованием непроводящих материалов, в смысле безопасности похожи на кабриолеты и не обеспечивают достаточной защиты от ударов молнии.

Летающий самолет, конечно, более уязвим, чем автомобиль, поскольку в полете ему нужны чувствительные электронные приборы, которые могут быть повреждены или выведены из строя либо непосредственно ударом тока, либо электромагнитным полем, мгновенно возникающим при ударе молнии. Если ток доберется до топливных баков или же попадет туда через поток несгоревшего топлива, выбрасываемого

из двигателя, баки могут взорваться, но таких случаев не было.

Если самолет стоит на земле, то при попадании в него молнии путь тока через самолет будет зависеть от того, в какую часть корпуса ударила молния.

Самолет может и сам спровоцировать разряд молнии, если в туче накопился заряд. По всем перечисленным причинам, а также из-за серьезной турбулентности, возникающей в грозу, пилоты стараются в штормовую погоду не летать и по возможности избегать скопления туч, в которых самолет может спровоцировать разряд молнии. И все же в большинство коммерческих самолетов рано или поздно молния ударяет.

### 5.4 • МОЛНИЯ, ДЕРЕВЬЯ, БАШНИ И ЗЕМЛЯ

Почему молния способна разнести на куски дерево или поджечь его?

Почему высокие дома не разрушаются от удара молнии? Как может молния вырывать ямы в земле и создавать из песка фигуры, так называемые *фульгуриты*?

**ОТВЕТ •** Когда молния ударяет в дерево, она может сорвать с него куски коры, расколоть, поджечь, но может не причинить ему никакого вреда. Какой ущерб нанесет дереву удар молнии, зависит от того, насколько намокла кора и не попала ли молния в заболонь\*. Если через заболонь пройдет большой ток, то идущий по ней сок испарится так быстро, что его расширение может разорвать дерево. Быстрое расширение дождевой воды под слоем коры тоже может разорвать кору или отколоть от нее куски. Большинство молний, ударивших в деревья, не сожгли их, скорее всего, из-за того, что ток молнии протекает очень быстро и кора не успевает достаточно нагреться, чтобы загореться. Однако если разряд все же успевает сильно нагреть дерево, удары молнии поджигают его и тогда в лесу начинается пожар.

Высокое здание само может инициировать молнию, если оно пошлет ступенчатый лидер к нависающей над ним туче. Ток разряда тогда пойдет через молниеотвод (металлический стержень, установленный на крыше) или через металлический каркас здания. Когда в здание, например церковь с высоким шпилем, но без

---

\* Заболонь — наружные молодые слои ствола, ветвей и корней, по которым движутся питательные вещества от корней к кроне. В заболони сконцентрирован большой объем влаги. *Прим. пер.*



молниеотвода, ударит молния, ток может оторвать намокшие части здания, точно так же, как это происходит с деревьями, и, если ток разряда будет течь достаточно долго, деревянные части конструкции могут загореться.

Если молния ударит в мокрую землю, вода из нее испарится так быстро, что влажный грунт поднимется и будет отброшен в сторону, так что на его месте останется яма. Этому может поспособствовать и мощный порыв ветра, возникший из-за мгновенного нагрева воздуха во время удара молнии.

Когда молния ударяет в кварцевый песок, при прохождении тока температура в нем может подняться выше точки плавления (около 1700 °C). После удара песок быстро охлаждается, при этом вдоль извилистых путей, по которым через песок шел ток, образуются тонкие цилиндрики оплавленного кварца. Структура, состоящая из стержней оплавленного кварца, и есть фульгурит — редкая и интересная находка, если, конечно, его удастся выкопать из песка, не поломав.

## 5.5 • ЧЕТОЧНАЯ И ШАРОВАЯ МОЛНИЯ

Отчего во время грозы иногда видят (и очень редко — фотографируют) светящиеся сферы? *Четочная молния* остается на небе после удара обычной молнии, она похожа на струну с нанизанными на нее яркими сферами или немного вытянутыми эллипсоидами — «бусинами». *Шаровая молния* — еще более загадочное явление. Она представляет собой светящийся шар диаметром до 20 см, парящий над землей в течение нескольких секунд. Некоторые шары исчезают тихо, а некоторые — с хлопком, напоминающим взрыв. Сообщалось, что шаровые молнии проходят сквозь стекло (перетекают с одной его стороны на другую), не причинив вреда стеклу, хотя доказательств этому нет. Их наблюдали и когда они скользили по линиям электропередачи или перекачивались по полу внутри помещений (в частности, от одной электрической розетки к другой). Пассажиры самолетов видели, как шаровая молния проплывала по проходу самолета из одного конца в другой (что, вероятно, сразу сделало места у прохода менее привлекательными). Если шаровая молния коснется человека, она может оглушить, сбить с ног, обжечь. Словом, заметив шаровую молнию, постарайтесь от нее отдалиться (не слишком быстро, чтобы не вызвать потока воздуха, который приблизит ее к вам).

**ОТВЕТ •** Не существует общепринятого объяснения четочной молнии. По-видимому, яркие бусины на струне — это области, остающиеся горячими после того, как остальная часть молнии уже остыла настолько, что перестала светиться. Возможно, оставшиеся горячие пятна — это точки изменения направления канала молнии.

Нет и общепринятой теории, объясняющей возникновение шаровой молнии. На самом деле теорий множество, но ни одна из них не может предсказать все наблюдаемые свойства шаровой молнии, в особенности время ее жизни. Похожий тип светящегося шара, называемого *плазменным шаром*, можно наблюдать в лаборатории или на электростанции, когда происходит электрический разряд. В разряде молекулы воздуха ионизируются: электроны вырываются из молекул, и положительные и отрицательные заряды разделяются. Это состояние вещества (*плазма*) существует меньше секунды, после чего электроны и ионизованные молекулы рекомбинируют.

Хотя считается, что шаровая молния живет несколько секунд (или даже больше), а время жизни плазменного шара значительно меньше, в большинстве установленных гипотез считается, что шаровая молния — это плазменный шар, образованный либо прямым ударом молнии, либо восходящим стримером. Предположительно, разряд ионизует либо воздух, либо вещество (землю, молниеотвод и т. п.) в нижней точке молнии или стримера. Однако, если плазменный шар образует молния, он должен обладать каким-то особым внутренним строением, чтобы прожить несколько секунд, а не исчезнуть мгновенно. Кроме того, он не должен быть слишком горячим, поскольку шаровая молния (в отличие от горячего воздуха) не поднимается вверх. Этот шар не может быть просто огнями святого Эльма — видимым разрядом, появляющимся на концах проводящих объектов, — поскольку шаровая молния движется, а огни святого Эльма неподвижны. Так что на сегодняшний день у нас нет убедительного объяснения структуры шаровой молнии.

## 5.6 • СПРАЙТЫ

В течение десятилетий пилоты, подлетающие ночью близко к грозовым облакам, время от времени видели гигантские вспышки высоко над тучами, возникающие сразу после того, как из туч в землю ударила обычная молния. Однако эти высокие вспышки бывали короткими и не слишком яркими, так что

большинство пилотов считали их иллюзией. Но позже, в 1990-х годах, эти вспышки были сняты на видео и получили название *спрайтов*. Если спрайты связаны с молнией, возникающей между тучей и землей, почему они появляются не прямо над тучами, а гораздо выше?

**ОТВЕТ** • Природа спрайтов не совсем понятна, но считается, что они возникают, когда из тучи в землю ударяет очень сильная молния, особенно если она переносит большое количество отрицательных зарядов от земли к туче. Сразу после переноса этих зарядов под тучей на земле возникает область со сложным распределением положительных зарядов. Отрицательные заряды в туче и положительные на земле создают электрическое поле как под тучей, так и над ней.

В этом поле атомы и молекулы воздуха ионизируются, то есть из них вырываются электроны. Однако ионизируются они, только если электрическое поле превысит некую критическую величину, зависящую от плотности воздуха. Непосредственно над тучей напряженность электрического поля велика, но зато воздух слишком плотный для ионизации. Выше над тучей поле немного слабее, но плотность воздуха намного меньше, поэтому там возможна ионизация. На этой большой высоте электроны не только отрываются от молекул, но и ускоряются настолько, что могут сталкиваться с другими молекулами, главным образом молекулами азота, и тогда атомы азота начинают испускать свет. Некоторые ученые считают, что спрайты — это коллективное излучение сталкивающихся молекул. Однако полный механизм возникновения спрайтов гораздо сложнее, чем предполагает эта модель. Кроме того, ученым еще предстоит объяснить различные формы спрайтов и *эльфов* — кольцевых структур, которые расходятся от спрайтов.

### 5.7 • МОЛНИЕОТВОДЫ

Правда ли, что молниеотвод защищает здание от удара молнии, и если да, то каким образом? Увеличивает ли молниеотвод вероятность удара молнии в здание? Каким должен быть верхний конец молниеотвода — острым или тупым?

**ОТВЕТ** • Основная цель молниеотвода — обеспечить ионизацию воздуха, плавное стекание заряда и недопущение удара молнии. Если удар молнии все же произошел, молниеотвод обеспечивает току короткий

и простой путь до земли. Для этого нужно, чтобы он не закончился в верхнем, сухом слое земли, а достал до более глубокого, влажного и лучше проводящего ток. (Разработаны специальные правила устройства молниеотводов; в землю он должен заглубляться на 2–2,5 м.) Молниеотвод не действует, когда ступенчатый лидер возникает где-то у основания облака, фактически он не действует до тех пор, пока ступенчатый лидер не подойдет близко к земле, лишь тогда от молниеотвода вверх навстречу лидеру отправляется *восходящий стример* (вдоль которого происходит ионизация). Их встреча замыкает путь, вдоль которого происходит ионизация, и, соответственно, между землей и основанием тучи перетекает заряд. Можно надеяться, что в этом случае возникающий при разряде ток не проникнет внутрь здания или в его стены, где он мог бы убить находящихся там людей или вызвать пожар.

Чтобы молниеотвод сработал, он должен возвышаться над самой высокой точкой здания. Как правило, молниеотвод обеспечивает защиту в пространстве, ограниченном поверхностью перевернутого конуса с вершиной на кончике молниеотвода и углом при вершине около 90° (существуют правила по расчету этого угла в зависимости от высоты молниеотвода и надежности защиты). Любой ступенчатый лидер, попадающий в этот воображаемый конус, предположительно ударит в молниеотвод, а не в здание.

В прошлом считалось, что для притягивания молнии верхний кончик молниеотвода нужно заострить. Это обосновывали тем, что на остром конце создается большая напряженность электрического поля, чем на тупом конце. Поскольку сильное электрическое поле может увеличить шансы восходящего стримера подняться и встретиться со ступенчатым лидером, можно сделать вывод, что острый конец предпочтительнее. Однако существует и противоположное мнение: острый конец увеличивает ионизацию молекул воздуха вокруг молниеотвода, что уменьшает шансы возникновения восходящего стримера.

Эксперименты с молниеотводами трудно проводить, поскольку лабораторные условия никогда в точности не воспроизводят естественные условия, а в природе они зависят от случайного удара молнии. Однако эксперименты показывают, что молния чаще ударяет в молниеотводы со слегка затупленными концами, чем в остrokонечные, — по-видимому, именно из-за высокой ионизации и стекания заряда с острия.

## 5.8 • СВИТЕРА, ДЕТСКИЕ ПЛАСТИКОВЫЕ ГОРКИ И ОПЕРАЦИОННЫЕ

Если вы, работая на компьютере, начнете снимать свитер, компьютер может выйти из строя. Если ребенок на детской площадке съедет с пластиковой горки и потом прикоснется к кому-нибудь, он может получить чувствительный удар током. Если хирург, приступая к операции, не наденет правильную обувь, пациент от его прикосновения может пострадать. В чем опасность таких ситуаций и почему она уменьшается при высокой влажности воздуха?

**ОТВЕТ •** Когда в соприкосновение входят различные материалы, заряд с одной поверхности может перейти на другую, и тогда первая поверхность окажется заряженной одним зарядом, а вторая — противоположным. Если поверхности потрутся друг о друга, они соприкоснутся во многих точках, и большое количество зарядов перейдет с одной поверхности на другую. Из-за трения на соприкасающихся поверхностях может возникать механическое повреждение, и это тоже увеличит количество зарядов, перешедших с одной поверхности на другую.

Этот перенос зарядов называется *электризацией трением*, или *контактной электризацией*, а образование зарядов — *трибоэлектричеством*. Если воздух влажный, поверхность быстро становится электронной из-за осаждаемой на ней влаги из воздуха. Но если воздух сухой, поверхности могут оказаться настолько сильно заряженными, что между ними будут проскакивать искры даже через воздух. Часто искры возникают между заряженной поверхностью и проводником, например другим человеком или металлическим предметом. Если вы в сухую погоду пройдете по ковру (не всякому) и, скажем, отрицательно зарядитесь, искра может проскочить между вашими пальцами и металлической ручкой двери или чем-то подсоединенным к земле, например водопроводным краном или клавиатурой компьютера.

Если вы коснулись этого предмета большим участком своего тела, например тыльной стороной ладони или предплечьем, электроны будут перетекать через большую площадь контакта и вы можете этого перехода и не заметить. Однако если вы поднесете к проводнику палец, вы очень даже заметите этот переход электронов. Поскольку палец — заостренный объект, избыток электронов на нем может создать сильное электрическое поле между ним и проводником. Это

поле может быть настолько большим, что вырвет электроны из молекул воздуха, находящегося между пальцем и проводником, и тогда между ними образуется проводящая цепь. Тогда избыточные электроны из тела смогут легко пройти по этой проводящей цепи через палец в виде искры и ее можно будет увидеть, услышать и почувствовать. Если хотите избежать искрения, используйте для контакта с объектом не палец, а участки тела большой площади, а лучше — прикасайтесь к нему металлическим предметом (монеткой, ключом), чтобы искра шла от ключа. Если захотите пошутить и, предварительно зарядившись, исподтишка прикоснетесь к мочке уха друга, между вами проскочит искра. Пошутить так — верный способ потерять друга.

Некоторые виды тканей при соприкосновении с кожей или одеждой из другого материала вызывают перенос заряда. Известно, что чаще всего искрят свитера, если их снимают в сухую погоду. Ребенок, съехавший с пластиковой горки, может получить такой сильный заряд, что его потенциал в конце спуска может достигнуть 10 000 В. Если ребенок притронется к другому предмету, особенно если это заземленный проводник, между ребенком и проводником может проскочить очень болезненная для него искра.

Образование искры может представлять очень серьезную опасность в хирургии. Если в операционной имеются легко воспламеняющиеся пары, искра может поджечь их. Применение широко использовавшихся раньше воспламеняющихся анестетиков было прекращено в 1950-е годы, так что опасность пожара уменьшилась. Искра, проскочившая между двумя поверхностями, может причинить серьезный вред пациенту, если одна из этих поверхностей находится внутри его тела. Обычно кожа человека имеет большое сопротивление и таким образом предохраняет сердце. Но если ток направится непосредственно в проводящую жидкость внутри тела, он может оказаться достаточно большим и нарушить нормальный ритм работы сердца. Возможность такого *микрошока* известна хирургам, поэтому они надевают специальную одежду, уменьшающую риск появления искры, а их обувь делается слегка проводящей, чтобы заряды могли стекать на пол сразу, как только появятся на одежде. Пол в операционных тоже делается частично проводящим, чтобы заряд мог уйти с него через заземление в землю.

В офисах и на производстве работники, имеющие дело с чувствительными полупроводниковыми

приборами, которые могут быть выведены из строя этими зарядами, часто носят на запястьях заземленные браслеты, обеспечивающие проводящую цепь между их телом и землей. Сопротивление этой цепи обычно довольно большое, так что заряд на человеке уменьшается постепенно, а не мгновенно, как при прохождении искры.

### 5.9 • АВТОМОБИЛИ, БЕНЗОНАСОСЫ И ОСТАНОВКИ В ПУТИ

Почему вас ударяет током, когда вы выходите из автомобиля и закрываете заднюю дверь? Почему ударяет током не во всех автомобилях, а только в некоторых? Почему на платной автодороге, когда вы останавливаетесь перед оператором в терминале оплаты, он не спешит забрать у вас деньги?

Пары бензина легко воспламеняются, тем не менее заполнение бака на заправочной станции — сравнительно безопасная процедура (естественно, если вы по глупости не закурите или не прольете бензин на очень горячую поверхность автомобиля). Однако иногда при заправке автомобиля случайно происходит возгорание. На некоторых видеороликах видно, как человек вставляет пистолет в горловину топливного бака, нажимает кнопку автоматического заполнения и садится обратно в автомобиль, чтобы согреться или забрать что-то из салона. Через несколько минут он вылезает из машины, хочет вытащить пистолет из бака, но когда подходит к ручке пистолета, бензин вспыхивает. Почему?

**ОТВЕТ •** Движущийся автомобиль заряжается при контакте шин с мостовой, электроны могут растечься по всему металлическому корпусу автомобиля, зарядив его до потенциала 10 000 В и более.

Если вы остановитесь, прекратится и процесс передачи заряда от мостовой к шинам, и избыточный заряд стечет через шины обратно с автомобиля на мостовую. Однако скорость этого процесса зависит от того, насколько велика проводимость шин. Если они сделаны из проводящего технического углерода (на полимерной связке), электроны уйдут достаточно быстро, если же они сделаны из непроводящего диоксида кремния (на полимерной связке), процесс стекания электронов может занять больше времени.

Предположим, шины вашего автомобиля имеют некую среднюю проводимость — такую, что автомобилю потребуется больше минуты на то, чтобы

в значительной степени разрядиться. Предположим также, что вы вышли из машины сразу после ее остановки и, открывая дверь, беретесь только за пластмассовую (непроводящую) ручку. Когда вы подойдете к задней металлической двери, чтобы закрыть ее, оставшиеся на корпусе автомобиля электроны перейдут через воздушный промежуток на ваши пальцы в результате пробоя, растекутся по вашему телу или начнут через него уходить в землю. При утренней поездке на работу или в школу это взбодрит вас лучше всякого кофе. Однако если вы хотите избежать удара током, то либо выжидайте несколько минут, чтобы заряд с машины полностью ушел, либо, прежде чем закрывать дверь, прикоснитесь к корпусу каким-либо металлическим предметом (монеткой, ключом и т. п.).

Внутри автомобиля водитель может остаться электронейтральным, если не будет притрагиваться к проводящим (а только к пластмассовым) частям. Однако и в этом случае он зарядится посредством индукции: подвижные электроны в теле водителя уйдут подальше от электронов, скопившихся на окружающих водителя проводящих частях машины. Предположим, водитель в таком заряженном состоянии подъезжает к терминалу оплаты. Если он сразу же дотронется до оператора терминала (заземленного), чтобы передать деньги или карту оплаты, между ними может проскочить искра, так как электроны на теле водителя постараются разбежаться подальше друг от друга.

Искра вряд ли возникнет во влажный день, поскольку влага, содержащаяся в воздухе, быстро отводит заряд и с водителя, и с автомобиля. А вот в сухой день оператору нужно выждать пару десятков секунд, прежде чем прикоснуться к протянутым деньгам, чтобы и с машины стек заряд, и индуцированный заряд на водителе уменьшился. Однако если водитель ждет в очереди, то к тому времени, как он подъедет к терминалу, заряд, возможно, уже исчезнет.

Раньше пожары при заливании бензина в бак на заправочных станциях иногда возникали из-за неудачной конструкции входной горловины топливных баков, сейчас их конструкция улучшена. Неприятность состоит в том, что, когда бензин течет через трубу, он заряжается. Слой бензина, непосредственно граничащий со стенками, так называемый *пограничный слой*, не двигается. Когда остальной бензин движется относительно пограничного слоя, электроны из него переходят в движущуюся часть жидкости. В результате пограничный слой становится положительно



заряженным, а в топливный бак течет отрицательно заряженный бензин.

Если топливный бак сделан из пластмассы, то есть не является проводником, эти отрицательные заряды собираются на внутренней поверхности бака и отталкивают электроны, находящиеся на любой ближайшей проводящей поверхности автомобиля. Эти отвергнутые электроны уходят подальше от бака, и некоторые из них могут закончить свой путь на участке корпуса автомобиля вблизи бензинового шланга. В этом случае между двумя поверхностями может проскочить искра и поджечь пары бензина, образующиеся при протекании горючего по шлангу. Чтобы исправить проблему, автомобиль заземляется с помощью шланга, и тогда заряд не будет собираться на корпусе автомобиля вблизи шланга.

Водитель автомобиля может оказаться заряженным, даже если автомобиль не движется, поскольку к переносу зарядов может привести контакт между одеждой водителя и материалом сиденья автомобиля. Предположим, водитель начинает заправлять бак топливом, нажав на рукоятке пистолета кнопку автоматического режима заправки, а потом зачем-то садится обратно в автомобиль. После того как он поерзает на сиденье, а потом вернется к бензонасосу, он уже будет нести на себе значительный заряд. Если между заправочным пистолетом и водителем проскочит искра, она может поджечь пары бензина и вызвать пожар. Водитель может избежать этой опасности, если не будет садиться в машину во время заправки или же, прежде чем брать за шланг, прикоснется к металлической заземленной конструкции.

Гонимые автомобили останавливаются для заправки после того, как проехали по трассе на огромной скорости и, соответственно, набрали большой заряд при контакте шин с покрытием трассы. Обычно механики начинают заливку топлива сразу после остановки либо с помощью шланга, либо из канистры. При этом вблизи входного отверстия топливного бака быстро накапливаются пары бензина. Чтобы в парах не пробежала искра, автомобиль либо заземляют сразу после остановки (к металлическому корпусу автомобиля приставляется длинный проводящий шест), либо на колеса автомобиля надеваются хорошо проводящие шины, через которые заряд быстро уходит в землю. Однако последнее решение не всегда желательно, поскольку проводящие шины (содержащие технический углерод) изнашиваются быстрее, чем непроводящие (содержащие диоксид кремния).

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 5.10 • ИСКРОМЕТНАЯ ЖЕВАТЕЛЬНАЯ РЕЗИНКА

Вот история, описанная в одном физическом журнале за 1953 год. Некий профессор ехал на своей машине с небольшой скоростью, а двое его друзей в другой машине пристроились сбоку и ехали с той же скоростью. Друг, сидящий во второй машине на пассажирском месте, на ходу протянул руку с пачкой жевательной резинки профессору. Когда расстояние между их руками уменьшилось до нескольких сантиметров, между ними произошел «разряд чудовищной силы», на мгновение вырубив обоих. К счастью, профессор не врезался во вторую машину за то время, что не контролировал себя и свой автомобиль.

Искра проскочила потому, что при движении автомобилей профессор и его друг приобрели разное количество зарядов, возможно, даже заряды разноименных знаков. Когда их руки сблизилась, электроны с одной руки начали через воздух перескакивать на другую, стремясь уменьшить разницу в количестве зарядов.

Этот трюк опасен, не советую его повторять.

### 5.11 • ЧЕМ ОПАСЕН РАСПЫЛЕННЫЙ В ВОЗДУХЕ ПОРОШОК

Почему так опасна электростатическая искра в среде, где в воздухе распылен порошок, например на угольной шахте или на мукомольной мельнице?

**ОТВЕТ •** Порошок в массе может быть совершенно негорючим, но когда он распылен в воздухе, каждую его частичку окружают со всех сторон молекулы воздуха. Горение — поверхностная реакция, а у мелкого порошка очень большая суммарная площадь поверхности. И если горение начинается в одной точке объема, в котором распылен порошок, тепловая энергия передается от одной частички порошка к другой так быстро, что пыль взрывается. Это значит, что большое количество энергии высвобождается неконтролируемым образом, при этом температура и давление в среде быстро повышаются. В силосной башне такой взрыв может разрушить всю постройку, а в угольной шахте — убить шахтеров. Несмотря на предосторожности, которые в настоящее время предпринимаются, такие взрывы все еще случаются.



В некоторых ситуациях взрыв может спровоцировать искра электрического разряда, если она имеет достаточную энергию. Такая искра может возникнуть в неисправных электрических приборах, но чаще — при разряде между двумя заряженными объектами, разряжающимися друг на друга, или же между заряженным объектом и землей.

Например, в 1970-х годах случился взрыв шоколадного порошка, когда его ссыпали через пластиковую трубу в бункер. При пролете через систему пластиковых труб крупинки порошка терлись друг о друга и о стенки труб и от этого заряжались. Когда они вылетали из последней трубы в бункер, между частичками порошка и заземленной поверхностью бункера проскочила искра. Искра могла возникнуть на частичках порошка, находящихся в воздухе во время их падения на уже образовавшуюся раньше в бункере кучу порошка. По другой версии, искра могла возникнуть на вершине конической кучи, когда частички порошка соскальзывали с ее склонов. Электрическое поле имело наибольшее значение на вершине кучи и недалеко от нее, так что искрообразование, возникающее, когда сильное электрическое поле ионизует молекулы воздуха, скорее всего, могло начаться именно там.

В действительности в силосных башнях и бункерах искры, по-видимому, возникают часто, но у них обычно недостаточно энергии, чтобы поджечь мелкие частички. Взрыв происходит тогда, когда случайно энергия искры (или, возможно, комбинации нескольких почти одновременно образовавшихся искр) превысит некоторое минимальное необходимое для взрыва значение. Инженеры не могут полностью исключить образование статических зарядов и искр при производстве порошков, но стараются, чтобы энергия искр оставалась меньше той, при которой уже возможен взрыв.

### 5.12 • ЧЕМ ОПАСНЫ АЭРОЗОЛЬНЫЕ БАЛЛОНЧИКИ

Распыленный сухой порошок или жидкий спрей из баллона с аэрозолем может загасить открытый огонь, например пожар на кухне. Как же тогда аэрозольный баллончик сам может превратиться в «огнемет»? Никогда не распыляйте ничего вблизи открытого огня, иначе вы можете сжечь и себя, и дом. Причем некоторые баллончики со спреем брызгаются огнем даже вдали от открытого огня — почему?

**ОТВЕТ** • Частицы спрея могут быть горючими, а высокая скорость, с которой они вылетают из баллончика,

может превратить их в огнемет. Если из баллончика распыляется сухой порошок, частички порошка и сам баллончик могут оказаться заряженными. Когда баллончик не соприкасается с чем-то проводящим, например с человеком, заряд может накапливаться до тех пор, пока не станет настолько большим, что между распыляемым порошком и баллончиком проскочит искра. Если мощность искры будет достаточной, порошок загорится. Однако если человек притронется к баллончику, что, вероятнее всего, и произойдет, большая часть заряда с баллончика перейдет к человеку и оставшегося заряда не хватит для проскакивания искры. Размер человека больше, чем баллончика, электрическая емкость, соответственно, больше, а значит, при том же заряде потенциал — меньше. Для слона эта ситуация менее опасна, чем для зайца, поэтому зайцы не пользуются спреями.

### 5.13 • ЧЕМ ОПАСНЫ БРЫЗГИ ВОДЫ

Почему, если в обычной ванной комнате включить душ и закрыть дверь, внутри комнаты в воздухе может возникнуть электрическое поле? Почему электрическое поле образуется вблизи водопадов? Некоторое время назад емкости танкеров для перевозки нефти отмывались с помощью струи воды, подаваемой в шланг под давлением. Почему такой способ очищения танкеров иногда приводил к взрывам? Чтобы избежать взрывов внутри танкера, в них стали вдувать инертный газ (например, азот), вытесняющий кислород. Почему же, несмотря на это, танкеры все еще взрывались?

**ОТВЕТ** • Когда вода ударяется о твердую поверхность, например поддон в душе, образуется заряженный аэрозоль. Более крупные капли обычно становятся положительно заряженными (они теряют электроны или отрицательные ионы), а менее крупные — отрицательно заряженными (они их притягивают). Поскольку большие капли быстро падают вниз, в воздухе остаются распыленными только отрицательно заряженные маленькие капли. Если вентиляция в душе плохая, количество распыленных заряженных капелек в воздухе быстро возрастает, и они создают большое электрическое поле. Но такая ситуация не опасна ни в ванной комнате, ни рядом с водопадом.

А вот при мытье нефтяного танкера струя воды из шланга ударяется в пол и стенки, и образующиеся при этом капли заряжаются, заполняя танкер туманом, образованным заряженными водяными каплями. Между этими каплями, рассеянными в воздухе,

и большим проводником, отверстием шланга или точкой заземления могут проскочить искры. Если в танкере остались пары нефти, искры могут поджечь их и спровоцировать взрыв.

Чтобы избежать такой опасности, можно перед мытьем закачать в танкер инертный газ, и тогда кислорода не будет хватать для взрыва. Однако этот способ вначале тоже не обеспечивал безопасность, поскольку генератор инертного газа создавал в нем разделение зарядов (в газе возникали ионы). До тех пор, пока проблема не была выявлена и решена, танкеры при мойке взрывались.

#### 5.14 • СВЕЧЕНИЕ ЛЫЖ

Любители покататься на лыжах ночью иногда замечают, что лыжи в темноте светятся. Что вызывает это свечение?

**ОТВЕТ** • Когда лыжи просто лежат на снегу, между ними и снегом происходит перенос заряда. Этот механизм обычно называют *контактной электризацией*. Механизм явления сложный, но мы просто скажем, что заряд может перетекать с одной поверхности на другую.

Предположим, что лыжи сделаны не из металла (металлические канты слабо влияют на эти эффекты). Тогда из-за перешедших из снега и собравшихся на нижней поверхности лыж зарядов материал, из которого сделаны лыжи, становится поляризованным. Это означает, что положительные и отрицательные заряды в молекулах слегка раздвинулись. В результате из-за того, что на нижней и верхней поверхностях лыж сосредоточатся заряды противоположных знаков, внутри лыж возникнет электрическое поле. Например, если лыжи перетянут электроны из снега вверх, нижняя поверхность лыж будет заряжена отрицательно, а верхняя — положительно (лыжи таким образом превратятся в конденсатор).

Когда лыжи заскользят по снегу, эффект разделения зарядов значительно усилится (это называется *трибоэлектрическим эффектом*), и между снегом и нижней (или верхней) поверхностью лыж полетят искры. Ночью, когда глаза привыкнут к темноте, лыжник сможет увидеть эти искры.

#### 5.15 • КАТАСТРОФА ДИРИЖАБЛЯ «ГИНДЕНБУРГ»

Немецкая гордость и чудо своего времени — дирижабль «Гинденбург» имел длину почти как три футбольных поля. Это был самый большой летательный аппарат из когда-либо построенных. Хотя он удерживался

в воздухе 16 баллонами опасного легковоспламеняющегося газообразного водорода, дирижабль проделал множество трансатлантических перелетов и ни разу не попал в аварию. Фактически ни один немецкий дирижабль никогда не попадал в аварию из-за водорода, хотя все они использовали водородные баллоны. Однако 6 мая 1937 года, когда «Гинденбург» готовился приземлиться на базе ВМС США в Лейкхерсте, на нем все-таки случился пожар.

Экипаж подождал, пока ливень почти закончится, и сбросил причальные канаты с дирижабля, которые подхватила наземная команда базы. В этот момент с земли на внешней обшивке дирижабля заметили рябь примерно на расстоянии трети от хвоста. Через секунду оттуда вырвалось пламя, и внутренность дирижабля озарил красный свет. Еще через 30 секунд горящий дирижабль упал на землю, погибли 36 человек, еще больше людей получили ожоги. Почему после стольких полетов без единого происшествия на дирижабле, летающем на водороде, случился пожар?

**ОТВЕТ** • Когда «Гинденбург» уже готовился к приземлению, с него на землю были сброшены намокшие от дождя (и ставшие токопроводящими) причальные канаты, заземлившие металлический каркас дирижабля, к которому они крепились. Между обшивкой и землей образовался проводящий путь, то есть потенциал каркаса стал равным потенциалу земли. При этом должна была заземлиться и внешняя обшивка дирижабля, но она была покрыта несколькими слоями герметика с большим электрическим сопротивлением (герметик плохо проводит ток). И эта обшивка осталась под потенциалом атмосферы на высоте 43 м, то есть на той высоте, где летел дирижабль. Из-за грозы этот потенциал относительно земли был довольно высоким.

Создалась опасная ситуация: потенциал обшивки резко отличался от потенциала металлического каркаса дирижабля. Очевидно, заряд растекся по мокрой внешней поверхности обшивки, и между ней и металлическим каркасом внутри проскочила искра. Есть две версии того, как искра вызвала пожар. Первая: искра подожгла слои герметика. Вторая — один из причальных канатов мог прорвать баллон с водородом, водород протек в полость между баллоном и внешней обшивкой, и искра подожгла водород. Рябь на обшивке, о которой писалось в сообщениях, свидетельствует в пользу именно этой версии. Так или иначе, огонь перекинулся на другие баллоны, и дирижабль упал

на землю. Если бы слой герметика на обшивке «Гинденбурга» лучше проводил ток (как это было у дирижаблей, изготовленных как до него, так и после), катастрофы, возможно, не случилось бы.

### 5.16 • ВОСПЛАМЕНЯЮЩАЯСЯ МЕДИЦИНСКАЯ КАТАЛКА

Часто пациентов с ожогами привозят на каталке в замкнутую камеру с атмосферой, насыщенной кислородом, и оставляют лежать на ложе-носилках, которые устанавливаются на металлическую раму. Когда сеанс лечения заканчивается, санитар стягивает ложе-носилки с пациентом с металлической рамы и перекладывает на каталку в коридоре, чтобы отвезти в палату. Были зарегистрированы по крайней мере два случая, когда носилки загорались с того конца, который последним покидал камеру. Загорание носилок, на которых лежит пациент, и так уже получивший ожоги, создает опасность для его жизни. Очевидно, в атмосфере, обогащенной кислородом, риск возгорания велик, но вопрос в том, как именно носилки могут загореться?

**ОТВЕТ** • При разборе случаев возгорания вскоре стало понятно, что между пациентом и ложе-носилками происходит разделение зарядов. Предположим, что электроны с пациента перешли на ложе-носилки и они стали отрицательно заряженными. Тогда некоторое количество электронов в металлической раме уйдет вниз и верхняя часть рамы окажется положительно заряженной, поскольку электроны распределяются по внешней поверхности проводника. Такая система из отрицательно заряженных ложе-носилков и положительно заряженной рамы напоминает конденсатор — электрическое устройство, в котором запасается заряд.

Может ли искра, пробежавшая между ложем и рамой, поджечь ложе? Не может, причем по двум причинам.

1. Электрическое поле между ложем и металлической рамой недостаточно велико, чтобы ионизовать атомы (выбить электроны из атомов и таким образом создать проводящий путь, по которому электроны из ложа перетекли бы в раму).
2. Энергии поля зарядов не хватит, чтобы вызвать загорание.

Однако ситуация меняется в момент, когда ложе-носилки съезжают с рамы, поскольку заряд собирается в небольшой области и оказывается рядом с зарядом

на металлической раме под ним. Из-за большой концентрации заряда электрическое поле и запасенная в нем энергия будут увеличиваться до тех пор, пока между ложем и рамой не проскочит искра, энергия в которой может оказаться достаточной для поджога ложа-носилков.

### 5.17 • СВЕЧЕНИЕ ПРИ ОТМАТЫВАНИИ СКОТЧА

Потушите свет и подождите 15 минут, пока глаза привыкнут к темноте, а затем начните равномерно отматывать скотч со втулки. Почему вдоль линии, по которой происходит отделение липкой ленты от мотка, возникает слабое свечение? Если вы будете отматывать ленту рядом с антенной достаточно чувствительного приемника, настроенного на частоту, где нет сигнала, в приемнике появится шум. Почему? Почему и свечение, и шум при высокой влажности исчезают?

**ОТВЕТ** • По мере того как клейкий слой на отматываемой ленте рвется и она отлепляется от ленты, оставшейся в мотке, заряженные частицы (положительные ионы и электроны) собираются в пятнах на двух разделяемых поверхностях. Пока еще эти поверхности не сильно разошлись, заряды, скопившиеся в разных пятнах, стремятся нейтрализовать друг друга, поэтому между пятнами с разноименными зарядами, расположенными либо на разных поверхностях, либо на одной из них, проскакивают искры. Поскольку в расширяющемся пространстве между двумя слоями липкой ленты затекает воздух, искры проскакивают через него. Искры в основном состоят из электронов, а воздух — главным образом из молекул азота. Так что когда искры проскакивают с отрицательного пятна на положительное, электроны по дороге сталкиваются с молекулами азота и возбуждают их. Молекулы почти мгновенно возвращаются в основное невозбужденное состояние, при этом испускается свет на синем краю видимого диапазона и в области ультрафиолета. Слабое свечение, которое мы видим вдоль линии отделения ленты от мотка, — это суммарное свечение, вызванное разрядами и светом, излучаемым возбужденными молекулами азота при их переходе в основное состояние.

При проскакивании искр испускаются волны и в радиочастотном диапазоне. Поэтому, если вы отматываете липкую ленту вблизи радиоантенны, она улавливает некоторые из этих волн. Интенсивность радиосхума в первом приближении пропорциональна интенсивности видимого света.

Высокая влажность приводит к тому, что влага проникает в пространство между двумя поверхностями ленты вместе с воздухом и нейтрализует заряженные участки на ленте, тем самым предотвращая искрение.

В прошлом, когда использовались пленочные фотоаппараты, искрение иногда мешало фотографам. Когда пленка накручивалась на ролик или скручивалась с него, между раздвигающимися поверхностями пленки проскакивали искры. Везде, где проскакивали искры, пленка оказывалась засвеченной, и при проявлении пленки на ней были видны узоры, образованные искрами (а ведь совсем не это люди хотели видеть на семейных фотографиях).

### 5.18 • ПЕТРУШКА, ШАЛФЕЙ, РОЗМАРИН И ТИМЬЯН

Если липкую ленту оторвать от пластиковой поверхности и на ее место осторожно нанести смесь из двух размолотых в пыль порошков, почему эти порошки разделятся — один соберется в одной области, а второй — в другой?

Тонкий слой порошковой пыли поможет узнать кое-что интересное об искре, которая возникает, например, если сначала походить по ковру, а потом поднести палец к большому металлическому предмету или водопроводной трубе. Для этого квадратик майларовой (лавсановой) пленки нужно прикрепить по краям, скажем, к металлическому шкафу. Затем походить по ковру, чтобы зарядиться (не все ковры подходят для эксперимента, а только некоторые; к тому же высокая влажность может испортить эксперимент). Если после этого поднести палец (или металлический ключ, зажатый в руке) к пленке, через воздушный зазор мгновенно проскочит искра. Почему, если осторожно опылить пленку смесью двух порошков, на ней остается след потока электронов в этой искре?

А вот как этот эффект можно использовать, если у вас есть под рукой смесь мелко размолотых трав или порошок из тонера принтера или ксерокса (осторожно, порошок пачкается и может испортить одежду и оргтехнику). Если порошки в смеси имеют разный цвет, разделение на компоненты будет более наглядным.

Порошки засыпаем в мягкий пластиковый контейнер и туда же бросаем металлические болты или гайки. Теперь сильно потрясем контейнер, чтобы порошки как следует перемешались. Затем сожмем корпус контейнера, чтобы выпустить через отверстие небольшое количество смеси, и подождем, когда она осядет

на пластиковую поверхность. Потом можно наклонить поверхность и слегка постучать по ней, чтобы лишний порошок ссыпался вниз.

**ОТВЕТ** • Когда некоторые порошки смешивают и встряхивают, при столкновениях между разными видами порошинок происходит разделение зарядов: на одних появляются избыточные электроны, перешедшие с порошинок другого типа. Когда липкая лента отдирается от неметаллической поверхности, на поверхности остаются пятна, заряженные положительно, и пятна, заряженные отрицательно. Часть зарядов из пятен вскоре уйдет из-за влаги, содержащейся в воздухе. Они могут уйти и если «непроводящая поверхность» в действительности немного проводит. Если немного порошковой смеси рассыпать над поверхностью, на которой имеются заряженные пятна, частички порошка будут осаждаться на ней, причем отрицательные заряды соберутся на положительно заряженных пятнах, а положительные — на отрицательно заряженных. Если порошки окрашены в разные цвета (например, смесь черного порошка тонера и коричневой корицы), пятна становятся видимыми. Этот эффект особенно наглядно можно наблюдать на некоторых смесях, например смеси измельченного красного перца и порошка для тонера. А вот перец и мука притягивают друг друга так сильно, что даже «не замечают» заряженные пятна на пыльной поверхности и покрывают ее почти ровным слоем.

Когда искра проскакивает между пальцем и майларовой (лавсановой) пленкой, прилепленной к большому металлическому предмету, поток зарядов оставляет на пленке заряженные области, по крайней мере до того, как из-за влаги заряд оттуда уйдет. Если майларовую пленку слегка опылить смесью молотого тмина и порошка для тонера, на ней проявятся узоры одного из двух основных типов, называемые *фигурами Лихтенберга* в честь немецкого ученого и публициста Джорджа Кристофа Лихтенберга, открывшего их в 1777 году.

Если, походив по ковру, вы зарядитесь отрицательно, то есть у вас появится избыток электронов, они перетекут с пальца на пленку, и там вокруг искры появится круглое пятно отрицательных зарядов (можно будет разглядеть и протянувшиеся от него тонкие радиальные линии). Если же вы зарядитесь положительным зарядом и у вас образуется недостаток электронов, электроны будут вырываться с поверхности пленки и устремятся по разветвленным линиям к искре,



а оттуда перетекут на ваш палец. Разветвленные линии при этом останутся положительно заряженными. Так что, если на порошке, которым покрыта пленка, образуется отрицательно заряженное круглое пятно, значит, вы зарядились отрицательным зарядом. А если на нем видны положительно заряженные разветвленные линии, значит, вы зарядились положительным зарядом. У некоторых людей, ставших жертвами молнии, на коже тоже обнаруживался узор из разветвленных линий, выжженных молнией.

Некоторые магазины, торгующие научными сувенирами, продают небольшие плексигласовые цилиндрики или кубики, внутри которых выжжены разветвленные узоры. Чтобы получить такой узор, кусочек плексигласа (оргстекла) протягивается через пучок электронов в *электронном ускорителе* (установка, в которой электроны ускоряются электрическим полем до очень больших скоростей). Электроны останавливаются внутри плексигласа и оказываются в ловушке. После этого кусок плексигласа быстро ставится на заземленную подложку, а к противоположной стороне образца прикасаются заземленным остроконечным проводником. Из-за высокой концентрации электронов внутри образца возникает сильное электрическое поле, особенно в месте его касания заостренным проводником, и там проскакивает искра. Высокая температура, возникающая при прохождении искры, приводит к тому, что плексиглас по ее траектории обугливается и, следовательно, становится проводящим. Поэтому электрическое поле распространяется от этой токопроводящей линии внутрь кубика. И от новых мест концентрации электрического поля тоже побегут искры и прожгут новые токопроводящие пути, и так будет продолжаться до тех пор, пока электроны, закачанные в плексиглас на ускорителе, не уйдут в заземленный заостренный проводник. Все эти прожженные в плексигласе линии образуют внутри кубика видимую разветвленную древоподобную структуру.

### 5.19 • СВЕЧЕНИЕ ВИНТЕРГРИНОВОГО МАСЛА\* В ТЕМНОТЕ

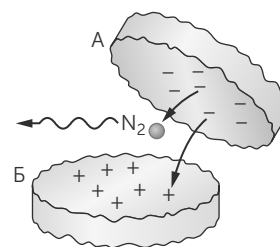
Поставьте такой эксперимент: вдвоем с другом проведите четверть часа в темноте — дома, забравшись в шкаф, или безлунной ночью на улице. И после этого

\* Винтергриновое (гуалтериновое) масло — эфирное масло, получаемое из листьев гуалтерии. Применяется в медицине для лечения воспалительных процессов (например, ревматизма). *Прим. пер.*

попросите друга пожевать пастилку «лайфсейвер» (она производится в виде спасательного круга и пропитана винтергриновым маслом), держа при этом рот раскрытым, чтобы вы могли разглядеть, что происходит у него во рту. Почему поначалу при каждом укусе во рту у него возникает слабое голубое свечение и почему позже, сколько бы они ни жевал, свечение не появляется? (Если не хочется жевать конфетку, можно сжимать ее плоскогубцами, пока не треснет.)

Почему жидкий напиток тоник имеет слабый голубоватый оттенок?

**ОТВЕТ** • Всякий раз, когда вы раскусываете кристаллик мятного сахара, образовавшиеся более мелкие кусочки приобретают заряды противоположного знака. Предположим, кристаллик раскололся на два кусочка — А и Б, причем А зарядился отрицательным зарядом, а Б — положительным (рис. 5.3). Некоторые электроны с куска А будут перетекать через зазор и оседать на кусочке Б. Поскольку воздух попадет в этот зазор, электронам придется двигаться через воздух. Там они будут сталкиваться с молекулами азота, передавать им энергию и возбуждать их. Когда молекулы будут возвращаться в основное — невозбужденное — состояние, они будут испускать свет в ультрафиолетовом диапазоне, и его вы увидеть не сможете. Однако молекулы винтергринового масла, расположенные на поверхностях кусочков пастилки, поглощают ультрафиолетовые лучи и при этом испускают голубой свет, который уже можно увидеть. Это как раз то свечение, которое вы наблюдаете во рту вашего друга. Процесс поглощения света в одном диапазоне длин волн (в данном случае — ультрафиолетовом) и испускание света в более длинноволновом диапазоне (в данном случае — голубого света) называется *флуоресценцией*.



**Рис. 5.3 / Задача 5.19.** Два кусочка пастилки «лайфсервер» с винтергриновым маслом в момент их отрыва друг от друга. Электроны перетекают с отрицательно заряженной поверхности кусочка А на положительно заряженную поверхность кусочка Б и по дороге в воздухе сталкиваются с молекулами азота.



Хинин, содержащийся в тонике, в этом смысле похож на винтергриновое масло: он поглощает ультрафиолет и испускает голубой свет, в результате чего тоник приобретает голубоватый оттенок. Это свечение становится заметнее, если в темной комнате тоник поднести к флуоресцентной лампе. Тогда хинин превратит часть ультрафиолетового излучения лампы в голубой свет. Этот эффект станет менее заметным, если освещать тоник через пластик или стекло, например через стенки бутылки для тоника, поскольку и пластик, и особенно стекло поглощают ультрафиолет. Эффект покажется сильнее, если облучать тоник черной (ультрафиолетовой) лампой — в этом случае видимое излучение самой лампы не будет мешать наблюдениям.

## 5.20 • ОГНИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

По сообщениям очевидцев, иногда при землетрясениях ночное небо окрашивалось в красный цвет, а порой в тех местах видели светящиеся пятна на земле или движущиеся в воздухе светящиеся объекты. Что вызывает эти свечения, которые называются *огнями землетрясений*?

**ОТВЕТ •** Существование огней землетрясений остается под вопросом, несмотря на сотни сообщений на эту тему и множество достоверных фотографий. Огни могут быть разных видов и иметь разное происхождение. Вот два из множества объяснений происхождения этих огней.

1. Если при подземных толчках в скалах создается давление, достаточное для того, чтобы их расколоть, а потом и разрушить, то при этом образуется пыль, газ и свободные электроны. Вероятно, электроны ионизируют молекулы газа, и они испускают свет.
2. При землетрясении движение слоев земли вызывает воспламеняющиеся газы, до этого находившиеся под землей, а когда эти газы воспламеняются (вероятно, искрой, проскакивающей между заряженными поверхностями или частями), возникает свечение.

## 5.21 • ОГНИ СВЯТОГО ЭЛЬМА И СВЕЧЕНИЕ В АНДАХ

Почему иногда над верхушками мачт кораблей или другими остроконечными предметами образуются электрические искры? Эти искры называют *огнями святого Эльма* или *короной*. Почему над далекими

пирами Анд можно увидеть, правда, очень редко, какое-то свечение?

**ОТВЕТ •** Огни святого Эльма образуются из-за пробоя воздушного слоя вблизи очень острых проводящих предметов вроде мачт кораблей, антенн или крыльев самолета. Когда электрическое поле в воздухе превышает свое нормальное значение (например, перед грозой), оно становится особенно большим на концах проводящих предметов, где могут концентрироваться заряды. Если напряженность поля в воздухе вблизи кончика проводника превысит некое критическое значение, поле может выбить электроны из молекул воздуха и разогнать их до больших скоростей. Когда эти электроны сталкиваются с молекулами воздуха, они возбуждают молекулы, а когда в конце концов молекулы возвращаются в основное — невозбужденное — состояние, они излучают свет, который и могут увидеть окружающие. При протекании тока через воздух выделяется энергия, температура воздуха повышается, воздух расширяется и это, возможно, приводит к тому, что при разряде иногда можно услышать потрескивание. Считается, что огни святого Эльма сами по себе опасности не представляют, но сигнализируют о приближении грозы.

Причины возникновения свечения над Андами непонятны, а само явление наблюдается чрезвычайно редко. Я не думаю, что это тоже огни святого Эльма, поскольку, чтобы их увидеть, наблюдатель должен находиться относительно близко. А свечение над Андами — явление гораздо более крупного масштаба, и, скорее всего, это разряды, возникающие в заряженных, сдуваемых ветром снегах на вершинах Анд.

## 5.22 • ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Почему электрическую энергию передают при высоких напряжениях и малых токах, а не при низких напряжениях и больших токах? Поскольку мощность — это произведение тока на напряжение, в этих двух случаях мощность должна быть одной и той же. Почему передача происходит с использованием переменного тока (обозначается буквами AC), который изменяется как по направлению, так и по величине, а не постоянного тока (обозначается буквами DC), который не меняется?

Когда высоковольтная линия передачи требует ремонта, компания-поставщик не может просто отключить ее, поскольку для этого иногда пришлось бы

оставить без света целый город. Ремонт должен проходить при работающей, то есть находящейся под напряжением, линии. Оборудование, необходимое для ремонта, включает в себя вертолет, зависающий над высоковольтной линией, к посадочному шасси которого приделана платформа, и на одном ее конце сидит техник-ремонтник. Почему, когда техник приближается к проводу и берется за него, его не бьет током?

В ряде районов высоковольтные линии представляют собой главную угрозу для популяции птиц. Очевидно, птицы могут пораниться или погибнуть, если врежутся в провод. Но опасность их подстерегает и если они сядут на провод, опору или вышку, к которой крепятся высоковольтные провода, как на насест. Почему?

**ОТВЕТ** • Когда электрический ток идет по проводам, часть электрической энергии теряется, превращаясь в тепловую энергию, поскольку электроны (их перенос и образует ток) при движении по электрической цепи сталкиваются с атомами. Количество теряемой при столкновениях электрической энергии пропорционально сопротивлению провода и квадрату тока. И поэтому, чтобы уменьшить потери, для передачи электрической энергии нужно использовать малые токи. Так что если требуется передать достаточно большую энергию, напряжение должно быть высоким (сегодня самые высоковольтные эксплуатирующиеся линии — на 500 или 765 кВ). В цепях, предназначенных для снабжения электроэнергией домов, ставится трансформатор, понижающий напряжение до необходимого уровня и повышающий ток, значение которого ограничивается сверху с помощью электрических реле и плавких предохранителей.

Вначале поставщиком электричества в США была компания Томаса Эдисона, и при передаче энергии использовался постоянный ток. Позже энергию стала поставлять компания Джорджа Вестингауза, и она использовала уже переменный ток. Соперничество компаний было довольно жестким, каждая из них стремилась доказать, что именно ее способ передачи безопаснее, чем способ конкурента. Представители Эдисона провели ряд демонстраций, на которых безжалостно подвергали ударам тока собак, чтобы показать, насколько опасен переменный ток. Однако в конце концов Вестингауз выиграл соревнование, в основном по практическим соображениям. Он смог передавать энергию при высоком напряжении, а затем

с помощью трансформаторов понижать его и подавать в таком виде в дома. Преобразовать низкое постоянное напряжение в высокое (для передачи) и обратно в низкое (для потребителя) в то время было крайне трудно. Сегодня это преобразование осуществляется полупроводниковыми приборами, и если бы человечество сегодня делало выбор между постоянным и переменным напряжением, все могло бы сложиться иначе.

Когда техник приближается к проводу находящейся под напряжением высоковольтной линии передачи, электрическое поле, которым окружен провод, наводит на его тело потенциал, почти равный потенциалу провода. Чтобы уравнивать потенциалы, техник протягивает к проводу проводящий *шест*, и между внешним концом шеста и проводом может проскочить искра, отчего рука может слегка онеметь. Чтобы избежать удара током, техник должен быть изолирован от всех предметов, электрически замкнутых на землю, а его тело должно все время находиться при одном и том же потенциале, равном потенциалу провода, по которому идет ток и с которым он собирается работать. Для этого он надевает комбинезон, шапку и перчатки из проводящего материала и с помощью проводящего шеста подсоединяется к проводу.

Птица может сидеть на высоковольтном проводе и чувствовать себя в безопасности, поскольку ее сопротивление току гораздо больше, чем сопротивление участка провода между ее лапками. Однако если большая птица опустится на провод достаточно близко к заземленной опоре высоковольтной линии, она может замкнуть цепь, и возникнет то, что называется *пробоем*: ток потечет в землю через птицу и убьет ее.

Хотя этот вид пробоя иногда случается, гораздо более вероятен другой его вид, связанный с птичьим пометом. Если птица сядет на какую-то часть заземленной опоры, например на перекладину, под которой натянута проволока, то жидкие экскременты могут образовать электрическую цепь, соединяющую птицу с проводом, в результате возникнет пробой. Проблемы могут возникнуть и из-за накопления на проводах экскрементов, пусть даже и твердых. Ведь дождь, град или снег могут их размочить, и электрическая цепь с проводом замкнется. В районах, где бывает много снега и льда, замыкание электрических цепей вообще является проблемой, а птичий помет усугубляет дело, поскольку способность воды проводить ток возрастает при растворении в ней ионов, содержащихся в экскрементах.

### 5.23 • ТОК ИЛИ НАПРЯЖЕНИЕ: ЧТО ОПАСНЕЕ ДЛЯ ЛЮДЕЙ?

Что травмирует или даже убивает человека: ток или электрический потенциал (напряжение)? Как именно человек травмируется? Чем объясняется опасность работы с электрическими устройствами на мокром полу, о которой нас всех предупреждают?

**ОТВЕТ** • Травмирует человека ток, прошедший через его тело. Опасность электрического потенциала связана с возможным прохождением тока, и от него зависит как энергия, которую несет поток электронов, так и сила, заставляющая электроны двигаться.

Например, если в США коснуться в доме одной рукой провода, находящегося под напряжением, а другой — заземленного объекта, то разность потенциалов между руками может достичь 170 В\* (амплитудное значение при эффективном напряжении 120 В), и эта разность потенциалов вызовет протекание через руки тока. Однако величина тока зависит от электрического сопротивления току. Обычно сопротивление определяется в основном кожей, а сухая кожа имеет большее сопротивление. Поэтому, если электрик случайно возьмется руками за провода, из-за большого сопротивления кожи ток может не достичь смертельного значения.

Однако если кожа влажная, на ней имеются открытые раны или она намазана проводящим гелем, сопротивление току будет маленьким, и тогда через тело может пойти большой ток. Аналогично, если человек коснется провода, находящегося под напряжением (или незаземленного электрического устройства), стоя на мокром полу, между рукой и ногами может протечь смертельно опасный ток.

Хотя реакция на токи у разных людей разная и зависит в том числе от пола человека и того, какой ток — постоянный (AC) или переменный (DC) — проходит через него, есть, однако, некоторые общие закономерности.

- Ток менее 0,001 А: не ощущается.
- Ток 0,001 А: пощипывание или ощущение тепла.
- Ток 0,001–0,010 А: непроизвольное сокращение мышц, боль.
- Ток 0,010–0,050 А: желудочковая фибрилляция сердца.

\* При эффективном напряжении 230 В (современный российский стандарт) амплитудное будет 325 В (амплитудное в 1,414 раза больше эффективного). Прим. ред.

- Ток более 0,050 А: возможна остановка дыхания и сердцебиения.

Если ток вызвал лишь непроизвольное сокращение мышц, первая судорога может просто вызвать болезненные ощущения. Однако если пораженный током человек не сможет оторваться от источника тока из-за спазма мышц, сопротивление тела будет постепенно уменьшаться, а ток через тело — постепенно увеличиваться, в результате будет возрастать опасность и усиливаться боль. Если спасатель попытается оттащить пострадавшего от источника тока, судороги могут начаться и у спасателя, поскольку он не сможет оторваться от спасаемого и столкнется с той же проблемой — постепенным увеличением тока через свое тело.

Если же у пострадавшего началась желудочковая фибрилляция сердца, его хаотичные неконтролируемые сокращения и расширения приведут к тому, что оно перестанет качать кровь и это может стать губительным для мозга. В этом случае срочно потребуются помощь медиков с дефибриллятором.

Если при ударе током сердце останавливается, как это происходит при воздействии на сердце дефибриллятора, оно может перезапуститься само. Однако, если из-за непроизвольного сокращения мышц груди остановилось дыхание, оно может само и не восстановиться. Пока не началось кислородное голодание мозга, пострадавшему в этом случае понадобится реанимация с помощью искусственного дыхания рот в рот.

Ожоги возникают из-за выделения тепла при протекании тока. Если ожоги поверхностные, их можно вылечить, а вот внутренние ожоги лечить значительно труднее.



## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 5.24 • НЕСЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ

Однажды поздно вечером в квартире главного медэксперта Нью-Йорка доктора Милтона Хелперна раздался телефонный звонок. Звонил родственник человека, который погиб минувшей ночью на станции нью-йоркской подземки, предположительно упав с платформы на рельсы. На путях там три рельса, причем третий рельс — активный, на нем напряжение относительно двух других рельсов и земли. Очевидно, погибший получил травму, соединив своим телом третий рельс по крайней мере с одним из двух других рельсов и таким образом заземлив его, в результате чего большой ток прошел через его тело.

По запросу семьи доктор Хелперн провел вскрытие погибшего, но не нашел подтверждения инсульта или сердечного приступа, что позволило бы предположить, что мужчина случайно упал на рельсы. Однако он обнаружил странные ожоги на большом и указательном пальцах правой руки, а также на интимном месте.

Доктор Хелперн начал расследование обстоятельств жизни погибшего и выяснил, что тот частенько выпивал, а в состоянии опьянения становился агрессивным. И чтобы продемонстрировать свою воинственность, он прилюдно мочился. Доктор Хелперн сделал заключение, что последний акт агрессии покойного проявился в том, что он, стоя на платформе, помочился на третий рельс, не учитывая, что моча — хороший проводник. Ток, прошедший через его тело, убил его, оставив ожоги, поначалу так удивившие доктора.

### 5.25 • ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОКА В ХИРУРГИИ

Электрохирургия — это метод хирургического лечения, когда переменный высокочастотный ток пропускается через участок тела пациента через узкий проводящий зонд. Это позволяет врачу не только рассечь ткани, но и прижечь кровеносные сосуды и таким образом избежать потери крови (при нагреве кровь свертывается в небольшой области вокруг разреза).

Чтобы пошел ток, электрод (и, следовательно, область разреза) должен стать частью электрической цепи. По одной методике этой процедуры цепь состоит из зонда, пациента и электрода, помещенного под пациентом. Когда такие операции только начинали

делать, по окончании пациент получал серьезные ожоги. Почему это происходило?

**ОТВЕТ** • При проведении операции с использованием электродонда нужно, чтобы в точке рассечения сосредоточился большой ток. Но если второй электрод находится под пациентом, ток вблизи нижнего электрода должен растечься по гораздо большей области, иначе он обожжет тело в месте его контакта с этим электродом. Поэтому нижний электрод делается широким и повторяет форму тела, чтобы обеспечить контакт с телом на большой площади, а не в отдельных точках. Когда эти операции только начинали применяться, такие предосторожности не соблюдались, и пациенты получали ожоги.

### 5.26 • ПОЖАРЫ И ВЗРЫВЫ ПРИ ХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ

Хирургические бригады предпринимают все меры предосторожности, чтобы избежать пожаров и взрывов в операционной при проведении операций. До 1950-х годов серьезный риск представляли использовавшиеся тогда воспламеняющиеся анестетики. С тех пор как стали применять другие виды анестезии, частота пожаров и взрывов уменьшилась, но они все еще иногда случаются. Вот два сравнительно недавних примера.

*Трахеостомия.* Когда очень полного человека оперируют по поводу остановки дыхания во сне (нарушение проходимости каналов, по которым поступает воздух, вызывающее, в частности, храп), чтобы кислород начал поступать в легкие, на шее (в трахее) пациента делается надрез. Эта операция называется трахеостомией, и она состоит в том, что через введенную в этот надрез трубку пациенту вводится чистый кислород. Однако толстый слой жира на шее пациента затрудняет эту операцию, а кровь продолжает сочиться и после окончания операции. Во время одной подобной операции кровоточащий сосуд вблизи разреза трахеи прижгли методом электрокоагуляции с использованием переменного высокочастотного тока. И вдруг ткани вокруг надреза вспыхнули, над шеей пациента поднялось пламя на полметра в высоту. Пламя потушили, накрыв его хирургическими простынями. Но почему оно возникло?

*Удаление полипа.* Во время колоноскопии колоноскоп вводят в прямую кишку, чтобы с его помощью отыскать и удалить полип на стенке кишки. Когда полип найден, его захватывают петлей и удаляют, пропуская через петлю ток. Чтобы остановить кровотечение,

точка прикрепления полипа к стенке кишки прижигается током. Во время одной такой операции на стадии прижигания произошел громкий взрыв, голубое пламя вырвалось из свободного конца колоноскопа почти на метр, пациент закричал и попытался спрыгнуть со стола. Что вызвало взрыв?

**ОТВЕТ • Трахеостомия.** Ток высокой частоты нагрел подкожный жир, расположенный вблизи точки надреза, которая находилась в атмосфере чистого кислорода. Жир мгновенно вспыхнул. В других случаях возгорания при трахеостомии или хирургических операциях в носу, горле или во рту от электрического нагревающего устройства или лазера вспыхивали пластиковые детали оборудования, поскольку пластик легко загорается в атмосфере чистого кислорода.

**Удаление полипа.** Пищеварительная система человека производит горючие и взрывоопасные газы — водород и метан, которые составляют до 40% всего образуемого в толстом кишечнике газа. Если прижигание электрическим током выполняется в атмосфере водорода, метана или кислорода, нагрев (или искра) могут вызвать взрыв газа, что приведет к ожогам и разрыву внутренних органов. Поэтому к таким процедурам, как колоноскопия или удаление полипа, необходимо серьезно готовиться — соблюдать диету и освободить кишечник. Если очистить кишечник полностью не удалось, врач может закачать в него невоспламеняющийся газ.

Воспламеняющиеся газы могут образовываться и в желудке, если он не освобождается полностью и регулярно. Такое случается, если, например, человек страдает сужением привратника желудка, затрудняющим прохождение пищи из желудка в кишечник. Лишнее давление из-за скопления газов в желудке вызывает у человека отрыжку. Был случай, когда, закуривая, человек непроизвольно отрыгнул; сигарета вылетела у него изо рта как ракета, при этом губы и пальцы обгорели. В другой раз нечто подобное произошло с человеком, который наклонился над столом, чтобы прикурить от поднесенной кем-то зажигалки. Газ при отрыжке вышел через нос и вспыхнул, пламя вырвалось из обеих ноздрей, и человек превратился в огнедышащего дракона. В медицинской литературе описан случай, когда хирург для вскрытия желудка вместо обычного скальпеля использовал электрический; искра от него подожгла скопившийся там газ, газ вспыхнул и горел голубым пламенем около 10 секунд.

## 5.27 • ЛИМОННАЯ БАТАРЕЯ И ПОКАЛЫВАНИЕ В ЗУБЕ

Самодельную батарейку можно собрать, воткнув в лимон цинковый штырек (гвоздь, гальванически покрытый цинком), а потом сделать сбоку у лимона надрез и всунуть туда медную монетку. Между штырьком и монеткой установится разность потенциалов, примерно равная одному вольту. Если несколько таких лимонных батареек соединить *последовательно* (одну за другой) и подсоединить к маленькой лампочке, она будет гореть, хотя и слабо — из-за высокого сопротивления лимона. Как в лимоне может возникнуть ток и разность потенциалов? Вместо лимона можно использовать и некоторые другие пищевые продукты.

Вы заметите похожее явление во рту, если в зубе есть металлическая пломба и на него случайно попал кусочек алюминиевой фольги или еще какая-нибудь полоска металла, — там тоже может возникнуть ток и разность потенциалов. Что вызывает покалывание, которое вы в этом случае чувствуете в зубе и прилегающей десне?

Хозяйки часто заворачивают еду в алюминиевую фольгу. Однако если пищевые продукты положены в контейнер из нержавеющей стали и закрыты фольгой, а та контактирует с едой, фольга постепенно может раствориться в пище в местах ее контакта с фольгой. Почему это происходит?

**ОТВЕТ •** Лимон с двумя электродами работает как любой гальванический элемент, описанный в школьных учебниках. Вкратце: атомы данного вещества имеют тенденцию забирать электроны у соседних атомов другого вещества или отдавать их ему. Когда гальванизированный гвоздь втыкается в лимон, цинк, которым покрыт гвоздь, стремится отдать электроны, в результате на его поверхности образуются положительные ионы цинка и на нем устанавливается определенный электрический потенциал. Вблизи медной монетки в лимоне ионы водорода из лимонного сока стремятся забрать электроны и превратиться в нейтральные атомы водорода. И в этом случае тоже возникает некоторый электрический потенциал. Если гвоздь соединить проводом с монеткой, электроны, ушедшие из цинка, покрывающего гвоздь, перейдут по проводу к монетке и в результате достигнут ионам водорода.

Похожий процесс потери и получения электронов идет, когда алюминиевая фольга касается металлической пломбы в вашем зубе, а пространство между двумя этими поверхностями в основном заполнено



слюной. Система «фольга — слюна — пломба» образует батарейку, и через точки прямого контакта между фольгой и пломбой или через окружающую зуб десну начинает идти ток.

Аналогичный процесс происходит и когда пищевые продукты кладутся в миску из нержавеющей стали и накрываются алюминиевой фольгой. Система «сталь — пища — фольга» может стать батарейкой, в которой ток пойдет через точки непосредственного контакта фольги со стальной миской (скорее всего, контакт возникнет по всей длине ободка, по которому фольга обычно прижимается к миске). Когда фольга окисляется, то есть атомы алюминия превращаются в ионы алюминия, они растворяются в пище, особенно если в миске находится что-то вроде томатной пасты. Поэтому совет: используйте пластиковую пленку вместо алюминиевой фольги или же пластиковый контейнер вместо стального.

## 5.28 • ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СКАТЫ И УГРИ

Рыбы вроде гигантского электрического ската *Torpedo nobiliana* из Северной Атлантики или электрических угрей *Electrophorus* из Амазонки способны вырабатывать достаточно большой ток — настолько, что он может убить или оглушить жертву и даже парализовать человека. К примеру, по некоторым данным, электрический скат может послать импульсный разряд с напряжением 60 В при силе тока 50 А (разные авторы называют разные значения, в частности — на порядок меньшие токи). Раньше электрические рыбы использовались в медицине, например при постоянных мигренях, — электрического ската прикладывали прямо к болевым точкам в качестве примитивной формы шоковой терапии. Электрические свойства рыб были известны и древним охотникам, они быстро разобрались, какую рыбу нельзя хватать голыми руками или насаживать на мокрое, то есть проводящее, копьё.

Многие другие виды рыб производят электрическое поле для того, чтобы ориентироваться в темной и мутной воде или находить нужный объект, в частности особь своего вида. Эти рыбы могут изменять свое электрическое поле таким образом, чтобы их можно было опознать. Каким же образом живым существам удается вырабатывать ток, создавать электрическое поле и электрический потенциал?

**ОТВЕТ** • Источник этих электрических эффектов следует искать в так называемых *электроцитах* — клетках,

похожих на нервные и мышечные клетки. В обычном состоянии их мембраны пропускают ионы калия, а ионы натрия задерживают, поэтому концентрации ионов натрия и калия с разных сторон мембраны различны. Поскольку эти ионы заряжены, разность концентраций приводит к разности электрического потенциала на стенках мембраны.

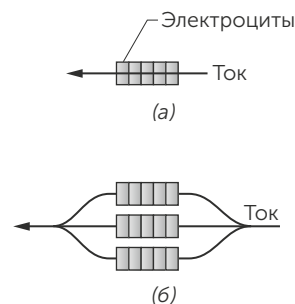


Рис. 5.4 / Задача 5.28. а) Ряд из пяти последовательно соединенных электроцитов. б) Три параллельно соединенных ряда таких клеток.

Когда рыба хочет применить импульсный разряд, она посылает в мембрану нервный импульс, под действием которого проницаемость мембраны меняется и она начинает пропускать ионы натрия. В результате разность потенциалов на поверхностях мембраны мгновенно меняется, и через нее начинают проходить заряженные частицы, то есть возникает электрический ток. И изменение разности потенциалов, и величина тока малы, но у рыбы может быть несколько тысяч электроцитов, соединенных последовательно (рис. 5.4а), поэтому результирующий потенциал и полный ток оказываются большими (если сопротивление клеток не слишком велико).

Полный ток должен выйти из одного конца рыбы (хвоста или головы), пройти через воду (и, возможно, через жертву, например человека), а затем войти в рыбу с другого конца. Однако, если в рыбе есть только один ряд электроцитов, этот большой ток оглушит или убьет саму рыбу. Чтобы такого не случилось, у рыбы имеются сотни рядов этих клеток, соединенных параллельно (рис. 5.4б), так что полный ток распределяется равномерно между этими рядами, поэтому ток, идущий по какому-то одному ряду клеток, не может навредить рыбе.

Электрические рыбы, живущие в соленой воде, отличаются строением от рыб, живущих в пресной воде, поскольку у соленой воды электрическое сопротивление гораздо меньше. Поэтому морским рыбам

требуется гораздо меньше электроцитов в каждом ряду последовательно соединенных клеток для того, чтобы произвести достаточно сильный ток, убивающий или оглушающий добычу.

Так называемые слабоэлектрические рыбы не пытаются послать токовый импульс через окружающую воду. Их электроциты просто создают слабое электрическое поле в воде, которое играет роль зонда: рыбы очень чувствительны к величине этого поля и способны ощутить малейшее его изменение при попадании в него других объектов. Кроме того, они могут определенным образом изменять свое собственное поле, посылая коммуникационные сигналы другим рыбам того же вида.

### 5.29 • КАК ПРЕДМЕТЫ ЗАРЯЖАЮТСЯ ВО ВРЕМЯ ПЫЛЬНОЙ, СНЕЖНОЙ ИЛИ ПЕСЧАНОЙ БУРИ?

Как проволочная изгородь может зарядиться электричеством, если ее обдувает ветер со снегом? Иногда длинная проволочная изгородь заряжается так сильно, что, если к ней притронуться, можно получить сильный удар, а в некоторых случаях она может даже оглушить.

Почему при сильном ветре, который несет с собой пыль и песок, например во время пыльной бури, торнадо или хамсина, некоторые материалы сильно заряжаются? В тех редких случаях, когда человеку удавалось заглянуть внутрь воронки торнадо и не только выжить, но и поделиться впечатлениями, он вспоминал, что все пространство внутри торнадо было залито мерцающим светом и прошито длинными перекрещивающимися разрядами.

Как в этих примерах происходит электризация?

**ОТВЕТ •** Процесс, при котором во время снежной бури электричеством заряжается снег, достаточно сложный, но кое-что мы об этом знаем. Если две нейтральные льдинки с разными температурами столкнутся, то они могут зарядиться, однако знак заряда в разных исследованиях оказывался разным — по-видимому, из-за разных условий столкновения. Если два кончика нейтральной льдинки имеют разные температуры, более теплый конец заряжается положительно, а более холодный — отрицательно. Поэтому если льдинка раскалывается при столкновении на части, два осколка оказываются разноименно заряженными. Таким образом, снег во время снежной бури может быть заряжен и, налетев на изгородь, может зарядить и ее.

Пыль, летящая по воздуху во время урагана, пыльной бури или торнадо, при контакте с землей или другими пылинками обычно заряжается. Контакта двух объектов достаточно, чтобы электроны с одного предмета перешли на другой. Зарядится ли пыль положительно или отрицательно, зависит от природы пылинок и состояния поверхности земли. В некоторых ситуациях пылинки теряют электроны, когда касаются земли и становятся положительно заряженными, в других получают электроны и становятся отрицательно заряженными. А уже в воздухе пылинки могут обмениваться зарядами при столкновениях.

Пыльные бури на Марсе гораздо более свирепы, чем на Земле, поэтому пыльный вихрь там может быть сильнее заряженным, но у заряда, который может нести пыльный вихрь, есть предел. Это легко объяснить: когда заряд увеличивается, увеличивается и электрическое поле на поверхности вихря. В конце концов оно становится таким большим, что поверхность начинает искрить, то есть разряжаться, и электроны начинают утекать с его поверхности. Когда условия, при которых может начаться искрение, уже достигнуты, любой дополнительный заряд, который пыльный вихрь приобретает при движении, уходит с искрой.

Заряд в торнадо образуется не только за счет пыли, которую оно поднимает, но и за счет электрических зарядов сопровождающей торнадо грозы. Поэтому вспышки света, которые очевидцы наблюдали в воронке торнадо, — это, скорее всего, разряды между заряженными сгустками пыли и обломками, которые унес торнадо. Кроме того, часть молний могут быть обычными грозовыми молниями. Старая гипотеза о том, что торнадо возникает, когда между облаками и землей начинает течь более-менее продолжительный ток, позже была опровергнута.

### 5.30 • ВУЛКАНИЧЕСКИЕ МОЛНИИ

При извержениях вулканов, например японского вулкана Сакураяма, наблюдатели замечали вспыхивающие над кратером электрические разряды, которые освещали небо и сопровождались звуками, похожими на гром. Что вызывает такое звуковое и световое шоу?

**ОТВЕТ •** Разряды возникают из-за заряженных частиц, которые уносятся вверх с газом и пеплом, вырывающимися из кратера вулкана. В выбросах могут преобладать положительно заряженные частицы, но попадают и кластеры отрицательно заряженных частиц. Эти

разноименно заряженные области могут разряжаться друг на друга или на землю. При этом ток разряда может так сильно нагреть воздух, что он начинает расширяться быстрее скорости звука, и тогда возникнет ударная волна, которая дойдет до наблюдателя (надо надеяться, находящегося на безопасном расстоянии) в виде громкого хлопка.

Наличие заряженных частиц в выбросах вулкана можно объяснить несколькими эффектами.

1. Если вода попадает на расплавленную лаву, она мгновенно разбивается на капли, над лавой образуется слой пара, и капли воды начинают парить на этом слое, как на воздушной подушке — только на подушке из собственного пара (*эффект Лейденфроста*). Однако через какое-то время каждая большая капля расщепляется на маленькие заряженные капельки, которые уносятся вверх в атмосферу потоком горячего воздуха и водяного пара.
2. Магма становится заряженной, когда она разбивается на части, либо если в нее попадает вода, либо когда ее частицы ударяются о верхний конец жерла вулкана и выбрасываются вверх.
3. Когда заряженные частицы летят вверх и сталкиваются, заряд может передаваться от одной частицы к другой, при этом они могут даже приобрести дополнительный заряд (как это случается при пыльной буре).

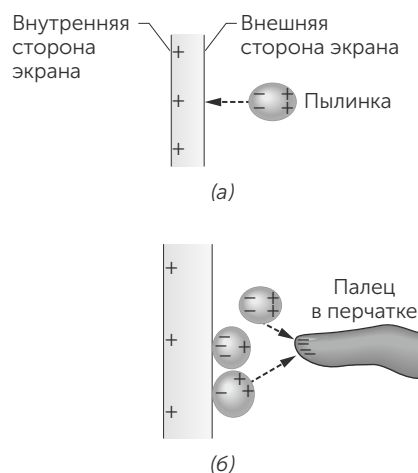
### 5.31 • ЗАРАЖЕНИЕ БАКТЕРИЯМИ ПРИ ХИРУРГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ

Хирургические бригады, стараясь избежать заражения пациентов бактериями, принимают чрезвычайные меры: надевают маски, тщательно моют руки, потом надевают на них перчатки, дезинфицируют при высоких температурах и промывают в спиртовых ваннах инструменты. Но недавно в операционных был обнаружен трудноуловимый источник бактерий, о котором до тех пор не подозревали. Вот пример эндоскопической операции: хирург вводит в пациента оптоволоконный эндоскоп через разрез, горло или кишку, и тот передает картину внутренностей на монитор. Хирург может продвинуть оптоволоконный эндоскоп дальше или использовать хирургические инструменты, закрепленные на нем, например накинуть петлю на полип и удалить его. Одним из достоинств оптоволоконного эндоскопа является то, что главный хирург может координировать действия остальных

членов бригады, показывая им на мониторе, что нужно делать, и вся бригада может следить за ходом операции.

Где-то в этой схеме скрывается источник бактериального заражения. Где именно?

**ОТВЕТ •** Работающий экран электронно-лучевой трубки монитора накапливает электрический заряд и может притягивать к себе частицы из воздуха, например пух, пыль или чешуйки кожи, плавающие в воздухе операционной. Так, если экран заряжен положительно, а частица в воздухе отрицательно заряжена, она притягивается к внешней поверхности экрана. Если же она электрически нейтральна, часть ее электронов может переместиться на ту сторону частицы, которая ближе к экрану, то есть на ней возникнет *индуцированный заряд*: одна ее сторона окажется отрицательно заряженной, а другая положительно (рис. 5.5a). Отрицательная сторона притянется к положительно заряженному экрану, а положительно заряженная сторона будет от экрана отталкиваться. Поскольку отрицательная сторона ближе к экрану, ее притяжение к экрану победит в этом «перетягивании каната».



**Рис. 5.5 / Задача 5.31.** а) Поперечное сечение экрана монитора. Положительно заряженный экран индуцирует заряд на пролетающей рядом нейтральной пылинке. б) Палец в перчатке (изображен не в масштабе) несет на себе индуцированные заряды и может притянуть пылинки из воздуха и с экрана.

Очевидно, многие частицы, собравшиеся на внешней поверхности экрана, несут на себе бактерии, поэтому экран становится зараженным бактериями. Предположим, что пальцы главного хирурга в перчатках приближаются к экрану на расстояние в несколько

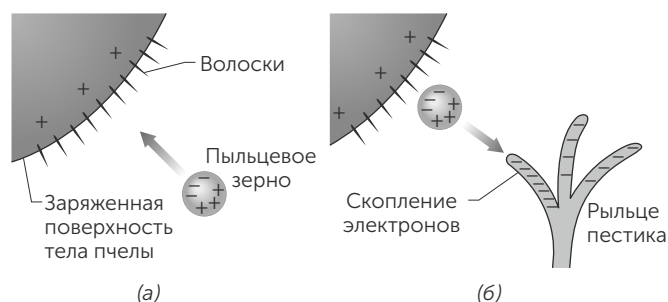
сантиметров, указывая на то место, к которому он хочет привлечь внимание ассистентов. Положительно заряженный экран вытягивает электроны из основания пальцев к подушечкам (рис. 5.5б). Тогда отрицательно заряженные подушечки собирают частицы (из воздуха или с экрана) на кончиках пальцев в перчатках. Когда хирург в следующий раз прикоснется к пациенту в таких перчатках, бактерии могут попасть на пациента или внутрь его тела. Чтобы избежать риска, хирургам не рекомендуется близко подносить руки к мониторам. Впрочем, современные мониторы на жидких кристаллах электризуются очень слабо.

### 5.32 • ПЧЕЛЫ И ОПЫЛЕНИЕ

Пчелы помогают опылять цветы, собирая пыльцу с одного цветка и перенося ее на другой, причем попадание пыльцы на пчелу происходит не случайно. На самом деле крупинки пыльцы прилипают к пчеле на первом цветке и слетают с нее на втором. Что заставляет частички пыльцы перемещаться на пчелу и с пчелы?

**ОТВЕТ** • При вылете из улья пчела может заряжаться трибоэлектрически, а в полете — от имеющихся в воздухе ионов (есть и другие механизмы). Заряд пчелы может оказаться разного знака. Допустим, что он положителен (при отрицательном заряде механизм тот же). Когда пчела пролетает мимо электрически нейтральной тычинки цветка (рис. 5.6а), электрическое поле пчелы наводит в пыльцевых зернах цветка *индуцированный заряд*. Эти зерна электрически нейтральны, но электрическое поле пчелы перераспределяет электрические заряды в них: некоторые электроны собираются в той части зерен, которая ближе к положительно заряженной пчеле. А дальняя сторона зерен оказывается положительно заряженной. Зерна остаются в целом нейтральными, но теперь отрицательный заряд находится на одной их стороне, а положительный заряд — на другой.

Отрицательная сторона пыльцевого зерна тянется к пчеле, а положительная отталкивается от нее. Поскольку отрицательная сторона ближе к пчеле, притяжение побеждает и зерно перелетает через воздушный коридор и прилипает к телу пчелы. Точнее, к покрывающим его волоскам. Если бы оно попало на тело пчелы, то потеряло бы электроны. Тогда на зерне остались бы только положительные заряды и оно слетело бы с положительно заряженной пчелы и не попало бы на следующий цветок.



**Рис. 5.6 / Задача 5.32.** а) Пролетающая над цветком положительно заряженная пчела разделяет заряды в зернах пыльцы. В результате зерна перелетают на пчелу. б) Пыльцевое зерно перелетает с пчелы на рыльце второго цветка в место скопления электронов.

Перенос пыльцы на другой цветок происходит, когда пчела пролетает мимо рыльца пестика этого цветка, электрически замкнутого на землю. Электрическое поле пчелы притягивает электроны рыльца, которые стремятся оказаться как можно ближе к пчеле, поэтому верхняя часть рыльца становится отрицательно заряженной (рис. 5.6б). Пыльцевое зерно все еще испытывает притяжение положительно заряженной пчелы, но заряд на верхней части рыльца больше, поэтому зерно перелетает с пчелы на рыльце, опыляя таким образом второй цветок.

### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

#### 5.33 • ОГНЕННЫЕ МУРАВЬИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Когда огненные муравьи *Solenopsis invicta* Buren из Центральной Америки стали стремительно расселяться на север, в США, их полчища облепляли и выводили из строя электрическое оборудование (например, коробки переключателей для светофоров), установленное под открытым небом на столбах и стенах зданий. Вначале это объясняли тем, что огненных муравьев привлекает либо электрическое поле, либо магнитное, возникающие при прохождении тока по электрическим проводам. Но как же в таком случае муравей чувствует присутствие любого из этих полей?

Однако при более внимательном изучении поведения муравьев исследователи нашли более простое объяснение. Случайно попавший в коробку с электрическими переключателями муравей

может закоротить цепь, прикоснувшись одновременно к двум оголенным проводам или к одному оголенному проводу и заземленному контакту. Этот муравей либо погибает, либо становится очень-очень сердитым (у огненных муравьев вообще скверный характер). Живой или мертвый, огненный муравей выделяет некое химическое вещество, вызывающее беспокойство у его собратьев, — те собираются вокруг него, и их тоже убивает ток. В конце концов образуется так много мертвых муравьев, закорачивающих электрические цепи, что либо срабатывает предохранитель и тогда цепь разрывается, либо оборудование сгорает из-за слишком большого тока.

#### 5.34 • ПЛАСТИКОВАЯ ПИЩЕВАЯ ПЛЕНКА

Почему когда вы оборачиваете пластиковой пищевой пленкой стеклянную или пластмассовую миску и прижимаете ее к ободку посуды, пленка не отлипает? И если даже перевернуть миску вверх дном, содержимое не выльется.

**ОТВЕТ •** Когда вы отматываете пленку с рулона, на поверхности пищевой пленки могут находиться заряженные области, появившиеся на ней в процессе производства. Области с избытком электронов заряжены отрицательно, а области с недостатком электронов — положительно. Участки пленки с противоположными знаками зарядов притягиваются друг к другу, и это одна из причин, по которым пищевая пленка заворачивается сама на себя или же обратно на рулон.

Когда пищевая пленка прижимается к ободку миски, заряд переходит с одной поверхности на другую — этот эффект называется *контактной электризацией*. Например, пищевая пленка может перетянуть на себя часть электронов с края миски, и этот край окажется положительно заряженным. Отрицательно заряженная пленка и положительно заряженный ободок будут притягивать друг друга.

Кроме того, между ободком и пленкой могут возникнуть межмолекулярные силы притяжения, называемые *силами Ван-дер-Ваальса*. Эти силы обязаны своим происхождением электрическому взаимодействию между молекулой на одной поверхности, у которой есть положительный и отрицательный заряды, и ближайшей молекулой на второй поверхности,

у которой смещение зарядов вызвано взаимодействием с первой молекулой. Любая пара разделенных зарядов называется *электрическим диполем*, и диполи на двух поверхностях притягивают друг друга. Это притяжение, хотя и несильное, может удерживать пленку на ободке или вызвать слипание разных участков пленки между собой.

#### 5.35 • МУХА НА ПОТОЛКЕ, ГЕККОН НА СТЕНЕ

Муха может прилипать к гладкой поверхности благодаря маслянистому секрету, приклеивающему ее лапки к потолку. Некоторые насекомые могут удерживаться на гладкой поверхности за счет присасывания. А как же гекконы? У них сухие лапки, и присосаться к стене они не могут. Однако геккон снует вверх-вниз по гладкой стене или запросто бежит по потолку. За счет чего гекконы прилипают к поверхности и так же быстро отлипают (иначе они не смогли бы передвигаться по этой поверхности)?

**ОТВЕТ •** На лапке геккона расположено около полумиллиона тонких выростов — *щетинки*. Каждая щетинка имеет сотни ответвлений с треугольным или листовидным расширением в виде лопаточки на конце. Когда геккон прижимает щетинку к стене, все лопаточки притягиваются к стене силами Ван-дер-Ваальса. Эти силы возникают, когда благодаря взаимодействию электрических зарядов слегка разнесенные положительные и отрицательные заряды на одной поверхности вызывают похожее разделение положительных и отрицательных зарядов на другой поверхности. Разделение зарядов есть не что иное, как образование электрических диполей, а диполи на двух поверхностях притягивают друг друга. Когда геккон прижимает лапку к стене, подобное взаимодействие возникает в миллионе или даже более точек. Хотя в каждой точке сила Ван-дер-Ваальса слаба, сумма всех сил, действующих на лапку геккона, достаточна, чтобы удержать его на стене. Даже если стена имеет микроскопические неровности, каждая щетинка выставляет достаточное количество лопаточек, чтобы геккон удержался на ней.

Каждая лопаточка щетинки прикладывается к стене под углом, и она прилипает к ее поверхности, только если угол достаточно мал. Чтобы побежать по стене, геккон должен освободить лапку, для чего он оттягивает щетинки, увеличивая угол между лопаточками на их концах и стеной; лопаточки одна за другой отрываются и освобождают щетинки.



### 5.36 • ТОРТ С МЕРЕНГАМИ (БЕЗЕ)

Существуют разные рецепты приготовления этого лакомства, но принцип всегда один. Сначала нужно взбить яичные белки, чтобы они слегка загустели. Затем вбить туда немного сахара. После этого смесь нужно выложить на торт и запечь.

Почему даже небольшое количество желтка может испортить меренги? Почему взбивается белок и почему он густеет при взбивании? Почему, если взбивать слишком долго, меренги могут осесть?

**ОТВЕТ •** Яичный белок состоит из протеинов нескольких типов — огромных молекул со сложной трехмерной структурой, свернутых в клубки. Взбивать яичный белок нужно, в частности, для того, чтобы слегка распутать эти молекулы, расцепив внутренние более слабые центры притяжения. Более слабые связи включают ионные связи (когда заряды противоположных знаков притягивают друг друга), вандерваальсовы связи (когда разделенные положительные и отрицательные заряды в одной части молекулы притягивают разделенные положительные и отрицательные заряды, расположенные по соседству) и водородные связи (когда водород действует как посредник, удерживающий два атома вместе). Как только протеины распутаются, они соединятся друг с другом и образуют сетку.

Кроме того, взбивать яичный белок нужно и для того, чтобы в образовавшуюся сетку захватить кислород. А яичный желток испортит безе, поскольку желток слишком тяжелый и вязкий и помешает проникновению достаточного количества кислорода в белки. Хозяйка старается, чтобы перед тем как поставить торт с меренгами в духовку, в меренгах оказалось как можно больше воздушных пузырьков. Тогда при нагревании пузырьки расширятся и десерт будет воздушным. Если белок взбит правильно, пузырьки воздуха удерживаются тонкими пленками воды, заполняющими ячейки белковой сетки. Эти пленки будут растягиваться при расширении воздушных пузырьков, удерживая воздух в меренге. Однако если взбивать белок слишком долго, вода отделится от протеинов и сетка станет слишком жесткой (со слишком сильно связанными ячейками) и не сможет достаточно расшириться в печи при нагревании. Тогда воздушные пузырьки просто лопнут и, к ужасу хозяйки, безе опадет. Опытная хозяйка, чтобы не взбить яичные белки слишком сильно, остановится в тот момент, когда белковая масса начнет терять свой блеск и в ней того и гляди начнут образовываться капельки воды.

Если яичные белки взбивать в медной миске, некоторые атомы меди перейдут в белки и свяжутся с атомами серы. Тогда эти атомы уже не смогут участвовать в образовании протеиновой сетки и она не станет слишком жесткой и поэтому не будет выдавливать воду.

### 5.37 • СОУС БЕАРНЕЗ

Всем известно, что соус беарнез очень трудно приготовить, он может не получиться, даже если хозяйка все сделает правильно. Беарнез — это теплая заправка, состоящая в основном из разбавленного уксуса, вина, яичного желтка и масла, его подают к жареному красному мясу, курице, рыбе и яйцам пашот. В идеале соус должен представлять собой хорошо перемешанную (гомогенную) смесь ингредиентов, но иногда масло может отделиться от остальных ингредиентов и выпасть в осадок в виде некрасивых лужиц. Возникает вопрос: почему масло образует лужицы, если соус не получается? Если все делается правильно, почему масло не выпадает в осадок?

**ОТВЕТ •** Соус может существовать в виде *коллоидной суспензии* — взвеси шариков молочного жира, то есть масла, в жидкости, состоящей в основном из воды и уксусной кислоты (уксуса). И также он может существовать в виде *эмульсии*, то есть представлять собой дисперсную систему двух несмешивающихся жидкостей (в данном случае воды и масла), причем масло образует капельки в воде.

В коллоидной суспензии капельки масла притягиваются друг к другу благодаря слабому вандерваальсовскому взаимодействию, возникающему между электрическими диполями (молекулами с разделенными положительными и отрицательными зарядами). Однако на поверхности капель имеются и отрицательные заряды, поэтому когда капли приближаются друг к другу и возникает опасность их столкновения и слипания, взаимное отталкивание одноименных зарядов мешает этому и удерживает капли на расстоянии. Слипание может возникнуть при нагревании соуса, поскольку тогда капельки приобретают большую энергию и могут столкнуться, несмотря на отталкивание одноименных зарядов. Если это случается и капли начинают связываться друг с другом (говорят, что *выпадают хлопья*), значит, проблема в том, что на поверхности капель находится недостаточный заряд. Чтобы помешать образованию хлопьев, многие шеф-повара рекомендуют энергично вбивать в соус лимонный сок.

Это разбивает хлопья масла, а лимонный сок, по-видимому, увеличивает заряд на поверхности капель и препятствует их слипанию.

В эмульсии капельки масла *стабилизируются* (то есть остаются в виде капель, а не слипаются в хлопья) благодаря молекулам лецитина, содержащимся в яичном желтке и находящимся на поверхности капель. У каждой молекулы лецитина есть связывающийся с водой (гидрофильный) конец (его еще называют *полярным концом*), который повернут от поверхности капли в сторону воды. К этому концу присоединяются молекулы воды, так что каждая капля масла окружена слоем молекул воды, связанных с полярными концами молекул лецитина. Эта связанная вода мешает образованию хлопьев, а если хлопья все-таки выпадают, это значит, что в соусе может быть недостаточно лецитина. Чтобы остановить процесс образования хлопьев, нужно добавить лецитина, и многие шеф-повара рекомендуют в этом случае энергично вбить в соус еще немного желтков.

На практике энергичное вбивание и лимонного сока, и яичного желтка помогает получить однородный соус (поэтому не очень понятно, какой именно вариант соуса следует выбирать). Опытные кулинары знают, что нельзя добавлять и того и другого слишком много, иначе вкус соуса будет испорчен, хотя хлопьев может и не быть. Они также знают, что, если соус перегреть, он испортится, поскольку при повышенных температурах тепловое движение капель становится интенсивнее (больше вероятность их столкновения друг с другом) и желток начинает сворачиваться (становится неоднородным и неспособным стабилизировать структуру соуса).

### 5.38 • МАГНЕТИТ

Намагниченные в естественных условиях минералы, называемые магнетитами, были обнаружены в Древнем Китае, где сначала их использовали как сувениры, а потом стали применять в качестве компасов. Как минералы намагничиваются и почему не все минералы обладают магнитными свойствами?

**ОТВЕТ •** Магнетит — кусок железной руды, который может сохранять свои магнитные свойства после намагничивания, поэтому про него говорят, что он способен стать *постоянным магнитом*. Способность сохранять намагниченность объясняется коллективными квантовыми эффектами во взаимодействии электронов в атомах железа. В естественных условиях

железная руда могла намагнититься за счет какого-нибудь одного из двух процессов: либо она была нагрета, а потом охладилась в магнитном поле Земли, либо рядом с ней ударила молния, несущая очень большой ток и создающая магнитное поле.

В первом из этих процессов железная руда сначала нагревается в потоке лавы, а затем остывает. Когда она нагревается до высоких температур, то теряет магнитные свойства (соответствующая температура называется точкой Кюри), поскольку тепловая энергия атомов полностью разрушает коллективное взаимодействие электронов, а когда охлаждается и это коллективное взаимодействие восстанавливается, магнитные моменты электронов стремятся выстроиться вдоль силовых линий магнитного поля Земли в том месте, где находится железная руда. Чем точнее выставится параллельность этих моментов в железной руде, тем больший магнитный момент будет у магнетита.

Во втором случае магнетит формируется, если в скалу или поблизости от нее ударит молния. Магнитное поле возникает при движении электронов, образующих ток молнии, и выстраивает магнитные моменты некоторых соединений железа, содержащихся в скальных породах, в одном направлении. Моменты сохраняют эту направленность и после того, как молния исчезнет. Магнетиты этого типа находят вблизи поверхности земли (поскольку молния не пробивает землю больше чем на несколько метров), и они располагаются в виде небольших пятен.

### 5.39 • МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ И АРХЕОЛОГИЯ

Поскольку магнитное поле Земли со временем постепенно меняется, направление стрелки компаса на север тоже меняется. Исследователи хотели бы узнать, куда стрелка компаса показывала в определенные моменты в прошлом, но, увы, записи показаний компаса находят редко. Однако исследователям помогают в этом древние печи с глиняными стенками для обжига глиняной посуды и старинная стенная роспись, например фрески, украшающие знаменитую галерею Ватиканской апостольской библиотеки. Как печи для обжига и фрески могут поведать о направлении на Северный магнитный полюс?

**ОТВЕТ •** Глина, из которой были сделаны стенки и дно древней печи для обжига посуды, содержит оксиды железа — магнетит и гематит. В этих материалах имеются отдельные зерна, состоящие из *доменов* — областей,

в которых магнитный момент постоянный. Зерно магнетита состоит из множества микроскопических доменов, а зерно гематита — из одного домена шириной до миллиметра.

Когда глина нагревалась до нескольких сотен градусов Цельсия (в процессе обжига в печи), домены обоих типов приходили в движение. В магнетите границы доменов, так называемые доменные стенки, сдвигались: домены, у которых направление магнитных моментов было ближе к направлению магнитного поля Земли, росли, а остальные сжимались. А в гематите домены поворачивались таким образом, чтобы направление их магнитных моментов приблизилось к направлению магнитного поля Земли. В результате обоих процессов глина приобретала магнитный момент, направленный вдоль направления магнитного поля Земли. Когда после окончания обжига печь остывала, ориентация доменов и, соответственно, магнитный момент глины сохранялись. Этот эффект называется *термоостаточным магнетизмом*.

Чтобы определить ориентацию поля Земли в момент, когда печь использовалась, то есть нагревалась и охлаждалась, в последний раз, археолог очерчивает небольшой участок дна печи, тщательно измеряет его ориентацию относительно горизонтальной плоскости и географического севера (направления на Северный полюс), а затем вырезает этот кусок. Затем он определяет направление магнитного поля в этом фрагменте относительно его граней, а следовательно, относительно его положения в печи. Таким образом, археолог получает направление магнитного поля Земли на момент последнего использования печи. Определив возраст печи с помощью любого известного метода, археолог узнает, в какой момент поле Земли имело такую ориентацию.

Во многих красках, с помощью которых создавались древние фрески, содержался гематит. Краски представляли собой суспензии различных твердых ингредиентов в жидких растворителях. Когда краска наносилась на стену, каждое зерно гематита поворачивалось в жидкости до тех пор, пока его магнитный момент не становился параллельным магнитному полю Земли. Когда краска высыхала, зерна оставались в этом же положении и таким образом фиксировали направление магнитного поля Земли в момент создания фрески.

Исследователь может определить направление магнитного поля Земли в момент написания фрески, определив ориентацию зерен гематита в ней. Для этого

короткий отрезок липкой ленты прикладывается к поверхности фрески, после чего тщательно измеряется ориентация ленты относительно горизонта и теперешнего направления магнитного поля Земли. Когда ленту отрывают от фрески, на ней остается тонкий слой краски. В лаборатории этот кусочек ленты помещают в прибор, позволяющий определить ориентацию зерен гематита в снятом слое фрески.

#### 5.40 • МРТ

МРТ (*магнитно-резонансная томография*) — это исследование, позволяющее получить изображение внутренних органов человека, животных, ископаемых остатков и многих других объектов. Сначала оно называлось ЯМР (*ядерный магнитный резонанс*), но когда Кливлендская клиника объявила, что планирует построить ядерный объект, под давлением общественности название пришлось поменять на МРТ. Общественность просто не поняла, что термин «ядерный» в данном случае не имеет отношения ни к бомбе, ни даже к энергии. Он происходит от слова «ядро», обозначающее центральную часть всех атомов, но в данном случае — тех, из которых состоит человеческое тело.

В МРТ используются электромагнитные волны с частотами порядка десятков МГц, которые могут проникать внутрь тела и переворачивать магнитные моменты (спины) протонов в ядрах некоторых элементов, имеющих во внутренних тканях. Вначале спины этих протонов в сильном магнитном поле выстраиваются параллельно, но после того как их переворачивают электромагнитные волны, довольно быстро восстанавливают прежнюю направленность. Сложнейшее оборудование отслеживает и регистрирует процесс восстановления первоначальной ориентации спинов протонов и с помощью компьютерных программ преобразует полученные данные в изображения тканей, содержащих эти протоны. Процедура совершенно безопасная, поскольку магнитное поле и радиоволны не причиняют вреда организму. На самом деле, в обычной жизни вы постоянно подвергаетесь облучению радиоволнами от расположенных поблизости станций, телекоммуникационных антенн и даже телекоммуникационных спутников.

Если процедура такая безопасная, почему же иногда (правда, *очень редко*) пациенты получают ожоги? Почему пациенты с татуировкой чувствуют «покалывание» и «подергивание» рядом с татуировкой и почему некоторые из них получают серьезные ожоги? Почему

эта процедура либо запрещена, либо не рекомендована пациентам с металлическими имплантами? Почему процедура часто не рекомендуется людям, имеющим дело со сваркой или шлифовкой металла?

**ОТВЕТ** • Такие случаи иногда происходили, пока врачи не поняли, что, если во время процедуры МРТ электрические провода, с помощью которых снимаются данные, касаются тела пациента в нескольких местах, пациент может получить ожоги. В одном случае пациенту, введенному в состояние искусственного сна, надели на палец датчик импульсного оксиметра\*. Этот единственный контакт тела пациента с электрическим прибором, находящимся вне аппарата МРТ, не представлял опасности. Однако протянутый от пальца провод коснулся руки пациента, и отрезок провода от пальца к руке и часть самой руки образовали замкнутую электрическую цепь (контур) между этими двумя точками. Когда включили источник радиоволн, создаваемое ими высокочастотное магнитное поле навело в этой цепи ток. Большое сопротивление току в точке контакта провода с кожей привело к сильному нагреву кожи и, соответственно, ожогу в этой точке. Однако поскольку пациента усыпили с помощью транквилизаторов, этот ожог обнаружили только после окончания исследования.

Другая возможность получить ожог связана с тем, что длинный отрезок провода, тянущийся к пациенту, может стать приемной антенной для электромагнитных волн, используемых в методе МРТ. Вокруг провода устанавливается довольно сильное электрическое поле, так что его большая напряженность на конце провода может вызвать появление искры, способной обжечь пациента.

Некоторые черные или сине-черные краски, используемые для нанесения татуировки или теней на веки, содержат включения ферромагнетика (оксида железа — магнетита). Допустим, подвижный стол с пациентом, на теле которого что-то нарисовано такой краской, въезжает в аппарат МРТ или выезжает из него при включенном магнитном поле, или же величина этого поля в процессе снятия данных меняется. Тогда домены в ферромагнитных материалах стремятся переориентироваться (подобно тому, как магнитная стрелка компаса меняет ориентацию при внесении

\* Оксиметр — фотоэлектрический прибор, используемый для измерения насыщенности гемоглобина кислородом. *Прим. пер.*

в магнитное поле). Некоторые пациенты ощущают при этом покалывание или подергивание кожи в местах, где есть татуировка. В редких случаях ожоги на коже появлялись, когда на рисунке татуировки имелась замкнутая петля, нанесенная ферромагнитной краской. Можно предположить, что радиоволны в этой петле могли возбудить достаточно большой ток, который нагревал и обжигал кожу.

Металлические импланты затрудняют проведение МРТ, поскольку способны исказить изображение. Если они сделаны из ферромагнитного материала, то могут слегка повернуться относительно первоначального положения, когда пациент на подвижном столе въезжает или выезжает в магнитное поле, подобно тому, как поворачивается магнитная стрелка. Часто это движение совсем незаметное, но даже малый поворот металлической части сердечного клапана может оказаться опасным. Могут возникнуть проблемы и если у пациента имеются металлические части в глазных имплантах или же металлические опилки, попавшие в глаз при сварке или шлифовке металла. Сегодня техника безопасности при проведении МРТ учитывает все эти случаи.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 5.41 • ПОИСК ПУЛИ В ТЕЛЕ ПРЕЗИДЕНТА ГАРФИЛДА С ПОМОЩЬЮ МАГНИТА

В 1881 году на одной из железнодорожных станций города Вашингтона двумя выстрелами был ранен действующий президент США Джеймс Гарфилд. Одна пуля всего лишь задела руку, но вторая застряла где-то в области поджелудочной железы. Врачи не могли определить местоположение второй пули, тогда у них еще не было возможности заглянуть внутрь пациента, не разрезая его. Положение входного отверстия также не давало ответа: на пути пули оказалось ребро, изменившее ее траекторию.

Помочь взялся Александр Грейам Белл, чье имя для нас связано главным образом с изобретением телефона. Он предложил использовать метод, который он назвал *индукционным балансом*. Собранный им прибор состоял из электромагнита, питающегося от аккумулятора, и небольшой катушки, связанной с телефонным приемным устройством, которое использовалось в телефонном аппарате

того времени. В электромагнит от аккумулятора поступал постоянный ток, создавая в нем постоянное магнитное поле. Маленькую катушку Белл держал таким образом, чтобы плоскость ее поперечного сечения была перпендикулярна полю. Если поле через катушку менялось, в ней возникал ток, а в приемном устройстве телефона раздавался щелчок.

План Белла состоял в том, чтобы водить электромагнитом с катушкой над телом Гарфилда. По его расчетам, пуля, над которой должен был рано или поздно оказаться прибор, изменила бы и направление, и величину магнитного поля, пронизывающего катушку. И тогда в катушке раздался бы щелчок.

К несчастью, пуля была сделана из свинца, и потому поле менялось настолько незначительно, что это изменение не удалось зарегистрировать (сталь бы изменила его намного сильнее). К тому же пуля застряла глубоко внутри тела Гарфилда и не могла серьезно изменить поле. После многочисленных попыток Белл сдался.

#### 5.42 • МАГНИТЫ, ТАТУИРОВКИ И ЮВЕЛИРНЫЕ УКРАШЕНИЯ ДЛЯ ТЕЛА

Почему сильный магнит притягивает фрагменты кожи, на которые нанесена татуировка черной или сине-черной краской? В течение долгого времени модными были ювелирные украшения для тела, и некоторые люди предпочитали закреплять их с помощью магнитов, вместо того чтобы делать пирсинг. Почему опасно вставлять в нос кольца на магнитах?

**ОТВЕТ •** Черные и сине-черные линии в татуировке обычно наносятся с помощью красок на основе оксида железа (магнетита), который является ферромагнетиком и притягивается магнитом. Поэтому сильный магнит может притянуться к участку тела с татуировкой. Удивительнее то, что сильный магнит может вытянуть некоторое количество магнетита из внутренних слоев кожи и заставить его собраться под магнитом между внешним слоем кожи (эпидермисом) и внутренним (дермой).

Это можно использовать для удаления татуировки. Сначала на нее светят лазером с длиной волны из ближней инфракрасной области (непосредственно

прилегающей к границе видимого диапазона), чтобы разорвать и распылить краску в дерме, а также раскрыть эпидермис. Потом на татуировку прикрепляется маленький, но очень сильный магнит, чтобы вытянуть некоторое количество ферромагнитной краски через эпидермис на магнит, откуда ее можно удалить. Таким образом, татуировка становится бледнее.

Опасность магнитных украшений для тела продемонстрировала одна девушка, которая решила использовать магнитные серьги в качестве колец для носа. Каждое кольцо нужно было прикрепить на магнит, прижатый изнутри к стенке ноздри на уровне внешнего конца кольца. Когда она попыталась закрепить второе кольцо, два магнита с силой притянулись друг к другу и запрыгнули довольно глубоко в нос. Там они намертво прилипли друг к другу, зажав тонкую носовую перегородку, так что девушке пришлось отправиться в травматологический пункт, чтобы их вытащить.

#### 5.43 • СУХИЕ ЗАВТРАКИ И КОРОВЬИ МАГНИТЫ

Почему, если провести сильным магнитом над некоторыми молочными смесями или сухими завтраками, твердые крупинки смеси соберутся на магните? Почему коров заставляют заглатывать маленькие магниты?

**ОТВЕТ •** Реклама таких завтраков обычно заманивает покупателя тем, что они «восполняют дефицит железа в вашем организме», то есть содержат крупинцы соединений железа. Аналогично для печати рисунка на некоторых банкнотах используются чернила, которые содержат соединения железа, поэтому они притягиваются к сильным магнитам и могут использоваться для проверки банкноты.

Магниты для коров предназначены для того, чтобы собирать всякий металлический мусор, который корова по неосторожности проглатывает вместе с травой и сеном и который может причинить вред ее пищеварительной системе. Эти магниты недороги, и их можно найти и купить в любом магазине, торгующем товарами для фермеров.

#### 5.44 • ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГИТАРЫ

Вскоре после того, как в середине 1950-х годов наступила эпоха рока, гитаристы сменили акустические гитары на электрические. Но первым гитаристом, понявшим, что электрическая гитара — электронный инструмент, стал Джими Хендрикс. Он был признан одним из наиболее смелых и изобретательных виртуозов



в истории рок-музыки. Его еще при жизни называли гением, который открыл в электрогитаре бесконечный источник возможностей нового звучания. Говоря о нововведениях Хендрикса, критики подчеркивают, что он расширил диапазон и словарь электрической гитары и изменил лицо рок-музыки. Отчасти под его влиянием рок проделал путь от мелодий Бадди Холли, психоделики поздних 1960-х, раннего тяжелого рока Led Zepplin до грубой энергетики Joy Division. Его идеи продолжают влиять и на сегодняшний рок. Что же такое есть в электрогитаре, что отличает ее от акустической гитары и что позволило Хендриксу так расширить возможности электроинструмента?

**ОТВЕТ** • Звук в акустической гитаре зависит от акустического резонанса, возникающего при колебаниях струн в полости инструмента. Корпус электрогитары сплошной, там нет полости, так что в ней не может возникнуть резонанс. Вместо этого колебания металлических струн передаются электрическому *звукоснимателю*, который посылает сигналы в усилитель и далее — в несколько динамиков.

Провод, соединяющий звукосниматель с усилителем, наматывается на маленький магнит, расположенный прямо под струной. Магнитное поле магнита намагничивает струну, и когда она колеблется, ее движение изменяет магнитное поле внутри катушки и, следовательно, наводит в ней ток. Струна колеблется по направлению к катушке и от нее, а ток меняет направление с той же частотой, с которой колеблется струна, передавая этот сигнал усилителю и динамику.

Существуют разные варианты конструкции, например на электрогитаре марки Stratocaster имеется три группы звукоснимателей, размещенных ближе к концам струн, закрепленным на широкой части гитары. Группа, расположенная ближе всего к этим концам, чувствительнее к высокочастотным колебаниям, а самая дальняя от них группа лучше воспринимает низкочастотные колебания. Переключаясь с одного звукоснимателя на другой, музыкант может выбрать группу или пару групп, подающих сигналы на усилитель и динамик.

Чтобы менять звучание своей электрогитары, Хендрикс иногда перематывал провода на катушках звукоснимателей, меняя количество витков провода на них. Таким образом он менял ток, создаваемый в катушках звукоснимателей, и, следовательно, их чувствительность к колебаниям струн.

#### 5.45 • УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРОГИТАРЫ

Физика твердого тела и переход на транзисторы и интегральные схемы радикально изменили современную жизнь. Например, в первых компьютерах использовались электронные лампы, и компьютеры занимали огромные помещения. В настоящее время в гораздо более мощных компьютерах используются интегральные схемы на транзисторах, и компьютеры помещаются на столе или в кармане. Вакуумные радиолампы используются сейчас только в мощных и высокочастотных схемах (ускорители элементарных частиц, токамак, радиолокация, космическая связь, высокочастотный нагрев). Однако в настоящее время многие гитаристы, исполняющие тяжелый рок, настаивают на том, чтобы в усилителях использовались вакуумные радиолампы, и отказываются от транзисторных усилителей. Почему гитарные рок-музыканты выбирают усилители на вакуумных лампах вместо транзисторных?

**ОТВЕТ** • Механические колебания струны электрогитары возбуждают электрические колебания в катушке звукоснимателя, помещенной прямо под струнами. Чтобы в системе динамиков мог возникнуть достаточно мощный звук — такой, чтобы аудитория его услышала, — эти электрические колебания должны быть усилены. Когда в начале 1960-х в среде любителей рока электрогитара стала популярной, в усилителях использовались вакуумные радиолампы, поскольку усилители на транзисторах хотя и существовали, но были еще ненадежными. Когда позже рок стал сначала психоделическим, а затем тяжелым, гитаристы начали выжимать из усилителей все возможное, чтобы приводить в экстаз своих слушателей. Такое мощное усиление в установках на вакуумных лампах приводило к сильным искажениям звука на выходе, и эти искажения быстро стали ассоциироваться с рок-музыкой.

На смену ламповым усилителям пришли транзисторные. Но если гитарист хочет извлечь из гитары звуки максимальной громкости, в транзисторных усилителях появляется другой тип искажений, они создают гармоники с другим спектром. Поэтому рок-гитаристы стараются не пользоваться транзисторными усилителями из-за того, что те не дают «правильного» рок-звука. Джими Хендрикс, первым осознавший, что электрогитара и ее усилители составляют единый музыкальный инструмент, сказал однажды: «Мне

действительно нравятся мои старые маршалловские\* усилители на лампах, потому что... когда на нихставишь максимальную громкость, ничто не может с ними сравниться...»

#### 5.46 • СЕВЕРНОЕ СИЯНИЕ (АВРОРА)

Если вы окажетесь темной ночью под открытым небом где-то в северных широтах, то сможете наблюдать северное (полярное) сияние — призрачный занавес из света, опускающийся с небес. Этот занавес может растянуться на несколько сот километров в высоту и несколько тысяч километров в длину, образуя дугу вокруг Земли. А толщина этого занавеса — всего 100 м. Как образуется такое захватывающее зрелище и почему занавес такой тонкий?

**ОТВЕТ •** Иногда северное сияние можно связать со вспышками на Солнце, если частицы, выброшенные при вспышках (солнечный ветер), влияют на электрические и магнитные поля в атмосфере Земли.

Северное сияние возникает, когда электроны ускоряются на высотах от 3000 до 12 000 км, а потом дрейфуют вдоль силовых линий магнитного поля Земли в сторону высоких широт — по направлению к северному и южному магнитным полюсам. Поскольку при приближении к полюсам магнитные силовые линии сгущаются и опускаются, электроны там движутся на меньшей высоте, где концентрация газа выше, и сталкиваются с атомами и молекулами, возбуждая их. Позже атомы и молекулы возвращаются в основное состояние, испуская свет. Северное сияние — как раз и есть этот свет, например кислород испускает свет в зеленой части спектра, азот — в красной. Однако свечение может быть таким слабым, что воспринимается только как белое. Иногда может казаться, что свечение движется по небу, как будто его сдувает ветер, но это движение — иллюзия.

Поскольку электроны движутся вдоль сходящихся в одну точку силовых линий поля, поблизости от полюса они оказываются зажатыми в очень узком пространстве. И только атомы и молекулы, находящиеся в этом пространстве, вносят вклад в создание северного сияния. К сожалению, из этого простого объяснения следует, что толщина занавеса северного сияния должна быть гораздо больше, чем есть на самом деле.

\*Усилители фирмы Marshall — культовые ламповые гитарные усилители. *Прим. пер.*

В настоящее время ученые работают над более сложным объяснением этого явления.

#### 5.47 • ПЕРЕБОИ С ЭЛЕКТРИЧЕСТВОМ И ВСПЫШКИ НА СОЛНЦЕ

Ночью 13 марта 1989 года в 2:45 обрушилась вся энергосистема канадской провинции Квебек, оставив миллионы жителей без электричества на всю холодную ночь (как говорят, произошел блэкаут). На самом деле в эту ночь давали сбои все энергосистемы Северного полушария, это был ночной кошмар для обслуживающих эти системы инженеров. Причиной сбоя был не выросший вдруг спрос на электроэнергию и не изношенность оборудования. Причиной стала *вспышка на Солнце (солнечный протуберанец)*, случившаяся за три дня до этого. Как мог взрыв на Солнце привести к отказу энергосистемы?

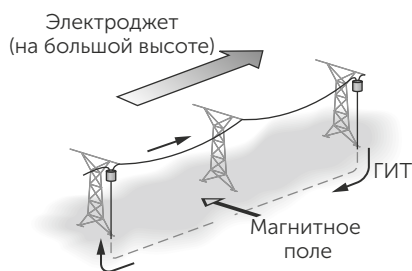
**ОТВЕТ •** При солнечной вспышке с поверхности Солнца в космическое пространство выбрасывается огромное количество заряженных частиц — электронов и протонов. 10 марта 1989 года в сторону Земли был выброшен гигантский солнечный протуберанец. Когда спустя три дня частицы долетели до Земли, они передали свою энергию земной *магнитосфере* — расположенной на большой высоте области вокруг Земли, где поведение частиц управляется электрическими и магнитными полями Земли. В частности, эта энергия пошла на образование *электроджетов* — потоков электронов.

Поскольку потоки электронов — это токи, вокруг электроджетов возникают магнитные поля, распространяющиеся далеко за пределы магнитосферы и захватывающие поверхность Земли и линии электропередачи объединенных энергосистем. Проблемы с энергосистемой в Квебеке вызвали как раз эти поля, точнее, их изменение.

На одном конце высоковольтной линии располагается *повышающий трансформатор*, поднимающий электрический потенциал для таких значений, чтобы электроэнергия передавалась по проводам под очень высоким напряжением. На другом конце находится *понижающий трансформатор*, уменьшающий потенциал до низкого значения, используемого в доме. Любой трансформатор состоит из двух обмоток (*первичной и вторичной*) с разным количеством витков проволоки, намотанной на железный сердечник. Обычный переменный ток, пропущенный через первичную обмотку, создает переменный ток во вторичной обмотке

и разность потенциалов либо большую, либо меньшую — в зависимости от того, имеет ли вторичная обмотка больше или меньше витков, чем первичная.

Оба трансформатора, установленные на линии, заземлены, то есть соединены проводами с землей. Когда образуется электроджет, вокруг него возникает магнитное поле, которое может охватить протяженный контур, образованный проводами линии электропередачи (верхняя часть контура), проводами, соединяющими оба трансформатора на концах линии с землей (две боковые части контура), и землей (нижняя часть контура) (рис. 5.7). Постоянное магнитное поле, охватывающее этот контур, не создает проблем. Проблемы возникают, когда поле меняется.



**Рис. 5.7 / Задача 5.47.** Электроджет (ток) создает магнитное поле в вертикальном контуре, образованном линией электропередачи, землей и проводами, заземляющими трансформаторы (помещенные в цилиндры на концах линии передачи). Изменения поля приводят к появлению тока (ГИТ) в замкнутом контуре.

В ночь аварии (блэкаута) поле изменилось неожиданно и резко, поскольку энергия, принесенная солнечным протуберанцем, неожиданно и резко изменила величину электроджета. Когда в контуре меняется поток магнитного поля, в нем возникает ток. Если этот ток возник из-за электроджета, его называют *геомагнитно-индуцированным током* (ГИТ). Таким образом, в ночь блэкаута в линии электропередачи, кроме обычного тока, возник большой и быстро изменяющийся ГИТ.

Передача энергии в единой энергетической системе возможна лишь в том случае, если изменения токов и напряжений в системе не выходят за определенные пределы. Прошедший через трансформаторы дополнительный ГИТ в Квебеке вышел за допустимые пределы, и трансформаторы перестали правильно преобразовывать переменный ток первичной обмотки в ток вторичной обмотки. В результате и ток, и напряжение

на вторичной обмотке оказались сильно искаженными и менялись не так, как нужно. Это искажение прервало передачу энергии, многие трансформаторы сгорели, и система обрушилась. В настоящее время, если солнечный протуберанец устремляется в сторону Земли, инженеров, обслуживающих электросеть, немедленно предупреждают о возможности возникновения проблем.

ГИТ может возникнуть в любом длинном проводнике, например в телекоммуникационных кабелях или в Трансальском нефтепроводе. На самом деле этот факт был замечен, но не понят, уже 150 лет назад, когда для передачи телеграфных сообщений использовались длинные проводные линии. Иногда в проводах, не подключенных к своим источникам питания (находящихся в нерабочем режиме), шел ток. ГИТ может пойти и по самой земле, вызвав коррозию в длинных трубопроводах, электрически связанных с землей.

На самом деле существуют явления, сходные с теми, что вызывают появление ГИТ. Например, в подводных кабелях при движении воды во время прилива тоже могут возникать токи. Поскольку вода проводит ток и движется в магнитном поле Земли, через воду (и через кабель в воде) начинает идти ток. Цепь замыкается, когда в обратном направлении ток течет по морскому дну.

#### 5.48 • ЛЕВИТИРУЮЩИЕ ЛЯГУШКИ

Лягушка (или любое другое маленькое животное) может парить в магнитном поле, создаваемом соленоидом — катушкой с обмоткой, через которую идет ток. Понятно, что лягушка — не магнит, иначе всякий раз, когда она запрыгивала бы в кухню и оказывалась рядом с холодильником, то примагничивалась бы к его металлической двери. Да и мы определенно не примагничиваемся к двери холодильника. Как могут биологические объекты левитировать?

**ОТВЕТ •** Несколько лягушек прославились тем, что парили в магнитном поле соленоида. Ни одна лягушка при этом не пострадала, они даже не испытывали дискомфорта — у них возникало ощущение, что они плавают в воде, а это лягушки очень любят. Соленоид располагался вертикально, лягушка помещалась вблизи верхнего конца, где магнитное поле выходит из соленоида наружу. Хотя в обычном состоянии лягушка не намагничена, она приобретает магнитные свойства, попадая в магнитное поле. Говорят, что лягушки

(как и люди, и другие биологические объекты) являются *диамагнетиками*. В диамагнитных материалах внешнее магнитное поле меняет состояние электронов в атомах, материал становится намагниченным, причем его собственное магнитное поле направлено в противоположную сторону относительно внешнего поля. Так что когда лягушка попадает в расходящееся магнитное поле у верхней части соленоида, ее выталкивает полем вверх и поднимает на ту высоту, где сила, выталкивающая ее вверх, уравновешивается силой земного притяжения, направленной вниз. В этой точке она останавливается и парит.

Если лягушку заменить маленьким магнитом, он будет вести себя нестабильно, парить не будет и упадет. Лягушка отличается от маленького магнита тем, что ее магнитные свойства зависят от магнитного поля соленоида. Так, если лягушка направится прочь от соленоида, туда, где магнитное поле слабее, ее магнитные свойства тоже будут ослабевать, а вот магнитные свойства маленького магнита в подобной ситуации не изменятся.

Маленький магнит *может* парить, если его *заставить* крутиться и прецессировать наподобие волчка. Необычная игрушка левитрон основывается на этом принципе: быстро вращающийся магнитный волчок парит на высоте нескольких сантиметров от намагниченной подставки. Но когда поток воздуха со временем замедлит вращение волчка, скорость вращения волчка станет слишком низкой и он упадет.

#### 5.49 • ШИПЕНИЕ МАГНИТА

Нажмите на кассетном аудиоплеере (музыку раньше записывали на магнитные ленты) кнопку Play, но кассету в плеер не ставьте (или поставьте пустую кассету). Выберите максимальный уровень громкости и поднесите сильный магнит к звукопринимающей головке. Почему при этом в плеере возникает шипящий звук?

**ОТВЕТ •** Звукопринимающая головка в плеере сделана из ферромагнитного материала, который состоит из множества магнитных доменов, то есть областей с однородными магнитными свойствами и магнитным полем, ориентированным в определенном направлении. При этом от домена к домену направление магнитного поля меняется. Когда вы подносите магнит к головке, домены резко поворачиваются, стараясь

выстроиться так, чтобы их магнитные поля были параллельны полю магнита. Когда направление магнитного поля домена меняется, в катушке, намотанной вокруг головки, возникает меняющийся ток. Эти изменения тока усиливаются и поступают в динамик, из которого и слышится шипящий звук — это звучит меняющийся при поворотах магнитного поля доменов ток.

Впрочем, если вы предполагаете пользоваться плеером, не проводите этот эксперимент. Вы намагнитите материал головки, и после этого она может испортить ваши записи. Головку можно, конечно, размагнитить, но это требует специальной процедуры. Кстати, вы можете услышать шипение и без магнита: в любой схеме есть так называемые тепловые шумы — хаотические изменения напряжения.

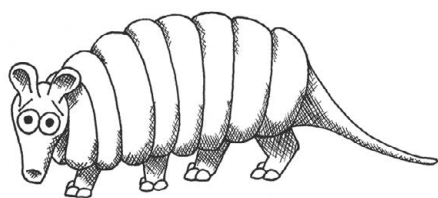
#### 5.50 • ТОКИ, ПРОХОДЯЩИЕ ЧЕРЕЗ ВАС НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ

Все мы живем, погруженные в электрическое поле Земли, и, следовательно, потенциал на уровне нашего носа отличается от потенциала на уровне наших ног. Почему же мы не чувствуем электрического тока, протекающего через наше тело?

Люди, ждущие электропоезда вблизи железнодорожных путей, когда притрагиваются к проводящим предметам, например к соединенным с землей столбам, иногда ощущают покалывание. Что вызывает это покалывание?

**ОТВЕТ •** Через нас не идет ток, вызванный электрическим полем Земли, поскольку току надо как-то замыкаться, а плотность заряженных частиц в окружающем воздухе слишком мала (то есть сопротивление воздуха велико), чтобы через нас пошел ощутимый ток.

Если электропоезд запитывается от провода, протянутого сверху, то по нему, возможно, идет переменный ток. Поскольку он все время меняется по величине и направлению, магнитное поле, которое он создает, тоже меняется по направлению и величине. В проводниках эти изменения магнитного поля приводят к появлению токов, но они слишком малы, чтобы человек их заметил. Однако если человек коснется большого проводящего объекта, например металлического ограждения, токи могут оказаться большими и человек их почувствует.





## Глава 6

# Оптика

## Все кругом, как радуга, цветное

### 6.1 • РАДУГИ

Почему радуга появляется не при каждом дожде? Почему радуга всегда имеет форму дуги? Бывает ли радуга в форме окружности? Как далеко от нас радуга? Можно ли дойти до одного из ее концов? Почему обычно радуга видна только ранним утром или под вечер?

Чаще всего мы видим только одну радугу, но иногда можно увидеть две радуги — две разноцветные дуги с общим центром. В чем тут дело? Почему во второй радуге последовательность цветов меняется на обратную? Почему небо между двумя радугами заметно темнее? Почему верхняя радуга шире нижней и не такая яркая?

Почему у основания радуга обычно ярче и краснее, чем сверху? Из-за чего под нижней радугой иногда видны тонкие бледные полосы?

Почему во время дождя не все небо, а только две дуги раскрашены в цвета радуги? Если возможна и третья радуга, будет ли она располагаться вблизи первых двух? Может ли гром изменить радугу?

**ОТВЕТ •** Радуга появляется из-за того, что в воздухе капельки воды разлагают белый солнечный свет на составляющие его цвета и собирают лучи каждого цвета в отдельную полосу — полосу радуги. Поскольку капли должны освещать яркий солнечный свет, при большой облачности радуга не видна. Свет, падая в каплю и выходя из нее, преломляется и отражается: луч света меняет направление на границе раздела двух сред. Угол преломления зависит от цвета луча. Например, луч голубого цвета отклоняется сильнее луча красного цвета, и, следовательно, голубой и красный лучи выходят из капли под разными углами.

Чаще всего мы видим радугу, образованную лучами, которые, попав в каплю, преломляются на входе в каплю, один раз отражаются от ее внутренней поверхности, а затем выходят из нее в направлении наблюдателя, преломившись еще раз на выходе. Это так называемая

первичная радуга, или радуга первого порядка (имеет место только одно внутреннее отражение). В такой радуге красный цвет выше фиолетового. Радуга второго порядка образуется в результате таких же двух преломлений, но двух внутренних отражений. Цвета в ней располагаются в противоположном порядке. Дополнительное отражение внутри капли приводит к дальнейшему разделению цветов, поэтому радуга второго порядка шире и не такая яркая. Кроме того, каждое отражение сопровождается потерями (уменьшением интенсивности света), поэтому на образование радуги второго порядка света «остается» меньше.

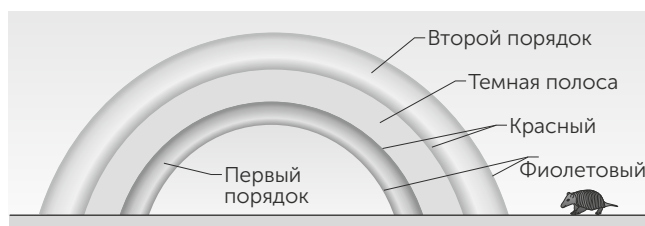


Рис. 6.1 / Задача 6.1

Преломление света и разложение его на цвета происходит во всех освещенных солнцем каплях дождя, но, чтобы увидеть радугу, выходящие из капель цветные лучи наблюдатель должен видеть под определенным углом. Капли, создающие радугу первого порядка, располагаются под углом около  $42^\circ$  к воображаемой линии, идущей от солнца до точки солнечного противостояния. Относительно наблюдателя точка солнечного противостояния находится строго против солнца. Чтобы понять, какие капли создают радугу первого порядка, вытяните руку в направлении точки солнечного противостояния (туда, где находится тень от вашей головы), а затем отведите ее вверх, вправо или влево на угол порядка  $42^\circ$ . Теперь ваша рука указывает на капли, ответственные за эту радугу. За радугу

второго порядка отвечают капли, отстоящие на угол порядка  $51^\circ$  от точки солнечного противостояния.

Поскольку капли должны находиться под определенными углами относительно линии, идущей к точке солнечного противостояния, радуга имеет форму дуги окружности с центром в этой точке. Радугу в форме полного круга можно увидеть, находясь выше поверхности земли, например в самолете. Нельзя сказать: радуга находится от меня на таком-то расстоянии. Все капли, которые видны под определенным углом (независимо от расстояния до наблюдателя), дают вклад в образование разноцветной дуги. Поэтому дойти до конца радуги и найти там горшок с золотом\* не удастся. Кроме того, каждый видит свою радугу: человек, стоящий рядом с вами, видит цветную дугу, частично образованную другими каплями.

Из-за того, что в середине дня точка солнечного противостояния находится слишком далеко под линией горизонта, радуга обычно видна или рано утром, или перед заходом солнца. Но и в середине дня радугу можно увидеть, стоя на возвышенности и глядя на капли вниз.

Радуги третьего и четвертого порядков (для образования которых требуется, соответственно, три и четыре внутренних отражения) — это круговые дуги вокруг солнца, а не вокруг точки солнечного противостояния, но они слишком слабые, и их не видно в ярком свете этой части неба. Есть несколько сообщений о наблюдении радуги третьего порядка, но, по всей вероятности, наблюдали разложение солнечного света на кристаллах льда. Радуга пятого порядка (пять внутренних отражений) располагается между радугами первого и второго порядков, но она слишком тусклая, поэтому тоже не видна.

Небо между радугами первого и второго порядка заметно темнее в сравнении с цветом неба под и над этими радугами: в этой области световые лучи, проникшие в капли, отраженные внутри них и вышедшие наружу, не направлены в сторону наблюдателя. Иначе говоря, в отличие от капель под и над радугами, здесь капли не перенаправляют свет в сторону наблюдателя.

Концы радуги, ее вертикальные участки, часто бывают ярче, и красный цвет в них виден более отчетливо, чем в верхней части радужной дуги. Это определяется

---

\* Согласно ирландскому преданию, у каждого гнома (в Ирландии их называют лепреконами) есть горшочек с золотом, добраться до которого можно, дойдя до конца радуги. *Прим. пер.*

несколькими причинами, одна из которых — размер и форма капель. Падая, большие капли сплюсываются набегающим потоком воздуха. На концах радуги свет проходит через горизонтальное круговое сечение каждой капли. Это сечение идеально подходит для образования ярких, отчетливых полос радуги. В верхней части дуги свет проходит через некруговое сечение капли, и поэтому цвета радуги более тусклые и хуже различимы.

Красный цвет на концах радуги может быть ярче еще и потому, что здесь капли лучше освещены солнечным светом, проходящим под нависшими облаками. Чтобы достичь капли, этот свет проходит долгий путь по воздуху и теряет практически все компоненты, кроме красной.

Тусклые разноцветные дуги, которые иногда можно видеть прямо под радугой первого порядка и реже — сразу над радугой второго порядка, называют *дополнительными* радугами. Они указывают на то, что при появлении радуги капли, разлагающие солнечный свет на лучи разных цветов, это не просто «призмы» — устройства для разложения света. На самом деле радуга представляет собой *интерференционную картину*, созданную световыми волнами, прошедшими через каждую каплю, а затем перекрывающимися. Цвета, которые мы обычно видим, — это самая яркая часть интерференционной картины. Например, ярко-красный цвет — результат перекрытия распространяющихся синхронно и, следовательно, усиливающих друг друга световых волн с частотами из красного конца видимого спектра.

Когда капли дождя примерно одного размера, можно увидеть слабые дополнительные радуги. Если капли разные, дополнительные радуги слишком сильно перекрываются, и разглядеть их нельзя. В этом случае вместо дополнительных радуг видно лишь тусклое белое свечение.

Простые модели описания радуги вполне пригодны, если размер капли превышает 0,1 мм. При более мелких капельках приходится пользоваться гораздо более сложными, не до конца разработанными моделями.

Раскаты грома вызывают колебания капель воды, их форма меняется, что приводит к размытию радужных полос или вообще исключает возможность появления радуги. Вибрации, обусловленные турбулентностью воздушного потока при падении капель, тоже смазывают картину радуги, особенно если капли большие.

## 6.2 • СТРАННЫЕ РАДУГИ

Почему бывают радуги белые и красные? Почему при лунном свете увидеть радугу удастся редко, а цвета лунной радуги и вовсе не разглядеть? Какой формы и каких цветов бывают радуги, которые можно наблюдать в тумане, на туче или на росистом лугу? Если радуга висит над водоемом, одна дуга видна на поверхности воды, а другая в небе. Радуга на воде — это отражение радуги на небе?

Иногда можно увидеть, как от основания обычной радуги поднимается почти вертикально светящийся разноцветный столб. Почему возникает эта полоса?

Обычная радуга — результат рассеяния видимого света. А инфракрасный или ультрафиолетовый свет тоже могут приводить к появлению радуги?

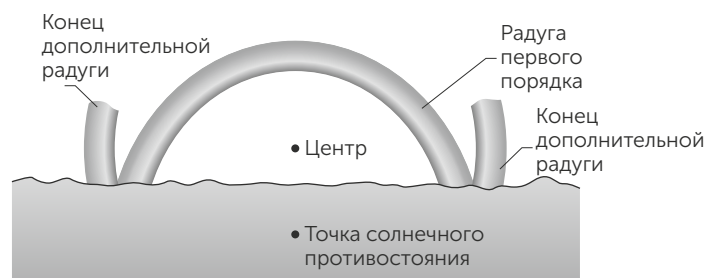
**ОТВЕТ •** Чем меньше диаметр капли, тем меньше разделены цвета радуги. Если капли достаточно маленькие, полосы, соответствующие разным цветам, перекрываются. Так появляется белая радуга — блестящая белая дуга. Красную радугу можно увидеть перед самым заходом солнца. В это время солнечные лучи проходят через атмосферу длинный путь. При этом цвета синего края видимого спектра почти полностью рассеиваются на молекулах воздуха, так что капли освещает в основном красный свет.

Ночью, в лунном свете, тоже возникают радуги, но увидеть лунную радугу в красках труднее, поскольку в темноте глаз человека плохо различает цвета. Радугу в лунную ночь замечают реже: во-первых, она не такая яркая, а во-вторых, ночью люди реже ищут на небе радугу.

Радугу можно увидеть в тумане, на затянутом облаками небе или на лугу, покрытом росой, но заметить ее труднее. Во всех этих случаях капельки слишком маленькие, спектральное разложение солнечного света нечеткое и радужную дугу трудно различить на ярком фоне. Такие радуги выглядят как белые полосы в форме гиперболоидов или эллипсов, то есть так, как в перспективе видит их на горизонтальной поверхности наблюдатель. Если над поверхностью пруда образовался туман, то есть в воздухе висят маленькие капельки воды, то и в этом случае можно заметить радугу. Причем, если над водоемом формируется обычная радуга, то в воде можно увидеть *отраженную радугу*. Однако такая отраженная радуга — не просто отражение радуги над водой, поскольку своим появлением она обязана другим каплям. Чтобы образовалась отраженная радуга, лучи света должны попасть внутрь капель, отразиться раз (или два)

от их внутренних поверхностей, покинуть капли, а затем отразиться от поверхности воды в направлении наблюдателя. Угол, под которым видит эти капли наблюдатель, отличается от угла, под которым он видит капли, образующие обычную радугу.

Кажущийся вертикальным радужный столб, который иногда появляется у основания обычной радуги, тоже результат отражения света от поверхности воды. Но только здесь свет сначала отражается от поверхности воды, а затем освещает капли. Эти капли наблюдатель видит под тем же углом, что и капли, принимающие участие в образовании обычной радуги (рис. 6.2). В очень редких случаях над основной радугой возникает дополнительная радужная дуга (такую дополнительную радугу иногда по ошибке считают радугой третьего порядка). Центр основной радуги первого порядка находится в точке солнечного противостояния, а центр дополнительной радуги, образовавшейся в отраженном свете, сдвигается относительно этой точки вверх. Если видны только концы дополнительной радуги, они кажутся вертикальными, хотя на самом деле они изогнуты.



**Рис. 6.2 / Задача 6.2.** Отраженный от воды свет может привести к образованию радуги, центр которой расположен выше центра радуги первого порядка. Показаны только концы дополнительной радуги.

Ультрафиолетовые и инфракрасные лучи, входящие в состав солнечного света, тоже могут образовывать радуги. Хотя они невидимы для глаза и не являются разноцветными в обычном понимании этого слова, их можно обнаружить с помощью специальной аппаратуры.

## 6.3 • ИСКУССТВЕННЫЕ РАДУГИ

Почему, если распылять вокруг себя воду под прямыми лучами солнца, могут появиться две частично перекрывающиеся радуги? Почему, если ночью во время моросящего дождя направить вверх под углом луч прожектора, на нем можно увидеть две яркие светящиеся полосы (рис. 6.3)?

Иногда некое подобие радуги можно наблюдать прямо на дороге, причем на сухой. Редко, но все же раздаются заявления о том, что радугу видели на грязи и в других неожиданных местах. Возможно ли это?

Если в темной комнате направить луч света на свисающую каплю воды, на ней можно увидеть радужные пятна. Проявив осторожность и внимательность, можно заметить цветные пятна, соответствующие радугам до десятого порядка (то есть должно произойти до десяти внутренних отражений).

**ОТВЕТ •** Когда капли воды находятся недалеко от наблюдателя, глаза видят их под разными углами. Поэтому наблюдатель видит две, только частично перекрывающиеся, радуги. Когда капли далеко, угол зрения обоих глаз практически одинаков, и радуги перекрываются полностью.

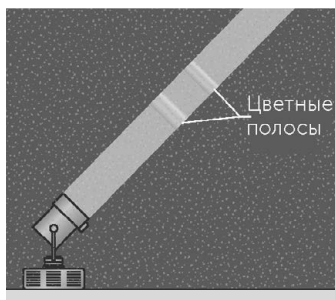


Рис. 6.3 / Задача 6.3. Разноцветные полосы на луче прожектора в дождливую ночь.

Свет от прожектора преломляется и разлагается на цвета радуги падающими сверху каплями дождя. Наблюдатель видит радужные лучи, исходящие от капель, расположенных под нужным углом зрения. Полоса, расположенная дальше от прожектора, соответствует обычной радуге первого порядка на небе (той, которая ниже), а другая полоса — обычной радуге второго порядка. Когда луч прожектора поворачивается, местоположение капель, посылающих в направлении наблюдателя разноцветные лучи, смещается по лучу вверх и вниз. А это значит, что движутся и радужные полосы. Они кажутся довольно блеклыми, главным образом из-за того, что наши глаза плохо различают цвета в темноте.

Радуга на сухой дороге появляется благодаря рассеянию света маленькими стеклянными шариками, которые добавляют в краску для дорожной разметки. Они отражают свет фар обратно в направлении водителя (действуют как катафот) и освещают дорожную

разметку ночью. Если такие шарики при разрушении разметки высвобождаются и раскатываются по дороге, они разлагают прямой солнечный свет точно так же, как капельки воды. Бывают и другие странные радуги, появление которых объяснить труднее, но и они, вероятнее всего, появляются благодаря капелькам воды, осколкам стекла и другим подобным предметам, разлагающим прямой солнечный свет в цвета видимого спектра.

#### 6.4 • ПОЧЕМУ ДНЕМ НЕБО СВЕТЛОЕ

Почему днем небо яркое? Очевидно, атмосфера каким-то образом рассеивает свет в направлении наблюдателя. Однако если атмосфера прозрачна, почему солнечные лучи отклоняются, проходя через нее?

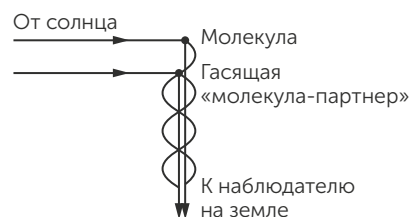


Рис. 6.4 / Задача 6.4. При рассеянии на молекулах, находящихся на расстоянии, равном половине длины волны, световые волны гасят друг друга.

Для ответа на этот вопрос часто используют термин *рэлеевское рассеяние*. Действительно, рэлеевское рассеяние — одна из моделей, описывающих рассеяние света молекулами воздуха. Но Альберт Эйнштейн заметил, что, если бы рэлеевское рассеяние давало исчерпывающий ответ на этот вопрос, небо днем было бы темным. Повторим его рассуждение. Для простоты предположим, что весь солнечный свет имеет только одну длину волны, и рассмотрим одну молекулу воздуха, рассеивающую свет по направлению к наблюдателю. К наблюдателю поступает и рассеянный свет от других молекул, находящихся на линии, соединяющей его с первой молекулой. Всегда можно подобрать такую молекулу, что посланная ею световая волна достигнет наблюдателя строго в противофазе с волной, исходящей от первой молекулы. Эти две волны взаимно гасят друг друга, не давая вклада в свет, который видит наблюдатель (рис. 6.4). Поскольку в среднем для каждой молекулы можно найти такую «молекулу-партнера», гасящую свет в направлении наблюдателя, свет к нему приходить не будет. Небо будет темным, исключая направление прямо на солнце. Ведь так?



**ОТВЕТ** • Действительно, рассеяние света на молекулах происходит согласно модели Рэлея, и, казалось бы, приведенная выше аргументация обоснованна. Но, как отметил Эйнштейн, небо светлое из-за того, что плотность атмосферы неоднородна. Более того, молекулы непрерывно движутся и на короткое время образуют скопления. Следовательно, в каждый данный момент времени невозможно найти для каждой молекулы «молекулу-партнера», которая гасила бы рассеянный свет от первой молекулы. Итак, небо над нами яркое благодаря пространственным и временным флуктуациям плотности концентрации молекул, то есть плотности атмосферы.

## 6.5 • РАЗНОЦВЕТНОЕ НЕБО

Почему днем небо голубое? Голубизна неба связана с самими молекулами воздуха или с присутствием в воздухе воды или мельчайших взвешенных частиц? Почему небо не фиолетовое?

Почему вблизи горизонта небо бледнее, чем над головой? Почему все небо не окрашено в один и тот же цвет? В лунную ночь небо голубое? (Хотя ночью слишком темно, чтобы человеческий глаз мог различать цвета, небо все же бывает окрашено.)

Почему на закате небо красное? Не должны ли красный и желтый быть последними цветами перед закатом, придавая небу оранжевый оттенок (смесь красного и желтого)? Почему на красном участке неба иногда появляется отчетливая контрастная линия?

**ОТВЕТ** • Чаще всего днем небо голубое, поскольку флуктуации плотности атмосферы сильнее рассеивают свет из синей части солнечного спектра, чем из красной. Поэтому, если смотреть на небо в сторону от солнца, глаза воспринимают свет наибольшей интенсивности, а это голубой. Он, конечно, не чисто голубой, поскольку глаза воспринимают и слабый свет другого цвета, который тоже рассеивается. Хотя фиолетовый свет рассеивается молекулами воздуха еще сильнее, чем синий, небо не выглядит фиолетовым. Это связано с тем, что в солнечном спектре интенсивность фиолетового цвета меньше и, кроме того, чувствительность глаз к фиолетовому свету меньше, чем к синему. Заметим, что мы часто называем «фиолетовым» цвет на самом конце видимой части спектра; именно в этом смысле мы употребили здесь слово «фиолетовый». Такое словопотребление не вполне точно: правильнее называть фиолетовым смесь синего и красного, точнее — синий с небольшой примесью красного.

Красный с небольшой примесью синего — это малиновый, а вообще смеси синего и красного — это «пурпурные цвета». Рассеяние света на молекулах обычно называют *рэлеевским рассеянием*, по имени лорда Рэлея, предложившего такую модель в конце XIX века. Вначале Рэлей был уверен, что чистый газ (без взвешенных частиц и пыли) прозрачен, и поэтому считал, что голубой цвет неба обусловлен рассеянием света на мельчайших частицах, а не на молекулах.

Хотя вода и молекулы озона\* в атмосфере поглощают свет из красной области видимого спектра, так что остается главным образом синий цвет, не они ответственные за голубой цвет неба. В атмосфере слишком мало воды, чтобы поглощение красного света молекулами воды могло играть существенную роль, а озоновый слой слишком тонок, чтобы поглощение его молекулами озона было существенно.

На горизонте небо белое, поскольку свет от далеких молекул, прежде чем достигнуть наблюдателя, испытывает многократное рассеяние. Более близкие молекулы, как и более далекие, посылают в направлении к наблюдателю голубой свет. Но путь, который проходит свет от более далеких молекул, длиннее, а значит, он дополнительно рассеивается, и его голубая компонента ослабевает. В конечном счете в свете, идущем от далеких молекул, доминирующим становится красный цвет. Он смешивается с доминирующим голубым светом от ближних молекул, что и обеспечивает белый цвет неба на горизонте.

Ночью небо тоже голубое, но свет слишком тусклый, чтобы глаз человека мог его воспринять. Однако голубой цвет виден на фотографиях с большой экспозицией.

При заходе солнца глаз воспринимает световые лучи, прошедшие более длинный путь через земную атмосферу, чем прямые солнечные лучи, когда солнце в зените. На этом пути большая часть синего света рассеивается молекулами воздуха, и до наблюдателя в основном доходит красный и желтый свет. Пик интенсивности приходится на длину волны порядка 595 нм, что воспринимается как оранжевый цвет. Однако чаще всего цвет неба при закате ближе к красному, поскольку мельчайшие частицы в атмосфере усиливают рассеяние света всех цветов, кроме красного.

Иногда во время заката можно видеть, что небо четко делится на области разных цветов. Такое бывает, если лучи света проходят через слой с температурной

\* Молекула озона состоит из трех атомов кислорода.  
Прим. ред.



инверсией, где температура воздуха повышается с увеличением высоты. Свет, проходящий на закате через такой слой, преломляется, и глаз его не воспринимает. Если до наблюдателя по-прежнему доходит свет от слоев ниже и выше слоя с температурной инверсией и поскольку этот слой выпал из его поля зрения, цвет нижнего слоя не переходит плавно в цвет верхнего слоя.

## 6.6 • ГОЛУБЫЕ ГОРЫ, БЕЛЫЕ ГОРЫ, КРАСНЫЕ ОБЛАКА

Предположим, вы смотрите на уходящую вдаль цепь темных гор. Почему где-то посередине гряды горы становятся голубыми, чуть дальше они кажутся еще голубее, а на горизонте это уже почти белые горы? Почему иногда снежная равнина, ярко освещенная солнцем, где-то вдали кажется желтой? Почему очень далекие облака бывают красными? Можно предположить, что красными облака бывают только на закате, когда часть неба окрашена в красный цвет. Но нет, иногда красные облака встречаются и когда солнце стоит высоко.

**ОТВЕТ •** Темные горы посередине уходящей вдаль гряды кажутся голубыми, поскольку, как объяснялось в предыдущей задаче, воздух между горой и наблюдателем рассеивает в его направлении больше света из синей, нежели из красной области видимого спектра. Поэтому кажется, что темная гора окутана синей дымкой. Если гора расположена дальше, между наблюдателем и горой больше воздуха, где происходит преобладающее рассеяние синего света. А вблизи горизонта гора кажется белой потому же, почему небо на горизонте кажется белым (см. ответ к предыдущей задаче).

Цвет отдаленной, ярко освещенной снежной равнины не совпадает с цветом горы на том же расстоянии, потому что, глядя на снежную равнину, наблюдатель видит отраженный от снега яркий белый свет, которого нет, если он смотрит на гору. По пути к наблюдателю отраженный от снега белый свет рассеивается на флуктуациях плотности воздуха (то есть на неоднородностях атмосферы), интенсивность входящего в его состав синего света падает, и до наблюдателя доходит свет, в котором доминируют красный и желтый цвета. Однако освещенные солнцем молекулы воздуха, находящиеся между наблюдателем и снежной равниной, тоже посылают в направлении наблюдателя рассеянный свет, но в нем доминирует синий цвет. Комбинация голубого рассеянного солнечного света и желто-красного, идущего от снежной равнины, дает белый цвет с желтым оттенком.

Как и далекая снежная равнина, отдаленные тучи тоже могут рассеивать яркий белый свет в направлении наблюдателя, и можно подумать, что и тучи будут выглядеть желтоватыми. Однако очень далекие тучи могут иметь заметный красноватый оттенок. Разница в цвете объясняется тем, что наблюдатель видит тучи на гораздо большем расстоянии, чем снежное поле. Большее расстояние означает, что свет от туч больше рассеивается на молекулах воздуха, что и обеспечивает его красноватый оттенок.

## 6.7 • ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ МОРЯКАМ

Справедлива ли поговорка: «Небо красно к вечеру — моряку бояться нечего; небо красно поутру — моряку не поутру»?

**ОТВЕТ •** Поговорка в какой-то мере справедлива: обычно шторм наступает с запада, продвигаясь вперед как *шквальный фронт*. Если на западе небо красное на закате, следовательно, на западе нет грозовых туч, не позволяющих солнечному свету обогнуть искривленную земную поверхность (рефракция). С большой вероятностью это означает, что в ближайшие дни погода будет хорошей. Однако если небо на западе красное утром, тогда от туч свободно небо на востоке, и вскоре с запада может прийти шторм.

## 6.8 • ЗАКАТЫ И ВУЛКАНЫ

Почему после извержения вулканов по всему миру наблюдаются очень яркие закаты? Вероятно, именно они вдохновили художника Эдварда Мунка на создание цикла картин, среди которых знаменитое полотно «Крик», на котором изображен кричащий от ужаса человек на фоне кроваво-красного неба. Такие необычные закаты Мунк мог видеть у себя дома, в Норвегии, после извержения вулкана Кракатау в Индонезии в 1883 году. В результате этого извержения вулканический пепел попал в верхние слои атмосферы и оставался там в течение нескольких лет. Когда пепел достиг высоких северных широт Норвегии, Мунк, по-видимому, видел эти завораживающие, вызывающие ужас закаты.

**ОТВЕТ •** При извержении вулкана пепел и другие выброшенные вверх частицы формируют на высоте около 20 км плотное облако, в состав которого входит диоксид серы. На этой высоте при реакции диоксида серы с озоном выделяются сульфаты, частицы которых остаются в воздухе во взвешенном состоянии. Облако из пепла

и сульфатного аэрозоля распространяется вокруг Земли. Теперь цвет неба на закате определяется комбинацией солнечного света, рассеянного этим слоем, и света, рассеянного молекулами воздуха под и над ним. Свет, прошедший к наблюдателю из-под облака, в основном красный. Он проходит через плотные слои атмосферы и, многократно рассеиваясь на большом числе молекул воздуха, теряет почти всю свою синюю составляющую. Свет, доходящий до наблюдателя из вулканического облака, тоже проходит через нижние слои атмосферы, но из-за поглощения озоном теряется часть его красной составляющей. Свет, идущий из области над облаком, проходит через более разреженную атмосферу и на своем пути теряет только небольшую часть синего солнечного света. После извержения разнообразие цветов на небе во время заката завораживает. Разные участки неба окрашены по-разному, и картина меняется каждый день. Вулканический пепел и взвешенные частицы остаются в воздухе месяцами, поэтому и фантастические закаты можно наблюдать очень долго. Если на западе далекие тучи за линией горизонта частично блокируют свет под образовавшимся вулканическим слоем, в горизонтальной плоскости цвета меняются, и возможен закат, при котором расцветка неба справа и слева от солнца будет отличаться очень сильно.

### 6.9 • КОЛЬЦО БИШОПА

В августе 1883 года на острове Кракатау вблизи Явы произошло одно из самых разрушительных в истории извержений вулкана. В сентябре преподобный Серено Бишоп, ученый и священник из Гонолулу, описал «необычный венец или гало — белое с розоватым оттенком расходящееся на угол от 20 до 30° туманное кольцо вокруг солнца, цвет которого по краям переходил в сиреневый или пурпурный на голубом фоне. Мы видели это кольцо каждый день, в течение всего дня». В чем причина появления этого гало, сопровождающего многие сильные извержения вулканов, которое теперь называют *кольцом Бишоп*? Что определяет размер такого гало и цвет по его краям?

**ОТВЕТ •** Кольцо Бишоп образуется из-за дифракции света на маленьких частичках, попавших в верхние слои атмосферы в результате извержения вулкана. Дифракция — один из вариантов рассеяния; при дифракции на малых частицах белый свет разлагается на цвета солнечного спектра. Частицы большего размера, поднявшиеся в атмосферу при извержении, осаждаются,

а мельчайшие частицы остаются в воздухе и распространяются вокруг всего земного шара благодаря атмосферным потокам на больших высотах. Если смотреть в сторону солнца, кроме обычного света, исходящего от неба, глаз наблюдателя воспринимает свет, рассеянный этими малыми частицами. Этот дополнительный свет образует необычайно яркую, похожую на кольцо круговую область вокруг солнца. Размер кольца зависит от угла рассеяния, который тем больше, чем меньше радиус частицы. Край кольца может быть окрашен в красный цвет, у которого самая большая длина волны среди цветов видимого спектра, и его угол рассеяния самый большой. Таким образом, от частиц на краю кольца, скажем, справа от наблюдателя, к нему доходит рассеянный красный свет, а синий, рассеивающийся меньше, не доходит. Однако край кольца может быть окрашен в лиловый цвет, если на краю кольца виден и рассеянный красный свет, и обычный синий свет неба. Если все частицы пыли примерно одного размера и, следовательно, одинаково рассеивают солнечный свет, край кольца будет более ярким и более четким. Если же радиус рассеивающих частиц варьируется в широком диапазоне, кольцо будет размытым и белесым.

### 6.10 • КОНТРАСТНАЯ ОБЛАЧНАЯ ДУГА

Когда в следующий раз полетите на самолете, обратите внимание на текстуру (периодический рисунок) облаков внутри угла порядка 42° с вершиной в точке солнечного противостояния (то есть в точке, строго противоположной положению солнца относительно наблюдателя). Возможно, вы заметите, что внутри этого угла облака более текстурированы, чем вне его. С чем это связано?

**ОТВЕТ •** Характерную структуру облаков легче разглядеть при хорошем контрасте между областью яркого рассеянного света и соседней, затененной тучами областью. Самый яркий свет при рассеянии каплями в тучах исходит из области внутри угла порядка 42° с вершиной в точке солнечного противостояния, так что эта область более контрастна.

### 6.11 • ЦВЕТ НЕБА ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ

Почему во время полного солнечного затмения небо на горизонте становится красным, а над головой небо кажется более насыщенно синим, чем до и после затмения?

**ОТВЕТ** • Обычно над линией горизонта мы видим белое небо. Молекулы воздуха, находящиеся не слишком далеко от наблюдателя, рассеивают в его направлении больше синего света, чем красного. Рассеянный свет от молекул, находящихся существенно дальше, распределен по цветам так же, однако, поскольку расстояние до наблюдателя больше, в результате рассеяния свет почти полностью теряет синюю составляющую. Таким образом, более близкие молекулы окрашивают небо в синий цвет, а более далекие — в красный. Поскольку их комбинация дает белый цвет, небо над горизонтом кажется белым. Во время полного солнечного затмения небо над головой окрашено в более темный синий цвет, поскольку из-за тени наблюдатель не видит свет, рассеянный в нижних слоях атмосферы. Обычно такой свет имеет красноватый оттенок: прежде чем достичь наблюдателя, световые лучи проходят через плотные слои атмосферы, теряя большую часть голубой компоненты при рассеянии на большом количестве молекул воздуха. Когда наконец этот свет рассеивается в направлении наблюдателя, в нем доминирует красный цвет. Лучи света, идущие в направлении наблюдателя из более высоких, менее плотных слоев атмосферы, сталкиваются с меньшим числом молекул и поэтому теряют меньше синего света. Когда в конце концов они рассеиваются в направлении наблюдателя, в них остаются в основном лучи синего цвета. Обычно цвет неба у нас над головой — комбинация красноватого света, идущего от нижних слоев атмосферы, и света, где преобладает синий, доходящий до наблюдателя от более высоких слоев. Однако полное солнечное затмение не пропускает красноватый свет, и поэтому в это время небо над головой окрашено в более насыщенный синий цвет, чем обычно.

#### 6.12 • НЕБО ПОЗЕЛЕНЕЛО — ПРЯЧЬСЯ В ПОГРЕБ

Когда я мальчиком жил в Техасе, бабушка всегда отпирала нас в погреб, если во время сильной бури небо приобретало зеленоватый оттенок. Она, как и все соседи, верила, что это сигнал опасности: возможно торнадо. Почему же небо окрашивается в зеленый цвет, а не просто становится темным?

**ОТВЕТ** • Чтобы небо стало зеленым, требуется выполнение двух условий. Во-первых, при рассеивании на молекулах воздуха падающего солнечного света в нем не должно остаться цветов синей области видимого спектра. А это означает, что солнце должно быть

низко. Во-вторых, когда этот свет проходит через тучи, водяные капли должны поглощать свет из красной области видимого спектра. Если облака достаточно плотные (что бывает при сильной буре), в пробившемся через них свете отсутствует как голубая, так и красная области видимого спектра. Поэтому небо будет выглядеть зеленоватым или зеленовато-желтым, поскольку останутся именно эти цвета видимого спектра (рис. 6.5).

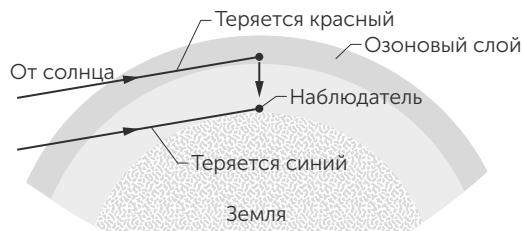


**Рис. 6.5 / Задача 6.12.** Свет от низкого солнца, пробиваясь через тучу, теряет красный цвет и становится зеленым.

#### 6.13 • ПОЧЕМУ НА ЗАКАТЕ НЕБО НАД ГОЛОВОЙ СИНЕЕТ

Почему во время заката становится более насыщенным голубой цвет неба над головой? Не должно ли оно, как и закат, окраситься в красный цвет?

**ОТВЕТ** • На закате солнечные лучи, рассеянные в направлении наблюдателя, достигают его, пройдя по длинному наклонному пути через атмосферу и озоновый слой стратосферы (рис. 6.6). Поскольку озон поглощает излучение красной области спектра и свет проходит через озоновый слой достаточно длинный путь, в спектре прошедшего света синий цвет становится доминирующим еще до рассеяния в направлении наблюдателя. Именно поэтому на закате цвет неба над головой такой насыщенно синий, особенно примерно через 20 минут после того, как солнце зашло за горизонт.

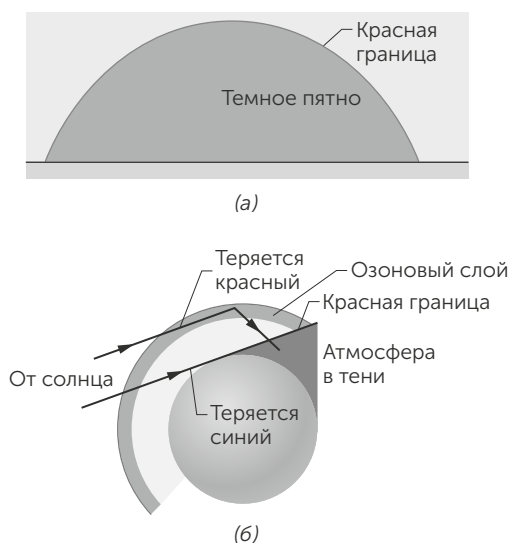


**Рис. 6.6 / Задача 6.13.** Солнечный свет, проходящий через нижние слои атмосферы, становится красным. Солнечный свет, проходящий через озоновый слой, становится синим.

#### 6.14 • ТЕМНОЕ ПЯТНО В РОЗОВОМ ОБРАМЛЕНИИ, ВОЗНИКАЮЩЕЕ НА ЗАКАТЕ

Почему во время заката с восточной стороны над горизонтом появляется темное пятно (рис. 6.7а)? Почему верхняя граница этого пятна, ее называют *поясом Венеры*, часто бывает красной или оранжевой? Почему иногда середина пятна окрашена в тусклый синий цвет?

**ОТВЕТ** • Темное пятно — тень, которую Земля отбрасывает на атмосферу. Тень поднимается на востоке, когда солнце садится на западе. Верхний край тени освещает свет, «покрасневший» за время долгого пути через атмосферу: он теряет синий цвет, рассеиваясь на большом числе молекул (рис. 6.7б). Часть света, достигнув верхней границы тени, рассеивается в направлении наблюдателя, и поэтому сверху тень кажется красной.



**Рис. 6.7 / Задача 6.14.** а) Во время заката с восточной стороны горизонта формируется темное пятно. б) Красный свет обозначает границу тени Земли на небе. Внутренняя часть пятна окрашена в тусклый синий цвет.

Есть несколько причин, почему внутренняя область тени может быть синей. В первую очередь это связано с тем, что свет, идущий к наблюдателю из области тени, не может исходить непосредственно от солнца. Это свет, рассеянный в еще освещенных прямыми лучами солнца верхних слоях атмосферы. Поскольку плотность воздуха в этих слоях невелика, свет меньше теряет голубую компоненту, чем проходя через воздух нижних слоев атмосферы. Если заметный путь свет проходит через озоновый слой, его цвет становится насыщенно синим, так как озон поглощает излучение красного

конца видимого спектра. Какая-то часть этого синего света рассеивается в направлении тени, а затем в направлении наблюдателя. Поскольку фон, на котором видна тень, темный, иногда этот слабый синий свет можно заметить.

#### 6.15 • ЯРКИЕ И ТЕМНЫЕ ЛУЧИ НА НЕБЕ

Иногда, когда солнце низко, по небу веером расходятся чередующиеся яркие лучи и темные зоны между ними. Они выходят из облаков вблизи солнца или сходятся к облакам вблизи точки, расположенной строго напротив солнца. Если очень повезет, можно увидеть, как такие лучи покрывают почти все небо. Почему они появляются и почему они не параллельны? Ведь солнце настолько далеко, что солнечные лучи приблизительно параллельны.

**ОТВЕТ** • У этих лучей много названий. Их называют и сумеречные лучи, и лучи Будды, и пальцы Будды. На самом деле, они почти параллельны и только кажутся расходящимися или сходящимися, потому что наблюдатель смотрит на них издалека. Аналогичная зрительная иллюзия: уходящие вдаль прямые железнодорожные рельсы кажутся сходящимися. Обычно сумеречные лучи образуются в тех случаях, когда закрывающие солнце облака отбрасывают тень на небо. Если есть только одно маленькое облачко, его тень — это темный луч. При более сильной облачности можно увидеть и светлые лучи там, где свет просачивается через промежутки между облаками. В некоторых местах сумеречные лучи видны там, где свет пробивается через промежутки между горными вершинами. До наблюдателя доходит этот свет, рассеянный пылью, каплями дождя, снежинками, взвешенными в воздухе твердыми частицами или молекулами воздуха. Яркие лучи видны по контрасту с областями тени.

Увидеть сумеречные лучи в небе над головой трудно, поскольку при таком ракурсе наблюдатель смотрит на них через узкие проемы и поэтому воспринимает далеко не весь рассеянный свет. Проще их увидеть, если смотреть прямо на солнце или на точку, противоположную той, где оно находится. Это значит, что глаз воспринимает больше рассеянного света, улучшая контраст с тенью.

Часто похожие лучи можно увидеть в очень пыльной, не слишком хорошо освещенной комнате, куда проникает прямой яркий солнечный свет. Их можно видеть потому, что пыль в воздухе рассеивает свет

в направлении наблюдателя, и потому, что этот рассеянный свет не теряется на фоне, как правило, более яркого света, отраженного от мебели и стен позади лучей.

### 6.16 • ГОЛУБАЯ ДЫМКА, КРАСНАЯ ДЫМКА, КОРИЧНЕВЫЙ ТУМАН

Некоторые покрытые растительностью горные цепи окутаны дымкой, окрашивающей их в голубоватый цвет. Это, например, Голубой хребет в США и Голубые горы в Австралии, название которых говорит само за себя. Дым тут ни при чем: горы расположены в необитаемой местности. И поднятая ветром пыль отношения к дымке не имеет, поскольку при сильном ветре она исчезает. И это не туман: наиболее четко голубой оттенок гор заметен при жаркой погоде. Из-за чего же появляется эта голубая дымка?

Иногда поверхность земли или океана покрывает дымка, не позволяющая увидеть их из самолета, летящего на большой высоте. Почему такая дымка часто имеет красноватый оттенок?

Почему туман над городом часто бывает коричневым? Этот цвет обусловлен тем, что частицы тумана поглощают остальные цвета? Или в результате рассеяния на этих частицах остается только коричневатый свет? Зависит ли цвет тумана от освещения, на фоне которого он виден?

Почему, если смотреть на солнце через плотную дымку, можно увидеть, что оно окружено ярким белым кольцом? Почему иногда это кольцо бывает красным?

**ОТВЕТ •** Голубая дымка над горами связана с испарением больших молекул, таких как терпены, растительностью, покрывающей горы. Кроме того, под действием сильного электрического поля, созданного находящимися над ними наэлектризованными облаками, в воздух попадают частички смолы с кончиков иголок хвойных растений и поверхностей других растений. В обоих случаях такие частички достаточно малы, поэтому в направлении наблюдателя они рассеивают главным образом голубые лучи освещающего их солнечного света. Поэтому кажется, что горы окутаны голубоватой дымкой.

Красный цвет дымки, вероятно, обусловлен пылью и аэрозолями, частицы которых имеют большие размеры (порядка одной десятой микрометра в диаметре). Частицы такого размера рассеивают главным образом красные лучи солнечного света.

Туман над городом состоит из мельчайших капелек воды, в которой растворены различные вещества. Одно из них — диоксид азота, поглощающий достаточно солнечного света, чтобы придать туману коричневатый оттенок. Цвет фона внизу, например цвет кирпичей, из которых построены дома, тоже может отразиться на цвете тумана.

Если смотреть на солнце через плотную дымку, взвешенные в воздухе частицы дополнительно рассеивают солнечный свет в направлении наблюдателя. Рассеяние происходит главным образом в направлении распространения света, и поэтому наиболее яркая область видна вблизи солнца. Когда солнце высоко, дымку освещает белый солнечный свет, поэтому и освещенная область, скорее всего, будет белой. Когда солнце низко, дымку освещает красноватый свет, прошедший длинный путь через атмосферу. Поэтому и окружающая солнце область будет красной.

### 6.17 • ОГНИ ДАЛЕКОГО ГОРОДА

Почему, когда ночью едешь в направлении расположенного вдали города, над ним видно грязно-оранжевое свечение? Почему, если смотреть издали на рождественскую елку, украшенную разноцветными лампочками, она кажется преимущественно красной?

**ОТВЕТ •** Несколько факторов ответственны за цвет неба над расположенным вдалеке городом. Один из них — цвет городских огней. Даже если свет городских фонарей белый, но город покрыт дымкой, небо над ним, скорее всего, будет оранжевым или красноватым. Когда свет, рассеянный дымкой, распространяется в направлении наблюдателя, до него доходит главным образом красный свет, поскольку свет синей области спектра ослабевает при рассеянии на молекулах воздуха, оказавшихся на его пути. Кроме того, если размер молекул дымки составляет порядка 0,1 мкм или больше, рассеяние на них тоже выборочно отправляет в направлении наблюдателя главным образом красный свет.

Аналогично, если издали смотреть на рождественскую елку, синяя составляющая света, доходящая до наблюдателя, ослабевает в результате рассеяния на молекулах воздуха. Если елка достаточно далеко, на ней видны только красные огоньки.

### 6.18 • КАК ДАЛЕКО ЛИНИЯ ГОРИЗОНТА

Является ли горизонт границей, за которой кривизна Земли не позволяет видеть более удаленные точки



на ее поверхности? Как расстояние до линии горизонта зависит от того, насколько высоко наблюдатель находится над земной поверхностью? С высоты горизонт по-прежнему виден отчетливо?

**ОТВЕТ** • Рассмотрим лучи света, идущие под углом вверх от источника, положение которого скрыто из-за кривизны Земли. Если бы лучи распространялись по прямой, они прошли бы над головой наблюдателя, и он бы ничего не увидел. Но путь лучей меняется, поскольку плотность воздуха уменьшается с высотой. Благодаря *рефракции* (изменению направления) световые лучи слегка загибаются вниз, в направлении наблюдателя. Какая-то часть этих лучей доходит до наблюдателя, давая ему возможность видеть то, что скрыто из-за кривизны Земли. Чем наблюдатель выше, тем дальше от него линия горизонта. Кроме того, на этот эффект влияет изменение плотности воздуха с высотой. Однако на высоте порядка нескольких километров возможность обширного обзора исчезает из-за размытия изображений в результате сильного рассеяния света частицами в атмосфере.

#### 6.19 • ЦВЕТ НЕБА ПРИ СПЛОШНОЙ ОБЛАЧНОСТИ

Почему за городом цвет неба, плотно затянутого облаками, меняется в зависимости от времени года? Почему летом оно кажется зеленее, чем зимой?

**ОТВЕТ** • Зеленоватый оттенок неба летом обусловлен тем, что свет сначала рассеивается растительностью, а уже затем рассеивается в направлении наблюдателя каплями воды в облаках.

#### 6.20 • КАРТЫ В НЕБЕ

Иногда над ледяными полями Крайнего Севера на нижней границе нависающих облаков или тумана можно увидеть карту окружающей местности. Такие карты называют *ледяными отблесками*, или *облачными картами*. Они отображают ледяное поле на расстоянии до 30 км и помогают проложить маршрут между льдинами человеку, плывущему на каяке или едущему на санях по ледяной равнине. Как можно объяснить появление ледяных отблесков? Можно ли их увидеть при других условиях?

**ОТВЕТ** • На нижнюю границу облаков лед отражает больше солнечного света, чем открытая вода, например, при падении света под углом  $60^\circ$  вода отражает

около 6%, а снег — около 90%. Таким образом, по-разному освещенные снизу облака напоминают карту ледяного поля: темные места соответствуют открытой воде, а яркие — это участки, покрытые льдом. Сходные карты могут появляться и при сильном тумане.

#### 6.21 • ПОШЕЛ СНЕГ — И ПОСВЕТЛЕЛО

Многие замечали, что зимой во время тумана видимость заметно улучшается, когда начинает идти снег. И когда тумана нет, но небо затянуто тучами, сразу становится светлее, если пошел снег. Почему снег меняет видимость и освещенность?

**ОТВЕТ** • Когда во время тумана идет снег, падающие снежинки уносят с собой какую-то часть скопившихся в воздухе капелек воды. Кроме того, они отрывают от капелек тумана молекулы воды, поэтому размер оставшихся во взвешенном состоянии капелек уменьшается. Оба этих фактора приводят к уменьшению плотности тумана и улучшают видимость. Когда тумана нет, неожиданный снегопад улучшает освещенность, поскольку свет, отраженный от свежеснегавшего снега, ярче (коэффициент отражения от свежеснегавшего снега больше, чем от лежалого).

В пасмурный день снег на горизонте ярче, чем прилегающие к горизонту участки неба, по трем причинам. Во-первых, капельки воды в тучах рассеивают солнечный свет главным образом в направлении вперед, поэтому глаз наблюдателя воспринимает больше света от неба над головой, чем от неба вблизи горизонта. Следовательно, небо вблизи горизонта выглядит темнее. Во-вторых, снег интенсивно рассеивает свет во всех направлениях, поэтому глаз воспринимает свет, исходящий от снега вблизи горизонта. Это означает, что снег кажется ярким. В-третьих, когда человек видит границу, разделяющую области разной яркости, его мозг усиливает это различие, делая границу резче.

#### 6.22 • ГДЕ КОНЧАЕТСЯ ЛУЧ ПРОЖЕКТОРА

Во время Второй мировой войны прожекторы использовались для обнаружения самолетов противника. В наши дни их применяют в рекламе для привлечения покупателей. Почему луч прожектора резко обрывается, а не ослабевает или не уходит «в бесконечность»?

**ОТВЕТ** • С увеличением расстояния от лампы прожектора яркость луча уменьшается и поскольку он

расходится, и благодаря тому, что молекулы воздуха и взвешенные в воздухе частицы рассеивают свет. Действительно, если бы на пути луча не было ниче-



го, что рассеивает свет в направлении наблюдателя, он бы его не увидел. При рассеянии интенсивность пучка быстро уменьшается, поэтому видимый луч резко обрывается.

#### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

##### 6.23 • НЬЮГРЕЙНДЖ: ЛУЧ СВЕТА В ДЕНЬ ЗИМНЕГО СОЛНЦЕСТОЯНИЯ

Курган Ньюгрейндж — мегалитическое культовое сооружение, построенное во времена неолита примерно в 3150 году до нашей эры, то есть 5000 лет назад. Он расположен на территории современной Ирландии и представляет собой насыпь, окруженную в основании кольцом из огромных каменных глыб. Единственный его вход обращен на юг. Через него по галерее длиной около 20 м можно попасть в центр кургана. На валуне, прикрывающем вход в гробницу, имеется небольшое отверстие. Предназначение этого отверстия оставалось загадкой, ключ к которой был потерян много веков назад. Но в 1969 году ученые увидели, как на рассвете во время зимнего солнцестояния узкий прямой солнечный луч проник в это отверстие и, протянувшись через галерею, осветил погребальную камеру в центре кургана. Луч прошел так не по случайной случайности. Гробницу Ньюгрейнджа спланировали и построили инженеры эпохи неолита на основании астрономических данных и точных расчетов.

Сходное оптическое явление можно наблюдать и в Массачусетском технологическом институте. В определенные дни на закате через главный вход (со стороны Массачусетс-авеню, 77) солнце посылает свет вдоль основного коридора\* длиной 251 м. И хотя официально в конце его никаких гробниц нет, в этом коридоре или рядом с ним некоторые студенты встретили свою академическую смерть.

\* Это так называемый Бесконечный коридор, который проходит через все главное здание университета. *Прим. пер.*

#### 6.24 • ЗЕЛЕНое СВЕЧЕНИЕ

Когда солнце опускается за чистый горизонт, иногда наверху солнечного диска можно увидеть вспыхнувший яркий зеленый свет — так называемый зеленый луч. Его удалось сфотографировать, и, значит, это не обман зрения. Бывает, что подобное явление можно наблюдать и на восходе солнца. В высоких широтах, на рассвете в конце длинной зимней ночи, когда солнце движется вдоль горизонта, зеленое свечение видно в течение примерно 30 минут. Для этого горизонт должен быть чистым, как над океаном.

Гораздо реже, когда солнце выглядывает из-за низких туч, на небе можно увидеть красное свечение. Внимание: если вы пытаетесь увидеть зеленое или красное свечение, учтите, что смотреть прямо на солнце не стоит: даже если боли вы не почувствуете, свет легко может повредить сетчатку глаз. Никогда не смотрите на стоящее высоко солнце больше секунды и никогда не пользуйтесь биноклем или телескопом. На закате солнечный свет слабее из-за поглощения во время долгого пути через атмосферу к наблюдателю. В это время наблюдать за солнцем безопаснее. Но биноклем пользоваться все равно нельзя — можно необратимо повредить глаза.

Чем же объясняется появление зеленого или красного свечения?

**ОТВЕТ •** Появление зеленого свечения обусловлено несколькими факторами. Главный из них — разделение на цвета, когда солнечный свет, преломляясь, проходит через атмосферу. Традиционное объяснение таково. Если солнце низко, солнечный диск виден нечетко: изображения разных цветов слегка сдвинуты друг относительно друга. Самый низкий — красный солнечный диск, затем, в соответствии с расположением цветов видимого спектра, следуют желтый, зеленый и синий диски. Пока солнце садится, наблюдатель видит наложение всех этих изображений как единое целое. Но как только верхний край солнечного диска опускается за горизонт, красный и желтый диски уже не видны и остаются только синий и зеленый. Однако до того, как свет достигнет наблюдателя, он проходит в атмосфере длинный путь. На этом пути лучи синего цвета рассеиваются, и поэтому синий диск становится слишком тусклым, и глаз его не воспринимает. В последнем, быстро исчезающем изображении доминирует зеленый свет. Это и есть зеленое свечение.

Однако есть новый вариант объяснения. Если наблюдать за солнцем на закате, фотопигменты сетчатки,

ответственные за то, что глаз различает цвета красной области спектра, перестают работать. Говорят, что происходит их обесцвечивание. Если последний видимый свет солнца в основном желтый, из-за ослабления чувствительности к красной части спектра наблюдатель воспримет его как зеленый. При быстром взгляде на последние лучи заходящего солнца можно увидеть, что их истинный цвет желтый. Такого же цвета получается солнце и на фотографии. Когда смотришь на восходящее солнце, проблем с переменной цветов не возникает: в этом случае обесцвечивания фотопигментов не происходит.

Но если такое объяснение полное, почему мы не видим зеленое свечение каждый раз, когда солнце садится за чистый горизонт? Как можно сфотографировать зеленое свечение? Есть еще один дополнительный фактор, объясняющий, почему это явление наблюдается редко. Дело в том, что зеленое свечение могут усилить атмосферные слои разной температуры. Иногда такое разделение на слои приводит к отделению верхнего края солнечного диска и увеличению его размера. Лучший шанс увидеть зеленое свечение возникает тогда, когда увеличившийся в размере верхний край диска становится зеленым. В этом случае на самом деле возникает зеленое свечение, и его можно сфотографировать.

Красное свечение особенно редкое. Его можно увидеть, если на закате солнце выглянет из-за облака и при этом будет виден только красный диск, а изображения других цветов, находящиеся чуть выше за облаком, будут не видны. По-видимому, такое явление наблюдается столь редко потому, что солнце должно находиться достаточно низко и при этом выглядывать из-под далекой гряды облаков.

#### 6.25 • ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ СОЛНЦА НА ЗАКАТЕ

Всмотревшись в низкое солнце над чистым горизонтом, можно заметить, что оно кажется не круглым, а овальным. Солнце может быть разделено на горизонтальные слои, может принять какую-то причудливую форму (например, выглядеть как заглавная буква  $\Omega$ ). Иногда кажется, что солнце, которое мы видим, составлено из отдельных кусочков. Почему же солнце выглядит так по-разному?

**ОТВЕТ •** На закате из-за рефракции (преломления) света при прохождении через атмосферу Земли солнечный диск может сдвинуться вверх. Более того, поскольку при увеличении высоты плотность атмосферы уменьшается, нижний край солнечного диска смещен вверх больше, чем его верхний край. Изменение

величины сдвига уменьшает высоту солнечного диска, а его ширина по горизонтали не меняется. Поэтому диск кажется овалом, короткая ось которого направлена по вертикали. Зрительно это выглядит так, будто диаметр Солнца увеличился, что иногда и утверждает. Сдвиг может оказаться таким большим, что, когда солнечный диск касается линии горизонта, само солнце уже скрылось за изгибом земной поверхности.

Более сложное изменение формы солнечного диска — результат отражения солнца от поверхности спокойной воды или рефракции солнечных лучей, проходящих через атмосферные слои разной температуры. В простой модели тропосферы (нижнего слоя атмосферы Земли) при увеличении высоты температура воздуха уменьшается, но, если встречаются слои, где температура по каким-то причинам выше, из-за изменения коэффициента преломления солнечный диск кажется состоящим из разных слоев или отдельных кусков. Наличие таких слоев может вызвать оптический мираж: кажется, что снизу к обычному солнечному диску присоединено еще одно изображение солнца. В результате мы видим многосвязное изображение солнца, форма которого явно отличается от круга.

#### 6.26 • КРАСНАЯ ЛУНА ПРИ ЛУННОМ ЗАТМЕНИИ

Почему во время полного лунного затмения Луна, попав целиком в тень Земли, становится ярко-красной? Почему она не красная при частном лунном затмении, когда тень покрывает, скажем, 50% диска Луны?

**ОТВЕТ •** Во время полного лунного затмения Луна, казалось бы, вообще не должна быть освещена. Однако солнечный свет, проходя через атмосферу, преломляется в область тени и слабо освещает Луну. Благодаря рассеянию на молекулах воздуха при прохождении теряется синяя область видимого спектра, так что до Луны доходит главным образом свет красной области спектра (рис. 6.8). Какая-то часть этого света отражается от лунной поверхности в направлении наблюдателя, который видит красную луну.

Во время частного лунного затмения до наблюдателя доходит не только красный свет, отраженный от затененной поверхности Луны, но и гораздо более яркий белый свет, отраженный от остальной части ее поверхности. До тех пор пока Луна не войдет в тень по крайней мере на 70%, глаз не может различить слабый красный свет на фоне яркого белого света. Поэтому попавшая в тень часть Луны кажется просто темной.

Сходным образом из-за слишком яркого белого света не удастся разглядеть красный свет на начальной и заключительной фазах полного лунного затмения.

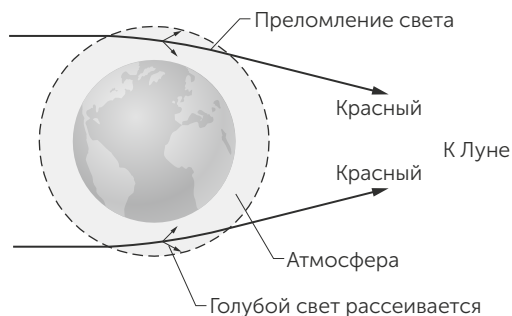


Рис. 6.8 / Задача 6.26. Солнечные лучи теряют синюю составляющую при прохождении через атмосферу Земли.

### 6.27 • КОРОННАЯ ВСПЫШКА

Вслед за разрядом молнии в грозовой туче иногда можно заметить струящееся вверх яркое сияние, вырывающееся наружу из верхушки тучи. Такое сияние называют *коронной вспышкой*. Что это: необычный электрический разряд или своеобразное отражение вспышки молнии?

**ОТВЕТ •** Коронная вспышка — результат отражения света молнии от плоских гексагональных кристалликов льда. Обычно такие кристаллики-пластинки падают так, что их плоская сторона горизонтальна. Однако после разряда молнии пластинки начинают вибрировать, и некоторые из них на короткое время меняют ориентацию так, что отражают солнечный свет или вспышку молнии в направлении наблюдателя. Почему появляются эти вибрации, неизвестно. Они могут быть связаны или со звуковой волной, возникающей при разряде молнии (это гром, который вы слышите), или с изменением электрического поля заряженных частиц в туче.

### 6.28 • ОАЗИСНЫЙ МИРАЖ

Жарким днем вдалеке можно увидеть водоем, но, добравшись до того места, где якобы находилась вода, убедиться, что там сухо. Вода кажется абсолютно реальной, голубой, покрытой мелкой рябью. Это классический *оазисный мираж*, который можно не только увидеть, но и сфотографировать.

Если смотреть на огни движущейся вдалеке по направлению к вам машины, мираж можно увидеть и ночью. Как раз под тем местом, где виден свет фар, можно также увидеть на дороге полосу света. Если полоска

тусклая — это слабое отражение света фар от дороги. Однако если полоска яркая, это, вероятнее всего, *мираж фар*. Почему возникает такой мираж? Может ли птица, летящая над дорогой, увидеть под собой «дорожный» мираж? Иными словами, может ли птица обмануться и решить, что по дороге течет вода?

**ОТВЕТ •** На самом деле мираж, создающий иллюзию текущей вдалеке воды, — это изображение части неба над горизонтом в том направлении, в котором человек «видит воду». Земля (или другая поверхность) поглощает солнечный свет, нагревается и разогревает прилежащий воздух. Оазисный мираж может появиться, когда температура воздуха заметно понижается с высотой. Лучи света, идущие от низкого неба на горизонте к земле, проходя через приземный слой воздуха, температура которого непрерывно повышается, на всем пути непрерывно преломляются (изгибаются вверх) и, наконец, отразившись от земли, уходят вверх под небольшим углом относительно земли (рис. 6.9).

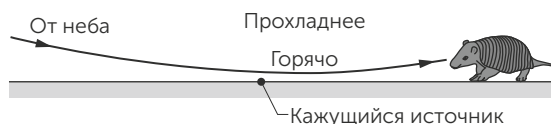


Рис. 6.9 / Задача 6.28. Из-за изменения температуры воздуха луч света, идущий от неба на горизонте к земле, искривляется. Наблюдателю кажется, что источник света расположен на земле.

Когда наблюдатель видит этот свет, его мозг автоматически приходит к заключению, что источник света — яркое пятно на земле. Место пятна он определяет, продолжив обратно по прямой увиденный им луч света. Конечно, это яркое пятно — оптическая иллюзия, но она кажется реальной. Более того, если истинный источник света — голубое небо, пятно кажется голубым, как вода. Турбулентные потоки в воздухе могут заметно менять коэффициент преломления. Тогда пятно колеблется, создавая иллюзию волнения воды.

Оазисный мираж можно наблюдать и при холодной погоде, поскольку для его возникновения горячий воздух не обязателен. Необходимо только, чтобы температура воздуха понижалась при увеличении высоты. Часто подобный мираж можно видеть на дороге: большинство дорожных покрытий поглощают солнечный свет и быстро нагревают воздух над дорогой. Обычно мираж лучше видно, если нагнуться к самой земле или смотреть вдаль на дорогу через бинокль.



Отдаленные объекты также могут вызвать мираж, если идущий от них свет преломляется в воздухе вблизи земли. Такие миражи, как и оазисные миражи, называют *нижними миражами*, поскольку изображение появляется *ниже* источника света.

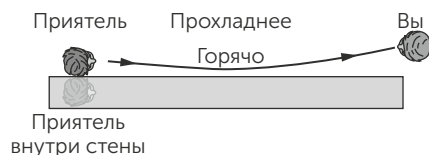
Появление миражей ночью связано со слоем нагретого воздуха над дорогой. Дорожное покрытие, нагретое за день солнцем, может оставаться теплым и ночью. Кроме того, его разогревают шины едущих по дороге автомобилей.

Поскольку направление световых лучей меняется мало, летящая птица не может увидеть мираж (иллюзию воды) на дороге под собой. Как и человек, она видит мираж вдалеке, но он непрерывно удаляется от летящей птицы точно так же, как удаляется от вас водный мираж на дороге, по которой вы едете на машине.

### 6.29 • МИРАЖ В СТЕНЕ

Отчетливый мираж можно увидеть, если посмотреть вдоль обращенной к солнцу стены. Встаньте у одного конца стены и приблизьте глаза к ее поверхности, а ваш приятель пусть встанет у другого конца стены. Возможно, вам удастся увидеть внутри стены зеркальное изображение (иногда их бывает даже два) вашего приятеля, которое к нему будто привязано. Я фотографировал такие миражи с помощью длиннофокусного объектива. Лучшее всего это получалось, когда я стоял так, что мой объектив был направлен строго вдоль стены.

**ОТВЕТ •** Мираж в стене имеет ту же природу, что и описанные выше оазисный мираж и мираж на дороге. Только в этом случае слой горячего воздуха располагается вертикально вдоль стены. Часть лучей, отраженных от вашего приятеля, скользит через слой горячего воздуха и, преломляясь, слегка отклоняется от стены (рис. 6.10). Если ваши глаза или камера располагаются достаточно близко к поверхности стены, часть этих лучей вы видите, и у вас создается впечатление, что их источник находится внутри стены.



**Рис. 6.10 / Задача 6.29.** Вид сверху на стену, нагретую солнцем. Благодаря изменению температуры луч света изгибается. Мираж появляется внутри стены.

### 6.30 • ЖИВУЩИЕ В ВОДЕ ЧУДОВИЩА, ВОДЯНЫЕ И ГРОМАДНЫЕ МИРАЖИ

Есть места, где поздно вечером или рано утром возникают миражи, позволяющие увидеть далекие горы, которые из-за кривизны земной поверхности увидеть нельзя. Такой мираж сначала выглядит как туманное пятно над горизонтом, приобретающее постепенно все более отчетливые очертания, пока не станет видна вся гора.

По-видимому, именно такой мираж позволил предводителю викингов Эрику Рыжему (950–1003) открыть Гренландию. Согласно легенде, изгнанный из Исландии Эрик Рыжий приплыл в Гренландию по кратчайшему пути, хотя при нормальных условиях даже с самой высокой точки Исландии не видны и самые высокие горы Гренландии. Возможно, он увидел мираж ближайшего берега Гренландии и знал, где искать землю.

Известные водяные чудовища, например лох-несское чудовище, на самом деле тоже могут быть примерами подобных миражей, но такие миражи привязаны к определенной местности. При некоторых условиях (при подходящем расстоянии и нужном угле зрения) плавающее в воде обычное бревно может выглядеть как вытянутая вверх шея доисторического чудовища. Узнать в нем бревно нельзя. Может даже казаться, что шея чудовища раскачивается, и тогда создается впечатление, что оно плывет.

В Средние века моряки рассказывали о водяных — огромных поднимающихся из воды монстрах. У водяных узкая талия, плечи как у людей, но рук нет. Вблизи никто водяных не видел, поэтому неизвестно, какая у них кожа: как у человека или они покрыты чешуей. Русалки похожи на водяных, но у них есть грудь, распущенные длинные волосы, руки с перепонками вместо пальцев и хвост. Как появляются такие видения? Почему рассказы о них прекратились, когда люди стали плавать на кораблях с высокими палубами?

Иногда возникает несколько изображений одного удаленного объекта. Они напоминают соединенные вместе фигурки, вырезанные из бумаги. Несколько классических примеров таких миражей показаны на рис. 6.11а. Это изображения далеких парусников, но без искажений, которые обычно присутствуют.

Но самый красивый мираж — это *фата-моргана*, когда вместо отдаленных объектов человек видит башни сказочного замка. Согласно легенде, это хрустальный дом феи Морганы. Иногда при подобных миражах создается иллюзия, что вдалеке по разделяющей вас воде идут люди.



В 1597 году корабль капитана Виллема Баренца (1550–1597), искавшего Северный морской путь в Ост-Индию, сел на мель вблизи одного из островов архипелага Новая Земля в Северном Ледовитом океане. Когда команда впервые увидела солнце в конце длинной арктической ночи, оно еще было на  $4,9^\circ$  ниже горизонта. Почему солнце было видно? При таких миражах изображения солнца нередко сильно искажены. Бывает, что они напоминают стопку блинов. Обычно такие миражи видны в темном «окне», а под ним и над ним небо ярче.

Эффект хиллингара — мираж (обычно его видят на море), при котором кажется, что линия горизонта приподнята; сам горизонт может остаться плоским или приобретает форму блюдца, когда середина несколько ниже краев. При эффекте хафгердингара (от исландского слова, означающего «морской забор») горизонт становится неровным, как если бы он был обозначен случайно стоящими вертикальными конструкциями.

Вдоль шоссе 90 у города Марфа в Техасе местные жители много раз наблюдали блуждающие огни. «Огни Марфы» медленно поднимаются над прерией и висят на темном небе в районе Митчелл-Флэт, к югу от шоссе.

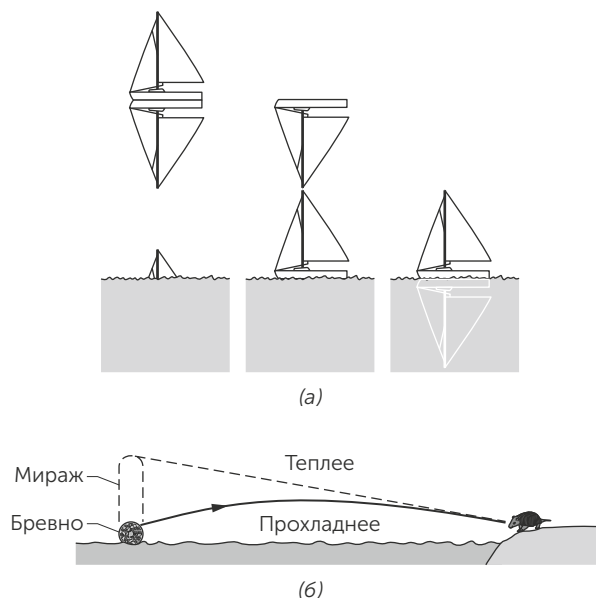
С чем связано появление подобных, таких разных, миражей?

**ОТВЕТ •** Все приведенные примеры миражей связаны с преломлением света — отклонением световых лучей от прямого пути, когда температура слоев воздуха меняется с высотой. Более сложные миражи — результат действия нескольких факторов, каждый из которых приводит к появлению мнимых изображений. Они могут быть перевернутыми (как в случае миража, напоминающего вырезанные из бумаги фигурки) или странно растянутыми и искаженными составными изображениями.

При этом световые лучи, отраженные, скажем, от бревна, и направленные изначально вверх, преломляются в воздухе, отклоняются от первоначального направления распространения и уходят вниз. Теперь они видны наблюдателю (рис. 6.11б). Преломление слабое, поэтому, чтобы увидеть такой мираж, наблюдатель должен находиться вблизи уровня воды.

В зависимости от того, каково фактическое изменение температуры с высотой, можно увидеть несколько изображений или одно вытянутое изображение, но ни одно из них не напоминает бревно. Если коэффициент преломления быстро меняется при изменении

распределения температуры, может казаться, что по воде плывет похожее на змею чудовище. Когда мираж, подобный этому, появляется над источником света, его называют *верхним миражом*. Статистика подтверждает гипотезу о том, что лох-несское чудовище — мираж. Около 77% встреч с этим чудовищем происходили с мая по август. В это время вода нагревается медленнее, чем воздух, что приводит к повышению температуры с высотой. Примерно в 84% случаев погода была тихой, а это еще одно условие, увеличивающее вероятность наблюдения верхнего миража. Более того, большинство видевших чудовище людей находились почти на уровне воды, где они могли видеть отраженные лучи.



**Рис. 6.11 / Задача 6.30.** а) Мираж, напоминающий вырезанные бумажные фигурки. б) Путь света от плывущего бревна.

Вероятно, водяные и русалки — растянутые и искаженные изображения моржей и китов, которых видели моряки, находившиеся недалеко от поверхности воды. Мираж исчезает, если наблюдатель находится слишком близко к животному или слишком высоко, так что до него не доходят преломленные лучи, создающие мираж. Поэтому, когда корабли стали выше, моряки стали реже видеть этих мифических существ.

Мираж фата-моргана виден в тех случаях, когда из-за преломления небольшие отдаленные объекты кажутся большими и высокими башнями или стенами. Если поверх воды смотреть на находящегося вдалеке человека, вместо него можно увидеть верхний мираж:

большая часть тела выглядит как бы приподнятой над водой, тогда как ноги, которые не видны, кажутся погруженными в воду. Создается впечатление, что человек идет по воде.

Вместо гор, расположенных так далеко, что они сами не видны, иногда можно увидеть мираж, если отраженные от гор лучи, преломляясь, огибают Землю по дуге. Изображение солнца, опустившегося за горизонт, тоже может «обогнуть» Землю. Самый удивительный пример — мираж Новой Земли, появившийся в результате многократного преломления солнечных лучей, когда они сначала, преломляясь на большой высоте, уходят вниз, проходят по поверхности Земли, а затем, отражаясь, опять поднимаются высоко вверх и еще раз преломляются вниз. Это напоминает прохождение световых лучей внутри большой изогнутой трубки или вдоль волокна световода. При этом, несмотря на долгий путь света в атмосфере, солнечный диск остается ярким, а небо вокруг него становится тусклым из-за рассеяния на молекулах воздуха. В конце концов вокруг солнечного диска образуется «темное окно». Более яркие области над и под «темным окном» — соседние участки неба.

Миражи хиллингара и хафгердингара тоже связаны с преломлением света воздухом, температура которого повышается с высотой. Для образования миража хафгердингара надо, чтобы распределение температуры воздуха было нерегулярным, тогда как для появления миражей хиллингара и Новой Земли требуется, чтобы в широком интервале значений температура воздуха была стабильна.

Появление ночью самых разных странных мерцающих огней наподобие огней Марфы связано с преломлением света в атмосфере. Источником света могут быть звезды или планеты вблизи горизонта (в этом случае их изображения — нижний мираж). Огни Марфы — это верхний мираж, порождаемый фарами машин, едущих по шоссе через Митчелл-Флэт. Молодежь из Марфы должна благодарить это замечательное оптическое явление: оно позволяет им объяснить, зачем они паркуются в темноте вдоль шоссе 90.

### 6.31 • ПРИЗРАК В ЦВЕТАХ

Сможете ли вы объяснить появление такого призрачного видения? Как-то жарким днем женщина собирала цветы, растущие на влажной земле, от которой поднимался пар. Солнце было чуть в стороне. Неожиданно женщина заметила движение перед собой. Постепенно

она осознала, что смотрит на изображение самой себя — точное, в деталях и цвете. Стоит ли говорить, что призрак испугал женщину и она убежала.

**ОТВЕТ •** Это видение могло возникнуть так. Солнечные лучи, отражаясь от тела женщины, попадали на капельки паров, поднимавшихся от влажной разогретой земли. Затем отраженный свет частично рассеивался каплями обратно в направлении женщины. Я подозреваю, что женщина была ярко освещена солнцем, а влажная земля, от которой поднимался пар, находилась в тени, что позволило женщине видеть рассеянный свет. Похожим образом «создают» призраков в парке «Диснейуорлд», где яркие изображения проецируют на такой тонкий и прозрачный занавес, что его практически не видно. В настоящее время существуют устройства, проецирующие объемные изображения на искусственно висящие в воздухе мелкие капельки воды.

### 6.32 • ДРОЖАНИЕ И МЕРЦАНИЕ ЗВЕЗД

Почему, когда вы смотрите на какой-то удаленный предмет через воздух над костром или над нагретой поверхностью (например, над освещенной солнцем дорогой), его изображение подрагивает? Почему вблизи, над дорогой перед вами, такие искажения увидеть труднее, чем вдали?

Почему звезды мерцают? Почему летом они мерцают сильнее, чем зимой? Почему иногда их цвет меняется? Почему Луна и планеты не мерцают? Мерцают ли звезды, если смотреть на них из космоса?

**ОТВЕТ •** Дрожание — результат турбулентного движения воздуха над нагретой поверхностью. Когда лучи света, исходящие от предмета, на который мы смотрим, проходят через турбулентную область, где плотность воздуха непрерывно меняется, они преломляются в случайных направлениях, и этот предмет кажется дрожащим и искаженным.

Чтобы дрожание было заметно, лучи света должны пройти длинный путь сквозь разогретый и движущийся турбулентно воздух. Если смотреть прямо вниз на горячую поверхность, например на тротуар себе под ноги, лучи, создающие изображение, проходят слишком короткий путь через турбулентный воздух, и дрожание незаметно. Если же смотреть на поверхность под углом, путь лучей через турбулентную область гораздо длиннее, и дрожание можно увидеть. Обычно это требование означает, что нагретая поверхность

должна быть далеко. Например, это может быть отдаленный участок шоссе. И даже тогда дрожание может быть незаметно, если дорога слишком ровная. Дрожание гораздо заметнее, если на дороге есть ухабы.

Иногда можно заметить аналогичный эффект: на белой плоской поверхности появляются мимолетные тусклые тени. Это результат преломления падающего солнечного света на неоднородностях воздуха. В результате такого преломления солнечный свет может фокусироваться, что приводит к появлению сравнительно яркого пятна, а иногда вспышка настолько яркая, что после того, как она затухнет, нам кажется, что осталось темное пятно. Нестабильность, связанная с потоком теплого воздуха, движущегося снизу, под холодным воздухом, тоже может стать причиной дрожания и образования тусклых теней. Поскольку теплый воздух менее плотный, чем холодный, граница, разделяющая области с разными температурами, нестабильна. Она принимает форму волны, где-то фокусируя свет.

С аналогичными изменениями коэффициента преломления света из-за турбулентностей в атмосфере связано кажущееся слабое дрожание звезд на небе, которые как будто быстро и незначительно меняют свое положение. Мы видим это кажущееся движение, поскольку для нас звезды — это яркие точки на темном небе. Кроме того, эти изменения коэффициента преломления меняют фазу достигающих нас световых волн, идущих от звезд. Когда воспринимаемые наблюдателем световые волны *совпадают по фазе* (синхронны), имеет место конструктивная интерференция, и звезды кажутся ярче, а если эти волны *не в фазе*, интерференция деструктивная, и звезды становятся более тусклыми.

Наша зрительная система объединяет в единое целое все изображения звезды, какой она ее воспринимает за короткий промежуток времени, но изменение ее положения и интенсивности свечения все же заметно. Если смотреть на звезды из космоса, они не мерцают, но глаз не является идеальным оптическим устройством, они по-прежнему будут казаться точками, имеющими малые, но не бесконечно малые размеры.

Луна и планеты слишком большие, и поэтому они не мерцают. Хотя каждая точка, скажем, Луны подражает наподобие звезды, но она не является отдельной светлой точкой на темном фоне, поэтому ее дрожание незаметно.

Летом звезды мерцают сильнее, так как в это время года атмосфера более нестабильна, поскольку днем ее дополнительно нагревает солнце.

Если звезда находится вблизи чистого горизонта, ее цвет тоже может постоянно меняться. Свет от звезды проходит длинный путь через атмосферу и при рассеянии на молекулах воздуха, пыли и взвешенных частицах теряет некоторые входящие в его состав цвета. Поэтому мы видим свет, идущий от звезды, не того цвета, каким он исходно был. Постоянные изменения, происходящие при рассеянии, меняют цвет звезд, какими мы их видим.

### 6.33 • ТЕНЕВЫЕ ПОЛОСЫ

Иногда за несколько минут до и через несколько минут после окончания полного солнечного затмения на земле можно видеть неяркие волнистые полосы шириной в несколько сантиметров. Некоторые видели, как эти полосы двигались. С чем связано их появление?

В 1945 году Рональд Айвз рассказал, что на закате солнца, глядя на равнину с возвышенности, шесть раз замечал появление темных полос. Каждая полоса была шириной в несколько километров и двигалась со скоростью порядка 60 км/ч. В чем причина образования таких полос?

**ОТВЕТ •** Наиболее вероятно, что теневые полосы — результат перераспределения интенсивности света при турбулентном движении воздуха в атмосфере Земли: там, где имеет место фокусировка световых волн, появляются светлые полосы, а там, где волны взаимно гасят друг друга, образуются темные полосы. Такие полосы лучше всего заметны перед самым концом солнечного затмения, когда от солнечного диска остается только узкий серп. В это время мы видим свет только в очень небольшом угле зрения, и изменение направления движения света турбулентными воздушными потоками в верхних слоях атмосферы может привести к появлению видимых полос, параллельных солнечному серпу. При частном затмении, когда солнце видно лучше, полосы менее заметны, они более размыты. А если они и появляются, их трудно разглядеть из-за слабого контраста между яркими и темными полосами. Поскольку потоки воздуха быстро двигаются, светлые и темные полосы тоже меняются. Эти изменения создают иллюзию движения. Вероятно, более редкие и менее изученные теневые полосы на закате тоже связаны с фокусировкой и гашением световых волн турбулентностями атмосферы. Айвз наблюдал такие полосы, поскольку на закате, как и во время солнечного затмения, видимая часть солнечного диска сужается.

### 6.34 • 22-ГРАДУСНОЕ ГАЛО И СОЛНЕЧНЫЕ СОБАКИ

Иногда солнце окружает яркая радужная дуга красного цвета по внутреннему краю и голубая по внешнему. Угловой радиус такой дуги составляет  $22^\circ$ , поэтому ее называют *22-градусное гало*. Измерить этот угол легко. Выпрямите руку и вытяните ее по направлению к солнцу ладонью вверх. Если смотреть вдоль этого направления, часть неба, которая видна между кончиками большого пальца и мизинца, занимает примерно  $22^\circ$ . Иногда с одной или с двух сторон от солнца можно увидеть яркие разноцветные пятна. Их называют *солнечными собаками*, или *паргелием*\*. Почему возникают 22-градусное гало и солнечные собаки?

**ОТВЕТ** • 22-градусное гало появляется из-за рефракции (преломления) солнечных лучей кристалликами льда высоко в атмосфере. Эти кристаллики представляют собой шестигранные столбики, похожие на короткие незаточенные карандаши, падающие широкой стороной вверх и при этом вращающиеся. Когда солнечный свет проходит через такой кристалл, он преломляется и продолжает путь в новом направлении, составляющем некоторый угол с первоначальным направлением луча. Интенсивность света, отклоненного на угол  $22^\circ$ , максимальна, и поэтому при таком угле свет самый яркий. Если на такие падающие кристаллики смотреть в любом направлении под углом  $22^\circ$  к солнцу, наблюдатель видит яркий свет и какую-то часть гало.

Гало может быть окрашено, поскольку изначально белый солнечный свет в результате рефракции на кристаллах разлагается на цвета. Красный свет преломляется чуть меньше, чем голубой, поэтому внутри гало окрашено в самый яркий красный цвет.

Солнечные собаки появляются тоже в результате преломления солнечных лучей на гексагональных кристаллах льда, но в этом случае кристаллы — это плоские пластинки, а не вытянутые призмы. *Плоские кристаллы* также падают осью вертикально, а плоскостью горизонтально и подрагивают. Они перенаправляют свет в направлении наблюдателя, только если располагаются вдоль почти горизонтальной линии, проходящей через солнце. Поэтому солнечные собаки и появляются слева и справа от солнца. Когда солнце низко, солнечные собаки располагаются примерно

\* Не следует путать с термином «парагелий», обозначающим одно из состояний атома элемента гелия (He).  
Прим. ред.

на расстоянии  $22^\circ$  от него. Когда солнце выше, солнечные собаки появляются чуть дальше от него. Поскольку при прохождении через кристаллы солнечный свет разделяется на цвета, солнечные собаки обычно окрашены и их красная часть находится ближе всего к солнцу.

Гало и солнечных собак можно видеть и летом, поскольку даже в жаркое время года кристаллики льда образуются в холодном воздухе высоких слоев атмосферы.

### 6.35 • МНОЖЕСТВО ГАЛО, ДУГ И ПЯТЕН НА НЕБЕ

Кроме 22-градусных гало и солнечных собак из предыдущей задачи, на небе можно увидеть большое количество разнообразных ярких гало, дуг и пятен. Некоторые из них показаны на рис. 6.12. Для появления каждого из гало, дуги или пятна требуется определенная высота солнца над горизонтом, поэтому одновременно все они наблюдаться не могут. Их форма тоже может меняться при изменении положения солнца. Некоторые из таких «цветных представлений» случаются настолько редко, что всего несколько человек смогли сфотографировать их.

Еще на небе бывают видны так называемые *световые столбы*, отходящие вверх или вниз от солнца или луны. Возможно, вы видели подобные устремленные в ночное небо столбы вблизи рядов фонарей вдоль улиц или на парковке.

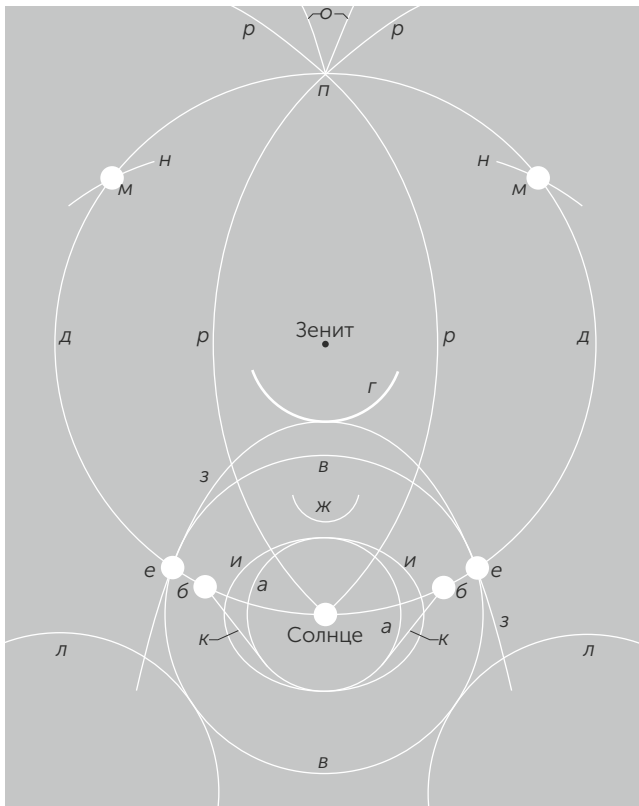
Во время полета можно попытаться найти *субсолнце* — яркое пятно, лежащее ниже того места, где видно солнце, и словно привязанное к самолету.

С чем связано такое разнообразие подобных явлений?

**ОТВЕТ** • Все эти оптические явления обусловлены падающими кристалликами льда, которые перенаправляют в сторону наблюдателя падающий на них солнечный свет. Некоторые гало появляются тогда, когда кристаллики имеют форму коротких карандашей (призм), а другие — если кристаллики льда имеют форму пластинок (см. ответ на предыдущую задачу). Иногда, как в случае появления дуги *Ловица*, гало есть результат преломления света плоскими кристалликами, вращающимися при падении.

Условием появления световых столбов, тянущихся вверх или вниз от солнца или луны, могут быть как призматические кристаллики — карандаши, так и кристаллики в форме пластинок, но в последнем случае солнце или луна должны висеть низко над горизонтом.

Тогда свет отражается в направлении наблюдателя от плоской стороны падающих почти горизонтально пластинок. Небольшие флуктуации ориентации кристалликов размывают область, от которой до наблюдателя доходит свет, приводя к образованию столбов. Когда солнце или луна высоко, световые столбы образуются при отражении света от боковых граней кристалликов — карандашей, падающих горизонтально (их длинная ось направлена по горизонтали). Для каждой точки боковой поверхности столба есть кристаллики, повернутые таким образом, что отраженный от них свет распространяется в направлении наблюдателя. Совокупность всех этих отражений и формирует световой столб.



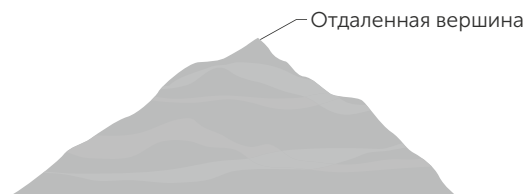
**Рис. 6.12 / Задача 6.35.** Некоторые возможные яркие фигуры на небе. а) 22-градусное гало; б) солнечные собаки вблизи 22-градусного гало; в) 46-градусное гало; г) околозенитная дуга; д) паргелический круг; е) солнечные собаки вблизи 46-градусного гало; ж) дуга Перри; з) опоясывающие касательные дуги 46-градусного гало; и) прикасающаяся дуга 22-градусного гало; к) дуга Ловица; л) нижние касательные дуги 46-градусного гало; м) парантелии, или ложные солнца; н) дуги на парантелиях; о) малоугловые наклонные дуги антигелия; п) антигелий; р) широкоугольные наклонные дуги антигелия.

Субсолнце — один из вариантов световых столбов, но его можно увидеть, когда наблюдатель смотрит на кристаллики-пластинки сверху. Если такие пластинки ориентированы почти горизонтально, появляется изображение солнца, напоминающее зеркальное.

### 6.36 • ТЕНЬ ГОРЫ

Если под вечер, когда солнце низко, подняться на гору и с вершины посмотреть на ее тень, видно, что тень имеет форму треугольника, вершина которого находится где-то далеко от вас (рис. 6.13). Почему все горы отбрасывают почти треугольную тень, независимо от того, какую форму имеет сама гора и как выглядят ее склоны? Почему, если смотреть на тень горы, стоя значительно ниже ее вершины, видно, что она оканчивается хорошо заметным острым выступом, отклоняющимся либо вправо, либо влево?

**ОТВЕТ •** Тень, которую вы видите, стоя на вершине горы, формируется как на земле, так и в слое воздуха со взвешенными частицами (аэрозоле) ниже вас. Большая часть тени так далеко, что детали формы боковой поверхности горы слишком малы и разглядеть их невозможно. Треугольная форма тени определяется законами перспективы: кажется, что боковые стороны тени, начинающиеся слева и справа от наблюдателя, сходятся в какой-то далекой точке на земле и внутри слоя аэрозоля. Расстояние между сторонами тени уменьшается так же, как между уходящими вдаль прямыми рельсами: если смотреть вдоль рельсов, создается впечатление, что на горизонте они сходятся. Сама тень напоминает вашу тень на лужайке при низком солнце: тень от ног — нормального размера, а тень от головы несколько сужена.



**Рис. 6.13 / Задача 6.36.** Тень горы на аэрозоле, которую видит наблюдатель, стоящий выше, вблизи вершины.

Когда вы стоите значительно ниже вершины в тени горы, вы смотрите через аэрозоль, на который падает тень (а не сверху на него). Если стать строго в центре тени, ее стороны будут по-прежнему сходить прямо перед вами, но будет казаться, что ее конец несколько



задран вверх. Если сдвинуться из центра, скажем, влево, вершина горы и ее тень сдвигаются вправо относительно вас. Более того, поскольку вы смотрите на тень через аэрозоль, сдвиг любой части тени увеличивается с увеличением расстояния до нее. Таким образом, поскольку тень вершины горы — самая удаленная от вас точка, она сдвигается больше всего. Если сдвинуться влево и проследить за сужающимся вдаль участком тени, можно видеть, что он не только загибается вверх, но и отворачивает вправо, образуя заострение на конце.

### 6.37 • ИСЧЕЗАЮЩИЕ ТЕНИ ОБЛАКОВ

Представьте себе, что вы летите в самолете над океаном, а небо местами покрыто кучевыми облаками. Почему, когда вы сидите на освещенной солнцем стороне самолета, тень от них видна, а если ваше место с противоположной стороны, вы ее не видите?

**ОТВЕТ •** Если из окна на солнечной стороне самолета смотреть на океан, глаз воспринимает главным образом свет, отраженный и рассеянный поверхностью воды. Это так называемые *блики* — световые пятна на ярко освещенной поверхности. Если облако не пропускает часть солнечных лучей, они не достигают поверхности воды и вы видите тень облака на воде. В том месте, куда падает тень, бликов нет, и поэтому оно темнее окружающей воды.

С другой стороны самолета свет в основном отражается и рассеивается не в сторону наблюдателя. Хотя часть воспринимаемого им света и является отражением неба, это главным образом свет, *идуший из глубины океана*, то есть солнечный свет, прошедший через поверхность воды, который затем отражается от взвеси в воде (на мелководье — от дна) и уходит обратно через поверхность. На не освещенной солнцем стороне самолета в области тени от облака интенсивность отраженного в толще воды света меняется незначительно, поскольку ее по-прежнему освещает свет, идущий от свободной от облаков части неба. Поэтому тени не видно. Однако если тень от облака сместится с воды на землю, она неожиданно станет видна. В этом случае идущего из глубины излучения нет, и глаз воспринимает только свет, рассеянный поверхностью земли (но не свет, идущий от неба). Облака затрудняют попадание солнечного света на то место, куда они отбрасывают тень, препятствуя его рассеянию на поверхности земли, а это значит, что тень видна наблюдателю.

### 6.38 • ЦВЕТ ОКЕАНА

Цвет воды в океане неодинаков. Он меняется от голубого, как чистое небо, до серого — цвета неба, сплошь покрытого облаками. Иногда вода бывает белой, а иногда красноватой, сине-зеленой, зеленой или желтой. Случается, что в океане вода бывает даже коричневой. С чем связано такое разнообразие цветов? Почему часто цвет зависит от угла, под которым наблюдатель смотрит на поверхность океана?

Почему, если плыть глубоко под водой, удерживая в горизонтальном положении белый плоский предмет, цвет его верхней поверхности будет не таким, как цвет нижней поверхности?

**ОТВЕТ •** Цвет океана определяют сразу несколько факторов. Предположим, что вода чистая, атмосферы нет и вода настолько глубокая, что отраженный от дна свет не доходит до наблюдателя. Тогда вода будет черной или темно-темно-синей, поскольку молекулы воды постепенно поглощают свет красной области спектра и рассеивают синий свет.

В условиях, более приближенных к реальным, взвешенные в воде частицы могут изменить цвет океанской воды благодаря селективному поглощению или рассеянию определенных частей солнечного спектра. Если вода настолько мелкая, что наблюдатель воспринимает свет, отраженный от дна океана, селективное поглощение на дне тоже меняет цвет воды.

Наличие атмосферы изменяет ситуацию. Небо над водой несколько меняет ее цвет. Если небо голубое, вода может казаться чуть более голубой, поскольку наблюдатель воспринимает какую-то часть отраженного от поверхности воды света, идущего от неба. Точно так же, если небо серое и вода может быть серой. Однако, если в солнечный день смотреть на сияющую поверхность воды, она может казаться белой: в основном мы воспринимаем отраженный от воды солнечный свет, создающий ослепительный блеск.

Верхняя поверхность погруженного в воду плоского белого предмета имеет определенный оттенок: из-за поглощения и рассеяния в воде белый солнечный свет слегка меняет цвет. Снизу этот предмет освещает свет, прошедший в воде больший путь — вниз ко дну и обратно вверх — или рассеянный водой ниже предмета. Его цвет меняется сильнее, и поэтому верхняя и нижняя поверхности плоского предмета имеют разные оттенки.

### 6.39 • БЛЕСТЯЩИЕ ОТРАЖЕНИЯ СОЛНЦА И ЛУНЫ

Что определяет форму ярко освещенной области на открытой воде при низком солнце или луне («солнечная дорожка», «лунная дорожка»)? Как эта форма меняется в зависимости от высоты солнца и луны над горизонтом?

Когда луна несколько выше горизонта, на небе непосредственно над ярко освещенной областью на воде можно увидеть темный треугольник. С чем связано его появление?

**ОТВЕТ** • Если волнения совсем нет и поверхность воды идеально плоская, наблюдатель видит зеркальное отражение солнца или луны в воде ниже горизонта. Это отражение будет настолько же ниже горизонта, насколько источник света выше горизонта. Однако, когда поверхность воды покрыта волнами, свет отражается от бесчисленного количества наклоненных поверхностей. Мы видим множество мимолетных отражений солнца или луны от всех волн в произвольном месте в произвольный момент времени, если до нас доходит отраженный от их наклонной поверхности свет. В среднем все эти изображения попадают внутрь овала или уходящей от нас так называемой *световой дорожки*, левая и правая стороны которой ограничивают область, куда попадают отраженные изображения. Стороны световой дорожки сходятся в точку на горизонте непосредственно под солнцем или луной. Когда луна или солнце высоко, область, в которой видны изображения, имеет форму овала. Когда луна или солнце низко, эта область больше напоминает дорожку, уходящую к горизонту.

Темный треугольник над блестящей лунной дорожкой, вероятно, просто оптическая иллюзия, результат контраста между сверкающей яркой световой дорожкой ниже горизонта и темным небом над горизонтом рядом с ней.

### 6.40 • КОЛЬЦА СВЕТА

Обычно в волнующейся воде отражения меняются так быстро, что глазом их различить нельзя, но их можно «поймать» с помощью фотоаппарата с короткой выдержкой. Предположим, вы фотографируете отражение корабельной мачты. На фотографии часть мачты будет выглядеть как волнистая линия, а другие — как отдельные замкнутые петли. Объяснить, почему изображение мачты получилось волнистым, не составит труда, но откуда взялись петли? Могут ли получать-ся изолированные незамкнутые петли? Отражения

других объектов тоже могут быть искажены до неузнаваемости, в частности, прямые линии могут превращаться в овалы.

**ОТВЕТ** • Искажения отражений, будь то волнистые линии или петли, обусловлены кривизной поверхности воды при волнении. Если участок мачты, отражающийся в воде, достаточно длинный, то в вогнутой части поверхности воды он может отразиться в виде овала. Когда изображение мачты представляет собой замкнутую петлю, это означает, что небо по одну сторону от мачты отображается внутрь петли, а по другую — наружу. Петли, образующиеся при отражении вытянутых объектов, таких как мачта, всегда замкнутые. Однако на снимке отражения в воде точечного источника света могут присутствовать петли со «свободными концами». Они соответствуют моментам открытия и закрытия затвора камеры.

### 6.41 • ТЕНИ И ЦВЕТА НА ВОДЕ

Почему свою тень можно увидеть на поверхности мутного пруда или чистой лужи, но она не видна, если пруд глубокий и чистый? Почему тени других людей можно увидеть, только если вода в пруду очень грязная?

Глядя на свою тень на поверхности воды с рябью из небольших случайно ориентированных волн, обратите внимание на область вблизи тени головы. Кажется, что от нее во все стороны расходятся яркие лучи-спицы, описанные Уолтом Уитменом в стихотворении «На Бруклинском перевозе»\*.

Пусть чистую воду глубиной около метра освещают солнечные лучи, пробивающиеся через листву дерева. Обратите внимание на края пятен света на дне. Если солнце позади вас, пятна белые, если же солнце светит вам в лицо, края у пятен цветные: ближе к вам они красные, а на дальнем краю — голубые. Почему края цветные и отчего их вид зависит от направления взгляда?

**ОТВЕТ** • Тень видна только в том случае, когда она освещена гораздо меньше, чем окружающая ее поверхность. Например, на тротуаре ваша тень видна. Но если на тротуар налить чистой воды, тень станет

---

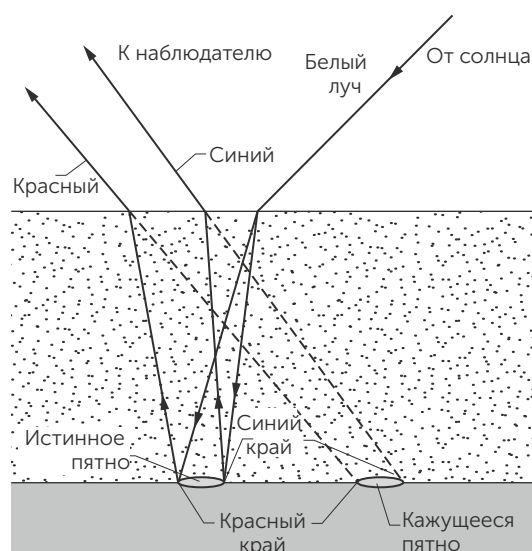
\* Я знаю, как ослепляет сверкающий солнечный след,  
Как выглядит ореол из лучей, подобных тончайшим  
центростремительным спицам, вокруг тени, упавшей  
от моей головы на воду, искрящуюся под солнцем...  
Из сборника «Листья травы». Перевод В. Левика.  
Прим. пер.

менее четкой, так как от поверхности воды отражаются небо и окружающие вас предметы. Поскольку какие-то из этих отражений накладываются на вашу тень, она не будет такой же темной, как на сухом асфальте.

Если же вода существенно глубже, чем лужа на тротуаре, контраст тени с окружающей ее поверхностью будет еще слабее: в окрестности тени интенсивность отраженного от дна света уменьшается. Однако, если вода не слишком прозрачная, тень различима лучше, поскольку взвешенные в воде частицы, окружающие тень, рассеивают свет в направлении наблюдателя. В этом случае тень не плоская, как на дороге, а скорее трехмерная. Именно поэтому увидеть тень кого-то другого бывает сложно: вы смотрите на нее вдоль наклонной линии и видите в воде как освещенные, так и затененные области. По мере увеличения загрязненности воды тень другого человека постепенно «поднимается» к поверхности. А если вода совсем уж грязная, вы эту чужую тень легко различите.

При волнении волны в сравнительно чистом водоеме фокусируют свет в воде, где затем лучи света рассеиваются на взвеси и выходят из воды обратно. Вы видите этот рассеянный свет как яркие линии там, где свет фокусируется, и как темные — там, где фокусировки нет. Направление этих линий зависит от структуры волн, и часть из них параллельна линии, направленной от ваших глаз к солнцу. Следовательно, вам кажется, что они сходятся в точке прямо напротив солнца, то есть в области тени от вашей головы, подобно тому, как «сходятся» убегающие вдаль прямые рельсы. Иногда создается впечатление, что эти «спицы» вращаются, но это лишь иллюзия, попытка мозга разобраться со случайно меняющимися изображениями.

Если солнце светит вам в спину, пятна света в мелкой чистой воде выглядят белыми, несмотря на то что при входе в воду каждый солнечный луч расщепляется на лучи разных цветов. При этом красные и синие лучи, входящие в состав каждого белого солнечного луча, достигают дна в разных точках и рассеиваются в большом числе разных направлений. Однако, чтобы вы их увидели, лучи должны вернуться по первоначальному пути, то есть обратно в направлении солнца. Таким образом, цветные лучи, выходя из воды, вновь собираются, и свет, который вы видите, белый, как и пятна на дне. Именно поэтому плоская стеклянная пластина (например, оконное стекло) не разделяет лучи частей спектра, как призма.



**Рис. 6.14 / Задача 6.41.** Наблюдатель, стоящий лицом к солнцу, видит окрашенные края пятен света на дне водоема.

Если стоять лицом к солнцу, вы видите цветные лучи, исходящие из разных точек на дне водоема (рис. 6.14). Пусть поверхность водоема освещает узкий луч света. Тогда светлое пятно на дне в основном белое, поскольку от точек внутри него до вас доходят лучи всех цветов. Но лучи, идущие от точек на дальнем и ближнем краях пятна света, окрашены. При входе в воду каждый белый солнечный луч преломляется, и лучи разных цветов расходятся. Синие лучи отклоняются на самый большой угол по сравнению с лучами других цветов, поэтому самые дальние отраженные от дна лучи, которые видит наблюдатель, синего цвета. Точно так же в результате преломления лучи красного цвета меняют свое направление меньше всего и заканчиваются на дне ближе всего к наблюдателю. Это означает, что от дальнего края пятна в направлении наблюдателя рассеиваются синие лучи, а от ближнего — красные.

## 6.42 • ЦВЕТ ТЕНИ

Посмотрев на свою тень на снегу, можно заметить, что она слегка окрашена. С чем это связано? Может ли цвет тени меняться?

**ОТВЕТ •** Тень должна быть темной, но, если небо голубое, идущий от него свет освещает затененный снег, придавая ему слабый голубой оттенок. На остальной поверхности тени имеет оттенок, соответствующий цвету этой поверхности. Если поверхность вокруг тени ярко окрашена, может показаться, что цвет тени

соответствует дополнительному цвету поверхности, но это только оптическая иллюзия, создаваемая зрительной системой\*. Подобный эффект легко увидеть, если обратить внимание на тень артиста, которого на сцене освещают разноцветные прожекторы.

#### 6.43 • ПОЧЕМУ МЫ ВИДИМ ТЕМНУЮ ЧАСТЬ ЛУНЫ

Когда обращенная к нам часть Луны на 75% освещена Солнцем, почему все же видны оставшиеся 25%, на которые не попадает солнечный свет?

**ОТВЕТ** • Темную часть Луны тускло освещает *земное сияние* — отраженный от Земли солнечный свет. Какую-то часть этого света, рассеянного Луной обратно в направлении Земли, мы видим. Исследуя этот «вернувшийся» к нам свет, ученые могут понять, каким наблюдатель из глубокого космоса увидит исходящий от Земли свет. Мы видим небо в основном голубым, и наблюдатель из космоса увидит, что оно в основном голубое. Спектр света, исходящего от планеты, зависит от характеристик ее поверхности, и можно надеяться, что анализ света, пришедшего к нам от планет, вращающихся вокруг других звезд, сможет указать на то, есть ли на этих планетах атмосфера и растительность. Другой путь — изучение спектра поглощения этих планет при прохождении через их атмосферу излучения звезды. Например, наличие поглощения озоном части излучения звезды (в спектре будет видна соответствующая «линия поглощения») укажет на наличие кислорода и, возможно, жизни.

#### 6.44 • ВЕНЕЦ И ОППОЗИЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ

Как-нибудь утром, когда трава мокрая от росы, посмотрите внимательно на тень своей головы на траве. Может, вам удастся увидеть, что ее окружает яркий свет, который называют *венцом* (рис. 6.15а). Такой же яркий свет вокруг тени можно увидеть и на многих поверхностях: на сухой траве и других растениях, на поверхности мелких водоемов, покрытых рябью, и на разнообразных сухих шероховатых поверхностях. Можно даже увидеть яркие лучи, отходящие от тени движущейся машины, падающей на покрытое травой поле.

Во время полета попытайтесь увидеть венец на земле вокруг тени самолета в точке прямо напротив солнца. Когда эта точка с большой скоростью движется

\* Дополнительные цвета — пары цветов, оптическое смешение которых приводит к формированию психологического ощущения белого цвета. *Прим. ред.*

по траве, деревьям, голой земле, тротуарам и тучам, венец то появляется, то исчезает. Если самолет летит низко, внутри венца можно заметить внезапные яркие вспышки света. Когда самолет достаточно высоко над землей, бывают видны отходящие от венца тонкие темные линии. Что является причиной появления венца, ярких вспышек и темных линий?

Если некоторые растения, покрытые ночью росой, осветить, например, фонариком, человек с фонариком увидит, что растения сверкают в его лучах, а человек, стоящий сбоку, ничего не увидит. С чем связано это сияние и почему ночью так светятся не все растения?

Когда наступает полнолуние, любой освещенный участок на поверхности луны вдруг может стать аномально ярким. Это так называемый *оппозиционный эффект*\*\*. Такие участки могут быть на 25% ярче полной луны днем раньше или позже. Почему же вдруг лунная поверхность начинает сильнее рассеивать солнечный свет? До того как астронавты высадились на Луну, в НАСА беспокоились, что, если шлемы их скафандров не снабдить специальным экраном, отраженный от лунного грунта свет может ослепить «прилунивших» астронавтов.

Если газон или спортивную площадку подстричь определенным образом, она будет напоминать шахматную доску с яркими и темными квадратами. С чем связано такое изменение яркости? Имеет ли научное обоснование старая английская поговорка: «По другую сторону забора трава всегда зеленее»?\*\*\*

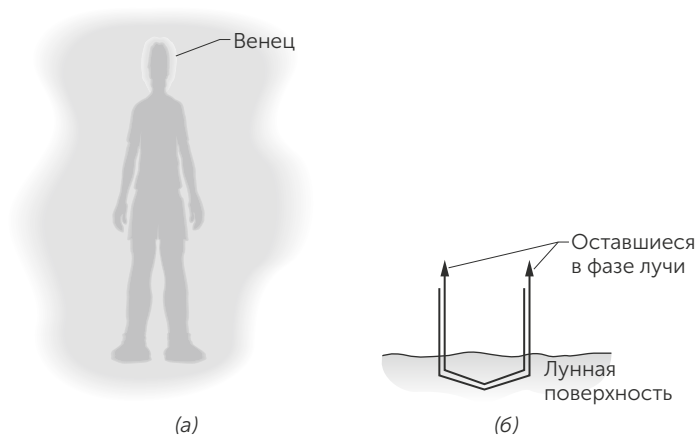
**ОТВЕТ** • Пусть сначала трава будет сухой. Если смотреть на траву вблизи тени своей головы, видны только травинки, но не отбрасываемые ими тени, которые сами же травинки заслоняют. Следовательно, область вблизи тени головы хорошо освещена, поскольку вы видите только отраженный от нее солнечный свет. Подальше, за этой яркой областью, в какой-то мере становится видна и тень, отбрасываемая травинками, а значит, суммарная яркость уменьшается. На этом фоне область вокруг тени головы кажется яркой.

\*\* Эффект называют оппозиционным, поскольку увеличение яркости имеет место, когда солнце находится в противостоянии (англ. opposition) по отношению к наблюдаемому объекту.

\*\*\* «Трава всегда зеленее по другую сторону забора» — дословный перевод английской пословицы “The grass is always greener on the other side of the fence”. Соответствующая ей русская пословица звучит так: «Яблоки всегда вкуснее в соседнем саду».



Венец вокруг тени на неровной местности обусловлен небольшими углублениями, особенно если они напоминают по форме прямые углы (катафоты). Свет от таких мест отражается обратно в направлении источника света, и вы в какой-то мере видите этот свет. Структура поверхности (ее форма и материал) может дополнительно способствовать отражению света в обратном направлении.



**Рис. 6.15 / Задача 6.44.** а) Тень на росистой траве при низком солнце. б) Путь двух лучей через поверхностный слой лунного грунта.

Когда трава покрыта росой, лучи света проходят внутрь капли, отражаются от ее внутренней поверхности и от травинки, а затем выходят из капли обратно, фактически в направлении солнца. Если смотреть на траву вблизи тени головы, этот уходящий к солнцу свет частично виден, а значит, трава выглядит яркой. Но если смотреть на траву сбоку, отраженный обратно свет не виден, то есть трава уже не такая яркая.

Сферическая капля фокусирует солнечный свет в небольшое пятнышко чуть позади себя. Отраженный обратно свет наиболее яркое, если листья покрыты тоненькими волосками, которые могут удерживать каплю на небольшом расстоянии от поверхности листа. На таких листьях получается очень яркий венец.

Когда фонарик освещает капли росы на растении, как и при образовании венца, свет частично отражается обратно в направлении фонарика. Отраженный свет гораздо ярче, если капли почти сферические. На покрытых воскоподобным веществом листьях некоторых растений капли стремятся свернуться в сферические бусинки. Поэтому, если луч света направить на такое растение, по сравнению с другими растениями оно покажется сияющим.

Яркие вспышки, заметные внутри венца во время полета, обязаны своим появлением *ретрорефлекторам*, или *катафотам*. Обычно это выполненные из пластмассы или стекла бусины, направляющие отраженный свет обратно к его источнику. Например, в краску для дорожной разметки иногда добавляют крошечные ретрорефлекторы, которые направляют отраженный свет фар обратно к водителю, так что разметка хорошо видна ночью. Когда тень самолета проходит через такой знак, ваш глаз видит свет, отраженный такой краской обратно в направлении солнца. Темные линии, которые иногда сопровождают появление венца, — тени *конденсационного следа*, оставленного самолетом.

Когда самолет летит достаточно низко и на земле видна его тень, вокруг нее можно заметить яркую полосу. Эта полоса может быть результатом обратного рассеяния света в направлении солнца капельками воды на растениях (тогда это венец) или капельками воды в воздухе. Однако яркую полосу можно увидеть даже в отсутствие капель воды, на сухой земле без всякой растительности. Кроме того, яркую полосу можно увидеть и вокруг тени *другого* самолета. Такая полоса, конечно, не может появиться из-за капелек воды. В этом случае яркие полосы — оптическая иллюзия. Когда темное пятно (например, тень самолета) соседствует с яркой областью, на границе между ними зрительный анализатор создает иллюзорные зоны, известные как *зоны Маха*.

Солнечный свет, достигший поверхности Луны, рассеивается практически во всех направлениях. Однако яркость света максимальна при обратном рассеянии в направлении Солнца. Возможна такая гипотеза. Пусть два разделенных небольшим расстоянием луча света проходят через лунный грунт по одной и той же траектории, но в противоположных направлениях, а затем, выйдя из него, — в направлении Солнца. Волны света, соответствующие этим лучам, почти *совпадают по фазе* (распространяются почти синхронно) и, интерферируя, усиливают друг друга и дают более яркий свет (рис. 6.15б). Так происходит во время полнолуния, когда мы входим в эту яркую полосу света, рассеянного обратно в направлении Солнца, и тогда Луна особенно яркая. В остальные дни мы воспринимаем свет, прошедший через лунный грунт и вышедший из него, со случайными фазами. Такие световые волны не усиливают друг друга, и поэтому Луна не такая яркая.

Свет, рассеянный некоторыми мхами обратно в направлении Солнца, тоже может быть ярким, поскольку



отраженные световые волны усиливают друг друга. Этот яркий, рассеянный мхом в обратном направлении свет можно заметить, если ваша тень падает на достаточно удаленную, покрытую мхом поверхность, но чаще его можно увидеть на аэрофотоснимках.

Газон после стрижки может выглядеть клетчатым из-за ориентации травинки после прохождения косилки. На некоторых участках травинки ориентированы так, что отражают свет в направлении наблюдателя, на других участках травинки ориентированы иначе, и поэтому мы видим только отбрасываемую ими тень.

Трава за забором может выглядеть зеленее, поскольку вы смотрите на нее под углом и не замечаете темную землю под ней. Земля будет видна, если смотреть на траву точно сверху вниз. В поговорке отражено отношение к жизни, но это уже не из области физики.

#### 6.45 • КОЛОСЯЩАЯСЯ НИВА

Иногда кажется, что колосющаяся нива или высокая трава волнуются: по полю, напоминая волны в океане, движутся яркие и темные пятна. Если подойти к полю совсем близко, увидеть подобное волновое движение не получится. С чем же оно связано?

**ОТВЕТ •** Волны, которые, как нам кажется, мы видим, связаны с порывами ветра, колеблющими колосья или траву. Если поверхности листьев растений повернуты к вам, они отражают свет в вашу сторону и место, где они растут, кажется ярче. Если же листья растений смотрят в другую сторону (стебли склоняются к нам или в противоположную сторону), интенсивность отраженного света меньше и такая область кажется темнее. Ветер то дует, то затихает, а вместе с ним появляются то более яркие, то более темные пятна. Чтобы увидеть пробегающие по полю волны, надо находиться далеко от растений, тогда детали происходящего будут незаметны.

#### 6.46 • ГЛОРИЯ

Если встать на горе спиной к солнцу и посмотреть вниз на плотный туман, освещенный прямыми солнечными лучами, вокруг тени головы можно увидеть цветные кольца. Это так называемая *глория*. Ее еще называют *антIVENцом*, или *брокенским призраком*.

Чаще всего глаорию можно увидеть, когда летишь в самолете над плотными облаками. Она образуется вокруг точки, расположенной прямо напротив солнца. Если самолет летит не слишком далеко от облаков и вы видите его тень, центр глаории находится в точке,

соответствующей вашему местоположению в самолете. Часто глаория имеет форму круга, но иногда может напоминать сильно вытянутый овал. Если расположенная напротив солнца точка оказывается то над облаками, то над землей, глаория то исчезает, то появляется, а иногда вместо нее можно видеть венец — увеличение яркости, обусловленное рассеянием света земной поверхностью обратно в направлении солнца.

С чем связано появление глаории? Какова последовательность цветов в ней? Как угловой размер глаории зависит от размера капель, из которых состоит туман или тучи под вами?

**ОТВЕТ •** Глаория появляется в результате интерференции света, рассеянного назад по направлению к солнцу крошечными капельками воды. Наблюдатель видит глаорию, если его глаза воспринимают этот рассеянный свет. Рассеяние — один из видов *дифракции*, явления, при котором свет вблизи препятствий отклоняется от прямолинейного направления и огибает препятствие. При этом происходит интерференция дифрагированных волн. Это означает, что некоторые из этих волн усиливают друг друга (*конструктивная интерференция*), а некоторые стремятся погасить друг друга (*деструктивная интерференция*). В результате образуется дифракционная картина, где лучи света разных цветов расходятся в разных направлениях.

Модель, описывающая образование глаории при дифракции на маленьких капельках, очень сложна. Приведем упрощенное объяснение. Рассеянный назад свет состоит, во-первых, из лучей, которые прошли внутрь капли и, отразившись от ее внутренней поверхности, вышли обратно в направлении солнца, и, во-вторых, из лучей, которые обогнули каплю и, скользя вдоль ее задней поверхности, ушли обратно к солнцу. Два типа рассеянных волн либо усиливают, либо гасят друг друга, и при рассеянии на большом числе капель их интерференция приводит к появлению ярких разноцветных колец, причем внешнее кольцо красное, а внутреннее — синее.

Угловой размер глаории зависит от размера капель: чем больше капли, тем меньше глаория. Обычно размер капель варьируется в очень широком диапазоне, так что кольца разных цветов перекрываются и их бывает трудно разглядеть. Однако, если капли примерно одного размера, цвета хорошо различимы и тогда можно увидеть несколько систем колец, окрашенных в цвета видимого спектра (от синего до красного).

Глория имеет овальную форму, если солнце низко и она появилась поверх длинной гряды облаков, где размер капель меняется в зависимости от расстояния до наблюдателя.

#### 6.47 • КОРОНА

Корона — яркая область вокруг солнца или луны, состоящая иногда из цветных колец. Однажды я заметил лунную корону из двух наборов колец всех цветов радуги спектра, а третий, внешний, набор был виден только частично. Зрелище было завораживающим. С чем связано появление короны и какова последовательность цветов в ней? Что определяет размер короны?

**ОТВЕТ •** Солнечные и лунные короны — результат дифракции света, идущего от них к наблюдателю, на каплях воды в тучах. Дифракция — одна из форм рассеяния, при которой свет огибает препятствие, что приводит к образованию интерференционной картины. Некоторые из дифрагированных волн усиливают друг друга, и появляются яркие участки, а другие — гасят, и возникают темные участки. При дифракции изначально белый свет разлагается на цвета, причем красные лучи отклоняются на больший угол, чем синие, и поэтому внешний край короны обычно красный. Углы, на которые отклоняются лучи разных цветов, зависят от размеров капель. Если капли примерно одного размера (несколько микрометров в диаметре), кольца разных цветов видны отчетливо. При сильном разбросе размеров капель кольца разных цветов перекрываются, и наблюдатель видит белую корону (возможно, красноватую по внешнему краю).

По-видимому, кольца вокруг солнца на картине Винсента Ван Гога «Красные виноградники в Арле» никакого отношения к короне не имеют. Скорее, Ван Гог изобразил их, чтобы подчеркнуть яркое сияние, исходящее от солнца.

#### 6.48 • КОРОНА НА ЗАМЕРЗШЕМ СТЕКЛЕ

Проходя холодной зимней ночью мимо замерзшего окна, можно заметить, что огни в помещении окружены цветными кольцами. Почему они появляются? Почему эти кольца окружены еще одним темным кольцом?

**ОТВЕТ •** Корона, которую видно через окно, появляется по тем же причинам, что и рассмотренная в предыдущей задаче корона в атмосфере. Обе они связаны с дифракцией света на каплях воды, но в данном случае капли конденсируются на стекле. Внешнее

темное кольцо — часть дифракционной картины: волны, приходящее отсюда к глазу наблюдателя, находятся не в фазе и, следовательно, ослабляют друг друга.

Если замерзшее окно движется, например, это окно проходящего поезда, корону можно видеть вокруг каждого проносящегося мимо вас источника света. Однако, если источник света мигает, как, скажем, ртутная лампа уличного освещения, можно увидеть наложенные на корону вертикальные яркие и темные полосы.

#### 6.49 • РАДУЖНЫЕ ОБЛАКА

Почему иногда облака окрашены в бледные пастельные тона, часто розовые и зеленые?

**ОТВЕТ •** При дифракции солнечного света на каплях воды или кристалликах льда, имеющих в диаметре несколько микрометров, возникает интерференционная картина, где одни волны усиливают, а другие гасят друг друга. При определенных углах рассеяния световые волны распространяются в фазе и усиливают друг друга, и тогда свет яркий. При других углах дифрагированные волны не в фазе. Они гасят друг друга, и тогда свет тусклый или его интенсивность вообще равна нулю. Поэтому при разных углах цвета разные. Однако распределение цветов зависит от размера капелек или кристалликов льда. Если все они примерно одного размера, цвета яркие, если размеры капелек или кристалликов сильно разнятся, разные цвета накладываются друг на друга, и получается либо белый цвет, либо бледные цвета.

Поскольку дифрагированный свет распространяется главным образом вперед, чтобы увидеть цветное облако, оно должно располагаться практически на линии вашего взгляда на солнце. Кроме того, облако должно быть разреженным (тонким). Иначе при прохождении света через это облако разложение на цвета будет происходить многократно, так что перекрытие цветов окажется слишком сильным и разглядеть отдельные цвета будет невозможно. В плотном облаке окрашенными могут быть только его разреженные края.

#### 6.50 • СИНЯЯ ЛУНА

Моя бабушка жила в маленьком городке в Техасе. Она говорила, что чудеса у них бывают только «при синей луне». Но что же это такое — синяя луна?

**ОТВЕТ •** За голубой цвет луны ответственны взвешенные в атмосфере частички радиусом от 0,4 до 0,9 мкм. Такие аэрозоли образуются в верхних слоях атмосферы

при извержении вулканов или сильных лесных пожарах. Частички изначально могут быть нужного размера или они могут дорасти до него за счет конденсации воды на них. Когда лунный свет проходит через слой этих взвешенных частичек, красная и желтая составляющие спектра рассеиваются в сторону от наблюдателя. Это значит, что только зеленые и синие лучи доходят до него, и он видит либо синюю, либо сине-зеленую луну. Однако, если луна низко над горизонтом, путь лунного света через атмосферу может оказаться настолько длинным, что в воздухе рассеивается большая часть синих лучей, и луна становится зеленой. То же самое относится и к цвету солнца: если смотреть на него через атмосферный аэрозоль, состоящий из частиц нужного размера, оно может быть синим или зеленым.

### 6.51 • ЖЕЛТЫЕ ПРОТИВОТУМАННЫЕ ФАРЫ

Действительно ли в тумане желтые фары освещают дорогу лучше белых?

**ОТВЕТ** • Если радиус капель тумана меньше 0,2 мкм, синий и зеленый свет рассеивается сильнее красного и желтого. Тогда действительно желтый свет пробивается в тумане дальше, чем свет других цветов, и, рассеиваясь или отражаясь от покрытия обратно к водителю, лучше освещает дорогу. Однако, если радиус капель больше и составляет порядка 0,6 мкм, результат противоположный. В этом случае синий и зеленый цвет проникают в туман глубже. А если капли еще крупнее, все цвета проходят через туман приблизительно одинаково. Чтобы еще усложнить задачу, заметим, что в каплях могут содержаться примеси, поглощающие свет определенного цвета. Ситуацию усугубляет и то, что глаз имеет разную чувствительность в разных частях спектра — на краях (синий, красный) она меньше. Так что однозначно ответить на поставленный вопрос нельзя.

### 6.52 • ПОЧЕМУ МОКРОЕ ТЕМНЕЕ СУХОГО

Почему мокрый песок темнее сухого? Почему влажные волосы темнее сухих? Почему, когда едешь на машине по неосвещенной дороге, во время дождя разметка практически не видна?

**ОТВЕТ** • Когда песок сухой, свет в песке поглощается слабо и обычно рассеивается только раз или два до того, как выходит из песка. Поэтому на солнце песок выглядит ярким, даже иногда сверкающим. Когда песок мокрый, свет в нем рассеивается много раз и гораздо

меньшая его часть выходит из песка. Такой песок выглядит темнее. Есть две модели, объясняющие дополнительное рассеяние света на песчинках, покрытых водой. Во-первых, слой воды может представлять собой «ловушку»: при многократном отражении внутри этого слоя свет постепенно поглощается. Так можно объяснить, почему влажные волосы темнее. Во-вторых, если песчинки мокрые, свет более эффективно рассеивается вперед, а это означает вглубь песка, и, следовательно, меньше света выходит из песка обратно.

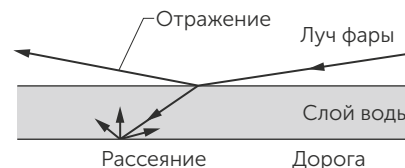


Рис. 6.16 / Задача 6.52. Слой воды на дороге уменьшает количество света, попадающего на покрытие дороги.

Если дорога сухая, свет от автомобильных фар рассеивается от поверхности дороги во всех направлениях. К водителю возвращается достаточно отраженного света, и он различает разметку и другие особенности дороги. Когда дорога покрыта слоем воды, часть света отражается зеркально от поверхности раздела «воздух — вода», и поэтому меньше света достигает самого покрытия дороги (рис. 6.16). Рассеявшийся здесь свет до того, как его увидит водитель, опять проходит границу раздела «вода — воздух». Здесь какая-то часть света (в зависимости от угла, возможно, и весь свет) отражается обратно на поверхность дороги. Все это означает, что свет, который видит водитель, может оказаться слишком слабым, чтобы он смог различить разметку и особенности дороги.

### 6.53 • ЦВЕТ СНЕГА И ЛЬДА

Почему обычно свежеснеживший снег белый, а если выкопать в снегу ямку, он может стать голубым? Какого цвета лед? Почему антарктические айсберги бывают зелеными, а арктические никогда?

**ОТВЕТ** • Когда при белом солнечном свете смотришь на свежеснеживший снег, глаз воспринимает и свет, отраженный от поверхности кристалликов льда, и свет, прошедший через некоторые из них. Как и падающий солнечный свет, отраженный свет остается белым. При прохождении света через кристаллики его красная компонента несколько ослабляется за счет поглощения

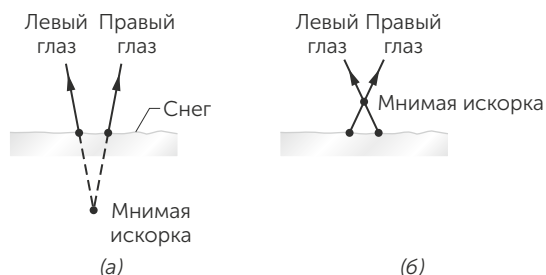
и снег приобретает голубой оттенок. Однако этот голубой цвет настолько бледный, что различить его невозможно, и снег по-прежнему кажется белым. В ямку свет попадает, пройдя через окружающий ее снег. При этом он рассеивается на гораздо большем количестве кристалликов, и тогда голубой оттенок становится заметнее.

Большие глыбы льда, такие как айсберги, выглядят голубыми, когда свет уходит в лед на глубину порядка метра. Он или проходит его насквозь через боковые поверхности, или, рассеявшись на неоднородностях внутри, выходит обратно с той же стороны. Однако некоторые айсберги, оторвавшиеся от антарктических шельфовых ледников, имеют заметный зеленоватый оттенок. Он появляется из-за того, что синий свет поглощается фитопланктоном, постепенно накапливающимся в основании шельфового ледника, когда подледная морская вода примерзает к нему. Поглощение синего цвета изменяет спектр света, прошедшего через лед, и делает его зеленым. Если отколовшаяся глыба льда переворачивается, зеленоватый лед оказывается сверху айсберга. Возможно, в Арктике потому нет зеленых айсбергов, что шельфовые ледники движутся и глыбы льда откалываются от них слишком быстро, чтобы могло накопиться достаточное количество фитопланктона.

#### 6.54 • ФИРНОВОЕ ЗЕРКАЛО И ИСКРЯЩИЙСЯ СНЕГ

Иногда в солнечную погоду от заснеженного поля отражается разноцветный, слепящий глаза свет. Его связывают с так называемым *фирновым зеркалом* (от немецкого *firnspiegel* — «ледяное зеркало»). Почему можно наблюдать подобное зрелище? Почему свежевываший снег обычно окрашен лишь слегка и искрится? Почему часто кажется, что искры на снегу возникают либо над, либо под его поверхностью?

**ОТВЕТ •** Фирновое зеркало образуется в яркий солнечный день, когда верхний слой снега подтаивает, а затем еще раз замерзает, образуя тонкую кристаллическую ледяную пленку. Энергию, необходимую для таяния,ставляет проникающий в слой солнечный свет, где он много раз отражается, пока не поглощается почти полностью. Затем поглощенное тепло уходит к поверхности снега, где тают, а затем повторно замерзают на холодном воздухе небольшие участки. В результате образуются кристаллы льда, действующие на солнце как зеркальца, а иногда и как призмы — и наблюдатель видит яркий, разложенный на цвета свет.



**Рис. 6.17 / Задача 6.54.** Две соседние искорки на снегу создают иллюзию одной искорки: а) под или б) над поверхностью снега.

Обычно мы видим просто искрящийся снег, что обусловлено самими кристалликами льда, действующими как зеркальца. Поскольку глаза разнесены, каждый глаз человека видит свой набор искорок на снегу перед собой. Когда искорки, которые видит каждый глаз, оказываются недалеко друг от друга, мозг автоматически совмещает их, и возникает иллюзия одной искры, находящейся либо под поверхностью снега, либо над ней. Если искорка, которую видит левый глаз, находится слева от той, которую видит правый глаз, кажется, что одна искорка вспыхнула под поверхностью (рис. 6.17а). Если же искорка, которую видит левый глаз, окажется справа от той, которую видит правый глаз, создается впечатление, что одна искорка вспыхнула над поверхностью (рис. 6.17б).

#### 6.55 • БЕЛАЯ МГЛА И СНЕЖНАЯ СЛЕПОТА

При каких условиях на снежное поле опускается белая мгла, при которой человек перестает ориентироваться и ничего не видит? Почему при ярком свете пропадает тень? Иногда снежная мгла приводит к повреждению глаз, иногда даже к неизлечимой слепоте (так называемой *снежной слепоте*). Опасаться белой мглы надо скорее в солнечный день или в пасмурный?

**ОТВЕТ •** Белая мгла бывает разной. Когда низовая метель поднимает вверх пушистый снег, видимость может упасть настолько, что, отойдя на несколько метров, легко потеряться. В другом случае белая мгла случается, когда земля покрыта белым снегом, а небо затянуто сплошными белыми облаками. Поскольку и снег, и облака хорошо отражают свет, освещение становится настолько диффузным (иначе говоря, рассеянным), что исчезают тени. Когда снег под ногами столь же яркий, как и облака над головой, горизонт неразличим, а небо и снег сливаются в одну белую пелену. Тогда может

возникнуть ощущение, что вас окружает бесконечная белая пустота. Рассказывая о полярной экспедиции, длившейся пять лет, Вильямур Стефанссон вспоминал, что обычно белая мгла опускалась и не в ясные дни, и не когда на небе была сплошная плотная облачность. Скорее, такая угроза возникала в тех случаях, когда солнечный свет пробивался через прикрывающие небо облака. Вот тогда можно не заметить и ледяную глыбу высотой в пол человеческого роста, не говоря уже о льдинах меньшего размера, о которые легко споткнуться.

Яркий видимый свет и интенсивное ультрафиолетовое излучение могут вызвать боль в глазах и даже привести к слепоте. До сих пор, чтобы уменьшить воздействие света на глаза, коренные жители Канады и Аляски защищают глаза маской из дерева или кости с узкими прорезями для глаз.

#### 6.56 • ЖЕЛТЫЕ ЛЫЖНЫЕ ОЧКИ

Некоторые лыжники утверждают, что при плохой видимости неровности на снегу (например, небольшие сугробы) видны лучше через очки с тонированными желтыми стеклами. Известный полярник Вильямур Стефанссон рекомендовал янтарные очки при движении по заснеженным равнинам и ледяным полям. Действительно ли в таких условиях лучше видно через желтые очки?

**ОТВЕТ •** Одна из причин, по которой желтые очки могут быть полезны, такова. При плохой видимости сугробы менее заметны, поскольку взвешенные в воздухе частички рассеивают солнечный свет в область отбрасываемой сугробами тени. Поскольку контраст между тенью и снегом практически отсутствует, тень видна хуже. Если частички очень маленькие (их радиус меньше 0,2 мкм), они рассеивают синий и зеленый свет видимого спектра лучше, чем красный и желтый, то есть в область тени рассеивается мало желтого света. Если надеть желтые очки, будет виден только желтый свет, рассеянный снегом, а это значит, что легче будет различить тень от сугробов и определить, где они находятся.

А вот еще один аргумент. Вне зависимости от того, есть снег или нет, желтые очки усиливают кажущуюся (не реальную) яркость пейзажа. Этот эффект связан с палочковыми фоторецепторами сетчатки глаза. Они более чувствительны к красному и желтому свету солнечного спектра, чем к синему и зеленому. Взаимодействуя с колбочками, фоторецепторами еще одного

типа, они передают сигналы в мозг, что способствует кажущемуся усилению яркости.

#### 6.57 • КОГДА ЛЕД СТАНОВИТСЯ ТЕМНЫМ

Почему, когда лед на замерзшем пруду начинает таять, некоторые его участки становятся темными?

**ОТВЕТ •** На то есть несколько причин. Во-первых, когда лед тает, его верхняя поверхность превращается в структуру, состоящую из вертикальных, изолированных друг от друга, похожих на карандаши кристалликов, пространство между которыми заполнено водой. Полностью замерзший лед выглядит ярким, поскольку свет равномерно отражается от его поверхности, а когда лед начинает таять, свет в пространстве между вертикальными кристалликами отражается многократно, становясь все менее ярким при каждом отражении. Чем меньше света доходит до наблюдателя, тем темнее кажется лед.

Во-вторых, когда вода быстро замерзает, растворенный в ней воздух собирается в пузырьки, вмерзшие в лед. Поскольку обычно скорость замерзания больше вблизи поверхности воды, в верхнем слое льда может скопиться много таких пузырьков. Причем выйти из жидкости они не могут, так как сверху уже лед. Каждый пузырек рассеивает солнечный свет, из-за чего поверхность льда выглядит ярко-белой. Весной где-то на поверхности лед подтаивает, и в этих местах солнечный свет теперь падает на находившиеся глубже слои льда, в которых замороженных пузырьков меньше. Поэтому оттаявшие участки выглядят темнее остальной поверхности льда.

#### 6.58 • ЯРКИЕ ОБЛАКА И ТЕМНЫЕ ТУЧИ

Почему чаще всего облака белые и яркие? Почему тучи бывают темные? Почему края некоторых темных туч яркие (говорят, что у таких туч есть «серебряная подкладка»)?

**ОТВЕТ •** Облака белые по трем причинам. Во-первых, капли воды примерно одинаково рассеивают лучи всех цветов, составляющих белый солнечный свет. Во-вторых, капли плохо поглощают свет, поэтому свет не окрашивается в результате поглощения. В-третьих, до того как попасть к наблюдателю, свет многократно рассеивается на каплях. Любой набор маленьких рассеивателей, для которых эти три условия выполняются, при освещении выглядит белым. Туча может казаться



темной по контрасту с окружающим ее небом, если она настолько плотная, что не пропускает солнечный свет. Туча, которая с земли кажется темной, может выглядеть белой и яркой, если смотреть на нее сверху из самолета. При взгляде из самолета темными будут только те тучи, на которые не попадает прямой солнечный свет.

На каплях воды в туче свет интенсивно рассеивается вперед. Рассеяние в любом другом направлении гораздо слабее. Поэтому если наблюдатель видит темную тучу вблизи солнца, капли на ее краях интенсивно рассеивают свет в его направлении. Хотя внутренняя часть такой тучи будет темной, сильное рассеяние на ее более тонких краях делает их ярче. Если туча далеко от солнца, интенсивного рассеяния света в направлении наблюдателя на ее краях не происходит, и он не видит «серебряной подкладки».

### 6.59 • СЕРЕБРЯНЫЕ ОБЛАКА

На широте примерно 50° после заката иногда появляются призрачные серебрино-голубые облака. Особенно часто их можно видеть на Британских островах и в скандинавских странах. В чем причина появления этих облаков, которые называют *серебряными облаками*, или *светящимися ночными облаками*? Почему иногда они напоминают волны? Почему первый раз их наблюдали только в 1885 году и почему с тех пор количество наблюдений и яркость этих облаков понемногу увеличивается?

**ОТВЕТ •** Эти облака формируются в *мезосфере* — верхних слоях атмосферы на высоте около 80 км. Поэтому их еще называют *мезосферными облаками*. Поскольку мезосферные облака находятся так высоко, они освещены солнцем, даже когда на земле вот уже почти час как темно. Вероятно, они состоят из крошечных льдинок, образовавшихся на пылинках, попавших в мезосферу благодаря кометам, метеорам, а иногда и вулканам. Эти облака слишком тонкие, поэтому они не видны днем или даже на закате. Когда серебряные облака напоминают волны, это, вероятно, связано с распространяющимися по облакам *волнами плотности* (волнообразными изменениями давления и температуры, часто называемыми *гравитационными волнами*).

Первый раз серебряные облака заметили в 1885 году после извержения вулкана Кракатау у острова Ява. Это чудовищное извержение привело к выбросу пыли и воды на большую высоту. На высоте примерно 80 км вода кристаллизовалась на вулканической пыли

(а возможно, и на пылинках от комет и метеоров), и образовались крошечные (субмикронные) льдинки, что и позволило заметить мезосферные облака. После этого серебряные облака стали видеть все чаще, и становятся они все ярче. Это связано с тем, что из-за развития промышленности, увеличения площади рисовых плантаций, скопления мусора и метеоризма домашних животных растут выбросы метана в атмосферу. Попав в верхние слои атмосферы, метан вступает в химические реакции, что приводит к увеличению количества молекул воды и крошечных кристалликов льда, из которых состоят серебряные облака.

### 6.60 • ОТРАЖЕНИЕ В ЗЕРКАЛЕ

Когда речь заходит о плоском зеркале, часто возникает вопрос: «Почему в отражении правая и левая стороны меняются местами, а низ и верх отображаются правильно?» Предположим, край плоского зеркала расположен на уровне вашей головы. Какой длины должно быть зеркало, чтобы можно было увидеть отражение своих ног? Зависит ли ответ от того, насколько далеко вы стоите от зеркала? Если отойти от плоского зеркала подальше, большую или меньшую часть вашего тела вы увидите в зеркале?

**ОТВЕТ •** Ваше изображение в плоском зеркале — это не разворот слева направо, а инверсия. При этом точки, лежащие ближе к зеркалу (например, ваш нос) окажутся ближе к вам, а лежащие дальше (например, затылок) окажутся дальше. Точки, лежащие в плоскости, параллельной зеркалу, окажутся в такой же плоскости, причем каждая — напротив себя. Например, все, что находилось слева от вас, остается слева и от вашего отражения в зеркале. Недоразумение возникает, когда вы мысленно поворачиваетесь вокруг вертикальной оси, пока не совместитесь со своим отражением в зеркале. Тогда рука, которую вы назовете правой, совместится с отражением вашей левой руки. Однако не зеркало произвело этот поворот. Чтобы увидеть это, повернитесь вправо так, чтобы ваша левая рука оказалась около зеркала. При этом к вам приблизится отражение вашей левой руки, которое находится напротив вашей левой руки.

Если верхний край зеркала находится на уровне вашей макушки, его высота должна составлять только половину вашего роста, чтобы вы смогли увидеть в нем свои ноги. При этом верх головы виден за счет отражения от верхней части зеркала, а ноги — от нижней.

Эти отражения не меняются, если вы встанете ближе к зеркалу или отойдете от него подальше.

### 6.61 • ОТРАЖЕНИЕ В ВОДЕ И ЗЕРКАЛО НА СЦЕНЕ

Увидите ли вы в спокойной воде зеркальное отражение окружающего вас пейзажа?

Предположим, вы смотрите на отражение потолка над головой или своего лица в чашке с чаем. Почему вблизи стенок чашки отражение слегка искажено? Если, когда солнце высоко, поставить чашку с чаем под прямые солнечные лучи, при некоторых ориентациях чашки можно увидеть два крошечных отражения солнца. С чем это связано? Почему искажения вблизи края чашки меняются, если чашка переполнена так, что поверхность жидкости слегка выступает над ее краем?

Нальем в чашку немного молока и наклоним ее так, чтобы молоко покрывало только часть доньшка. Почему молоко на дне как бы очерчено бесцветной полосой?

Когда зрители видят отраженное в зеркале лицо актера (в театре, во время телепередачи или в кино), что в зеркале видит сам актер?

**ОТВЕТ** • Обычно отражение в воде отличается от того, что вы видите непосредственно вокруг себя, поскольку предметы на переднем плане несколько иначе загораживают предметы сзади. Дело в том, что, когда вы смотрите на предмет, а не на его отражение в воде, исходящие от предмета лучи, скорее всего, почти горизонтальны, тогда как отраженные лучи сначала отклоняются вниз к поверхности воды (рис. 6.18).

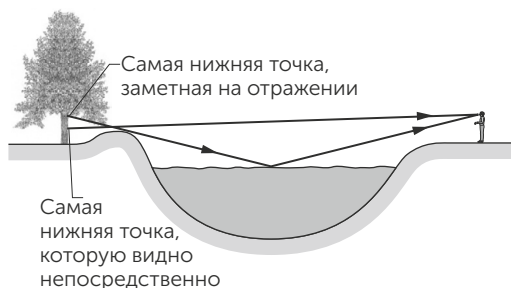


Рис. 6.18 / Задача 6.61. Прямые и отраженные лучи доходят до наблюдателя разными путями.

Поверхность жидкости в чашке с чаем вблизи стенок чуть искривлена: из-за взаимодействия молекул воды друг с другом и сцепления воды со стенками жидкость слегка поднимается по стенкам вверх. Этот эффект вызван так называемым *поверхностным*

*натяжением*. Поверхность жидкости действует как зеркало, отражая все, что находится над ней. Плоская поверхность жидкости при отражении не искажает изображение, тогда как при отражении от *вогнутой* поверхности изображение сжимается. Если, когда солнце высоко, стать к нему спиной и посмотреть в стоящую перед вами чашку с чаем, можно заметить два сжатых изображения солнца. Одно из них — результат отражения от искривленной поверхности вблизи стенок чашки, а при формировании другого изображения свет от искривленной поверхности сначала падает на плоскую поверхность, а уже затем отражается от нее в направлении наблюдателя.

Когда чашка переполнена, жидкость вблизи ее края немного выступает наружу и ее поверхность оказывается *выпуклой* около краев. И опять изображение сжимается, напоминая изображение в выпуклых зеркалах, например зеркалах заднего вида в автомобилях.

Молоко в чашке белое, поскольку свет сначала проходит через поверхность молока, а затем рассеивается в направлении наблюдателя содержащимися в молоке взвешенными частицами, например капельками жира. Рассеянный свет достаточно яркий, и из-за него мы не видим свет, отраженный от поверхности молока зеркально. Однако там, где на дне наклоненной чашки отчетливо видна полоса, взвешенных в молоке частичек мало, и поэтому свет слабо рассеивается в направлении наблюдателя. Кроме того, искривленная поверхность концентрирует отраженный от нее свет. В результате мы видим яркую бесцветную полосу.

Если режиссер требует от актера держать зеркало так, чтобы отражение его лица видели зрители или его можно было заснять на камеру, сам актер видит в зеркале не свое лицо, а камеру или зрителей. Эта иллюзия часто используется на живописных полотнах: персонаж явно смотрит в зеркало, а мы видим в зеркале его отражение.

### 6.62 • ПРИЗРАК ПЕППЕРА И ГОЛОВА БЕЗ ТЕЛА

В 1863 году Джон Генри Пеппер, профессор Политехнического института Центрального Лондона\*, придумал фокус: над сценой парит в воздухе говорящее привидение. Подобные иллюзии потом долгое время использовались в качестве интермедий на представлениях. Зритель входил в плохо освещенный шатер

\* С 1992 года Политехнический институт Центрального Лондона называется Вестминстерским университетом. Прим. пер.

и видел на столе голову человека. Голова произносила слова, но под столом ничего не было. В чем секрет этих фокусов?

**ОТВЕТ** • Призрак Пеппера — отражение актера в установленном на сцене зеркале или большом куске стекла (рис. 6.19а). Сцена освещена тускло, а актер скрыт от глаз публики занавесом и освещен, наоборот, ярко. Зрители смотрят на сцену и видят не актера, а его отражение. Отражающую поверхность они не замечают.

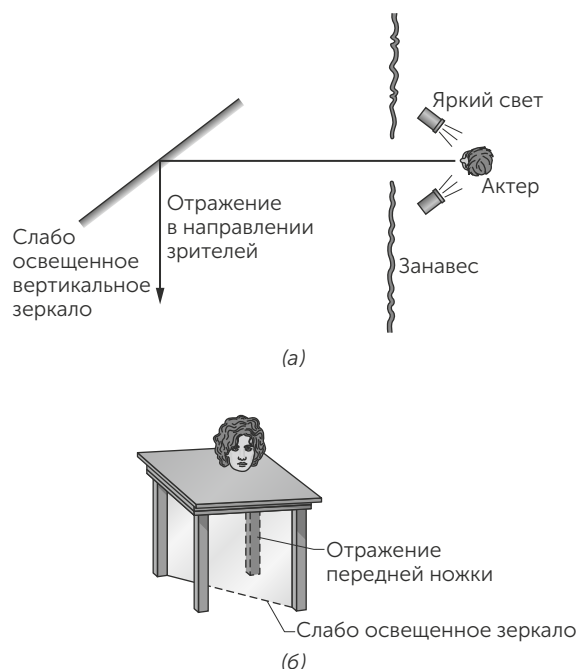


Рис. 6.19 / Задача 6.62. Схема фокусов: призрак Пеппера (а) и голова без тела (б).

Тело говорящей головы спрятано за зеркалом под столом. Если смотреть под стол, видно отраженное изображение его передней ножки, но кажется, что это настоящая задняя ножка стола (рис. 6.19б). Поэтому и создается впечатление, что под столом ничего нет.

### 6.63 • НАКЛОННЫЕ ОКНА В ПУНКТАХ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ

Почему в аэропортах окна диспетчерских башен пунктов управления полетом делают наклонными примерно на  $15^\circ$ , причем их верхний край выступает наружу? Ветровое стекло машины тоже наклонное, но, чтобы улучшить обтекаемость автомобиля, оно наклонено в противоположную сторону. Как наклон стекла влияет на обзор дороги водителем?

**ОТВЕТ** • Если бы окна диспетчерской башни были вертикальными, диспетчеры видели бы в них и свое отражение, и отражение пульта управления. Поскольку ничто не должно мешать их обзору того, что происходит в воздухе и на взлетно-посадочной полосе, наклоненное окно направляет ненужное отражение на черный, поглощающий свет потолок.

Поскольку ветровое стекло автомобиля наклонено внутрь, водитель видит отражение передней панели, которое накладывается на то, что он видит перед собой. Если сама эта панель или что-то на ней выглядит ярко, водитель может не заметить идущую ему навстречу темную машину.

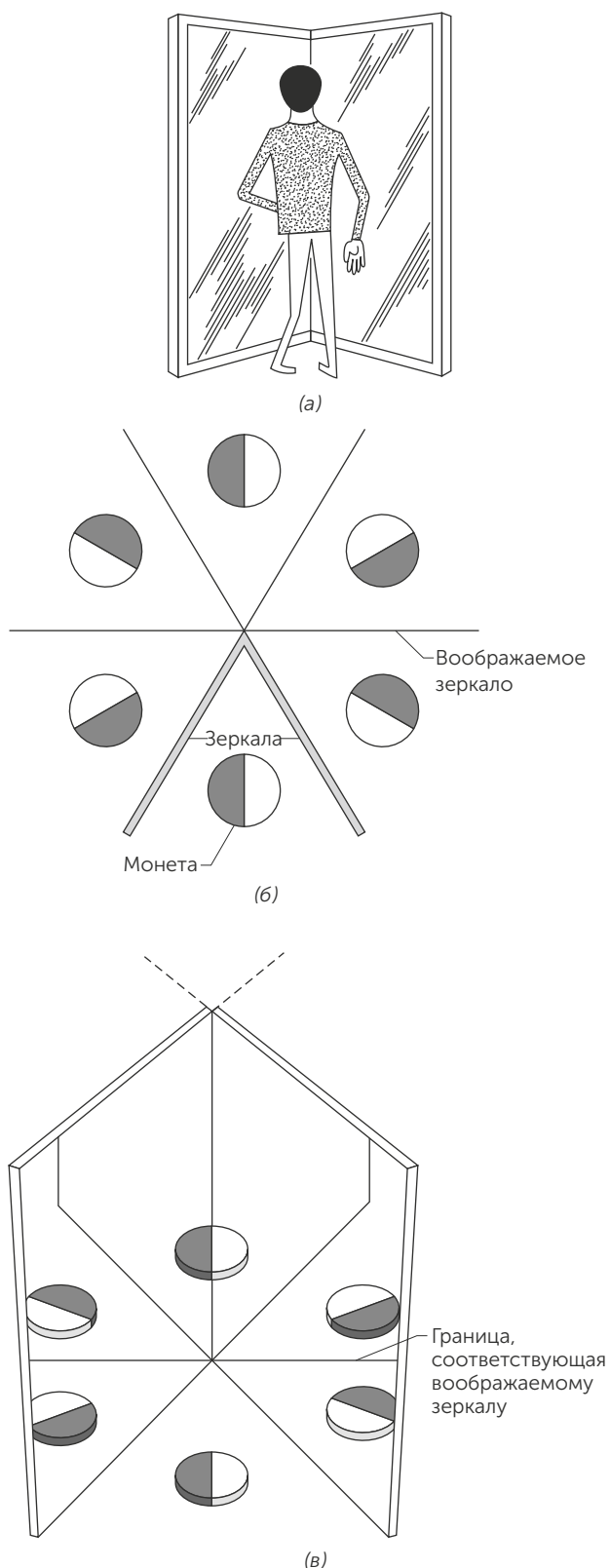
### 6.64 • ОТРАЖЕНИЯ В ДВУХ И ТРЕХ ЗЕРКАЛАХ

Сколько своих отражений вы увидите, если встанете между двумя расположенными под углом друг к другу зеркалами (такие бывают в магазинах одежды, см. рис. 6.20а)? Как число отражений зависит от угла между зеркалами и места, где вы стоите? Сколько получится отражений, если добавить третье зеркало и вы окажетесь внутри треугольника, окруженные со всех сторон зеркалами? Что вы увидите, стоя между двумя параллельными (или почти параллельными) зеркалами и глядя в одно из них?

**ОТВЕТ** • Чтобы определить число ваших отражений в двух зеркалах, расположенных под углом, нарисуйте сначала вид сверху этих зеркал, а затем, двигаясь и по часовой, и против часовой стрелки к обратной стороне зеркал, постройте воображаемые зеркала так, чтобы они, как на рис. 6.20б, образовывали тот же угол, что и истинные зеркала. Каждый новый добавленный сектор содержит добавочное отражение. Затруднение может возникнуть в том случае, если добавленные за истинными зеркалами сектора пересекаются. В зависимости от того, насколько они пересекутся, и от того, где вы стоите между зеркалами, вклад этих секторов может составлять от одного до четырех изображений.

Теперь посчитайте число отражений на рисунке. Именно столько отражений вы увидите в истинных зеркалах (на рис. 6.20в их пять). Кроме того, вы увидите границы между секторами. Это отражения самих зеркал.

Для некоторых углов между зеркалами ответ будет конечен и на единицу меньше того, сколько раз укладывается угол между зеркалами на полном круге. Для прочих углов ответ будет бесконечен.



**Рис. 6.20 / Задача 6.64.** а) Человек, стоящий между двумя зеркалами. б) Схема расположения отражений. в) Отражения, которые вы увидите.

Если добавить третье (реальное) зеркало, замыкающее треугольник, число отражений, в принципе, становится бесконечным: свет, исходящий от вас или от других предметов, оказывается внутри треугольника как в ловушке и отражается от зеркал бесчисленное число раз. На практике число отражений конечно, поскольку поглощение и несовершенства поверхности зеркал постепенно делают отражения менее четкими и яркими, особенно если это недорогие зеркала с отражающими поверхностями позади стекла (у зеркал, применяющихся в физике и технике, этот слой спереди).

Сходная ситуация имеет место, если вы стоите между двумя параллельными зеркалами и смотрите в одно из них. В принципе, вытянув, например, руку параллельно одному из зеркал, вы увидите бесконечное число ее отражений. Однако большое число отражений своей головы можно увидеть, только если одно из зеркал наклонить. Можете объяснить почему?

Забавное устройство состоит из зеркала, расположенного параллельно позади полупрозрачного зеркала, частично пропускающего и частично отражающего падающий на него свет. Между двумя зеркалами помещают небольшие огоньки. Если посмотреть в пространство между зеркалами через полупрозрачное зеркало, можно увидеть множество отражений огоньков, создающих иллюзию, что ряд огней уходит куда-то вдаль от вас. Иногда центр заднего зеркала делают вогнутым, тогда и центр между зеркалами заполнен отражениями огней.

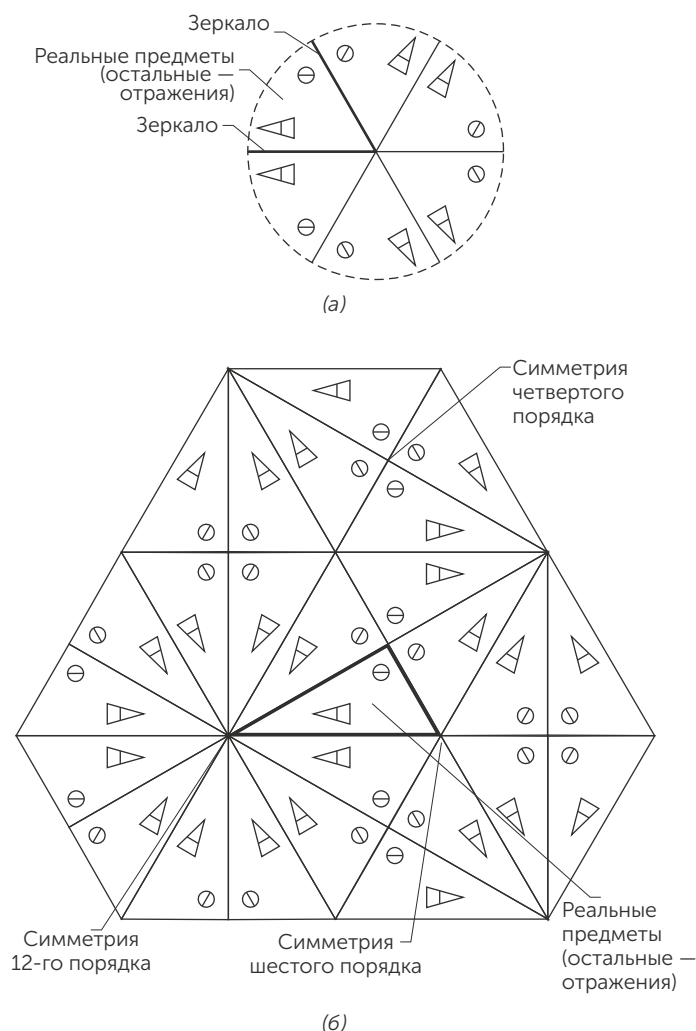
## 6.65 • КАЛЕЙДОСКОПЫ

В обычных недорогих калейдоскопах видны одинаковые дублированные изображения одной и той же группы цветных элементов, расположенные симметрично относительно центральной точки. Как в более дорогих калейдоскопах удастся получить большое количество симметричных изображений, собранных в группы разной симметрии? Каково возможное количество вариантов групп разной симметрии, которые можно реализовать в одном калейдоскопе? Как должны быть расположены зеркала, чтобы картинка не менялась (не сдвигалась) при изменении угла, под которым вы смотрите в калейдоскоп?

Если зеркала скошены так, что размер трубки на одном конце меньше, чем на другом, что будет видно внутри калейдоскопа? Почему в некоторых калейдоскопах видны цветные картинки, когда никакой разноцветной

засыпки на их дальнем конце нет? Какого типа отражения видны в круглой трубке с блестящей внутренней поверхностью?

**ОТВЕТ •** В большинстве недорогих калейдоскопов внутри трубки вдоль всей ее длины идут два зеркала, установленные под углом  $60^\circ$  друг к другу. В этом случае получается пять отраженных изображений, сгруппированных вокруг точки на дальнем конце трубки, где зеркала сходятся (рис. 6.21а). Поскольку видны не только отражения, но и сами цветные элементы, засыпанные между зеркалами, получается узор, обладающий симметрией шестого порядка. Если изменить угол между зеркалами, число отраженных изображений и тип симметрии меняется (см. предыдущую задачу).



**Рис. 6.21 / Задача 6.65.** а) Узор в калейдоскопе с двумя зеркалами. б) Часть образованной отражениями картины в калейдоскопе с тремя зеркалами при углах  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $30^\circ$ .

В более сложных калейдоскопах имеются три или четыре зеркала. (Часто отражающее покрытие наносится только на переднюю часть каждого из зеркал. Если такое покрытие нанести с двух сторон, свет отражается от обеих сторон стекла. В этом случае отражения, слегка смещенные друг относительно друга, дают нечеткую картину.) При трех или четырех зеркалах на дальнем конце калейдоскопа видно большое количество различных узоров. Если три зеркала образуют равносторонний треугольник, отраженные изображения образуют группы, обладающие симметрией шестого порядка. Если треугольник из зеркал не равносторонний, возможны узоры, обладающие симметрией двух или трех разных порядков (см. рис. 6.21б).

Обычно изменение угла зрения сдвигает узор в калейдоскопе. Только четыре перечисленных ниже способа расположения зеркал являются исключениями: 1) если в калейдоскопе четыре зеркала, на освещенном окошке они должны образовывать прямоугольник или квадрат. Если зеркал три, то они должны образовывать: 2) равносторонний треугольник; 3) прямоугольный треугольник с углами  $60^\circ$  и  $30^\circ$  или 4) равнобедренный прямоугольный треугольник с двумя углами по  $45^\circ$ .

Если посмотреть внутрь калейдоскопа со скошенными зеркалами через широкий конец, будет видна сфера, покрытая отраженными изображениями, которая кажется плавающей в пустом пространстве. Если же посмотреть в суженный конец, кажется, что вы попали внутрь такой сферы.

Цветную картинку можно увидеть в калейдоскопе, засыпав туда бесцветные пластиковые кусочки и зажав их между двумя поляризационными фильтрами.

Если посмотреть на точечный источник света через круглую трубку с блестящей внутренней поверхностью, будет виден ряд узких колец.

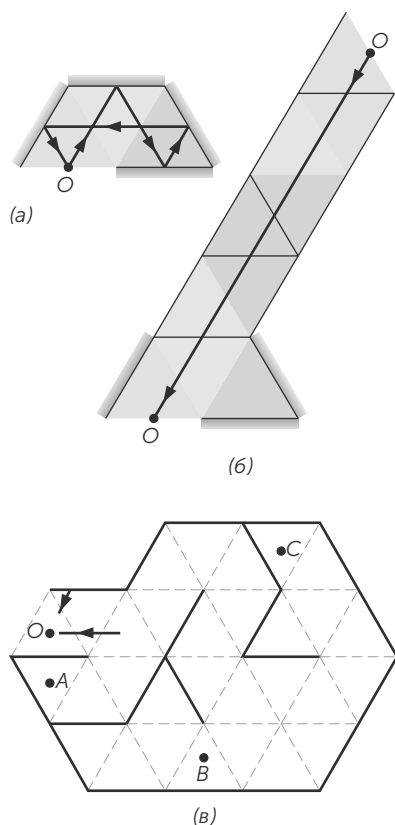
## 6.66 • ЗЕРКАЛЬНЫЕ ЛАБИРИНТЫ

В швейцарском Люцерне я однажды попал в знаменитый «Зал зеркал» — лабиринт из сложной системы зеркал, где я очень быстро потерялся. Пол зала разбит на равносторонние треугольники. По некоторым сторонам некоторых треугольников установлены зеркала в полный рост. Когда стоишь внутри любого такого треугольника, кажется, что видишь шесть расходящихся от тебя коридоров и беспорядочно перепутанные отраженные изображения между коридорами. Как возникают эти иллюзорные коридоры? Что находится



в конце коридора? Может ли человек спрятаться в зеркальном лабиринте, или из любого места видно все, что происходит внутри него?

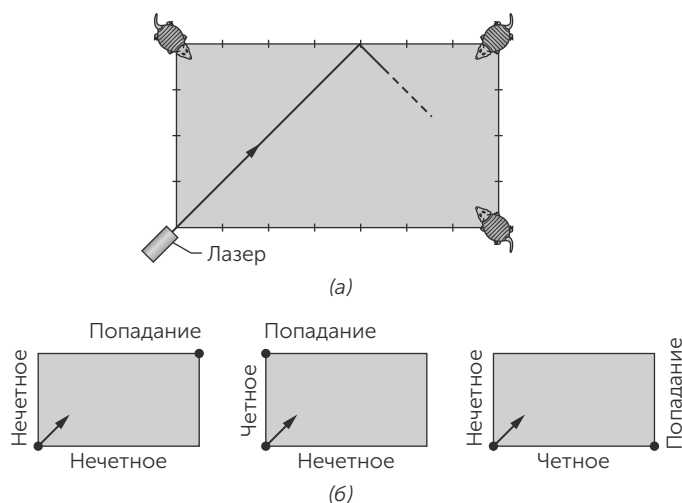
**ОТВЕТ** • Коридоры в «Зале зеркал» образуют лучи света, отраженные от зеркал под углами  $60^\circ$ . На рис. 6.22а изображен простой вариант такого лабиринта. Предположим, вы стоите в точке О. Уходящий от вас луч света четыре раза отражается внутри лабиринта, а затем возвращается к вам. Если смотреть в направлении возвращающегося луча, вы увидите уходящий от вас вдаль коридор (рис. 6.22б), и, поскольку луч света исходил от вас, в конце его вы увидите свое отражение. Спрятаться в таком простом лабиринте невозможно: каждая треугольная область на полу по крайней мере один раз видна в этом воображаемом коридоре. Если же лабиринт более сложный, попытаться спрятаться можно. Подумайте, видны ли из точки О в коридорах лабиринта, изображенного на рис. 6.22в, точки А, В и С?



**Рис. 6.22 / Задача 6.66.** а) Вид сверху на простой «Зал зеркал». Исходящий из точки О луч света возвращается к вам после отражений. б) Коридор, который вы видите. в) Пол «Зала зеркал» большего размера разделен на треугольники. Жирные линии изображают зеркала.

## 6.67 • САЙД-ШОУ «СТРЕЛЬБА ПО МИШЕНИ ИЗ ЛАЗЕРА»

На ярмарке, прогуливаясь и глядя на разные сайд-шоу\*, кроме привычных игр на сообразительность, ловкость и удачу, можно заметить новый аттракцион, который называется «Стрельба по мишеням из лазера». Заинтригованный,ходишь внутрь и обнаруживаешь себя в углу прямоугольной комнаты, стены которой покрыты идеально отражающими зеркалами (рис. 6.23а). Там, где вы стоите, расположен закрепленный горизонтально и ориентированный под углом  $45^\circ$  к стенам мощный лазер. В остальных углах находятся мишени — самодовольно ухмыляющиеся глиняные броненосцы.



**Рис. 6.23 / Задача 6.67.** а) Вид сверху на комнату с зеркалами. б) Определение угла, куда попадает выстрел.

За спиной у вас стоит служащий, который объясняет, что вы должны выстрелить из лазера, но сначала надо угадать, попадете ли вы в мишень и, если попадете, то в какую именно. Он также сообщает, что длина комнаты составляет 7 условных единиц (у. е.), а ширина — 4 у. е. и что эти размеры указаны с большой точностью. Затем служащий неожиданно выходит. У вас возникает опасение, что при выстреле вы можете попасть в себя самого.

Удастся вам поразить какую-то из глиняных мишеней, или свет будет отражаться от стен комнаты до тех пор, пока слабое поглощение, имеющее место при каждом отражении, наконец не погасит его? Что произойдет, если длина и ширина комнаты будут составлять, соответственно, не 7 и 4, а 7 и 3 у. е. или

\* Сайд-шоу (от английского sideshow) — дополнительные развлечения во время цирковых представлений, на карнавалах, ярмарках и т. д. Прим. пер.

8 и 3 у. е.? Храбро нажимая на курок лазерного ружья, попытайтесь определить, куда, многократно отразившись, попадет луч лазера после вашего выстрела.

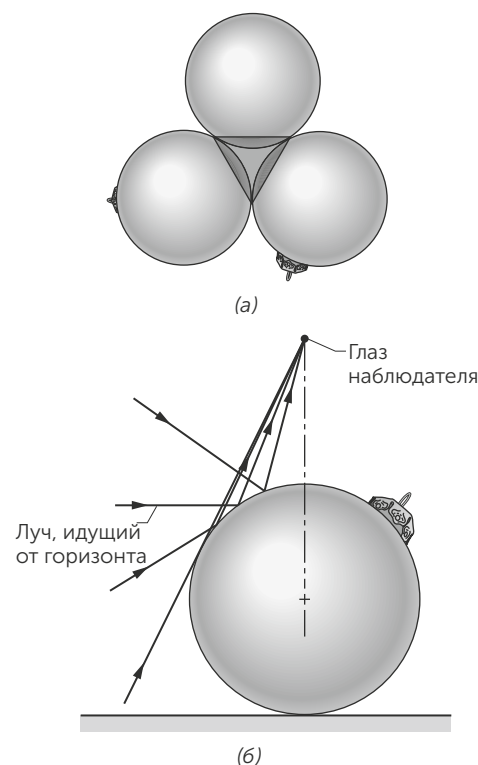
**ОТВЕТ** • Если и длина, и ширина комнаты равны целому числу условных единиц, вы наверняка поразите глиняную мишень, а не себя. Чтобы определить, какую именно, можно проследить путь луча, набросав план комнаты, или воспользоваться правилом, которое иллюстрирует рис. 6.23б. Постройте дробь, равную отношению длины комнаты к ее ширине; если эту дробь можно сократить (например, сократив  $8/4$ , получим  $2/1$ ), сделайте это, а затем, чтобы определить мишень, сравните ее с рис. 6.23б, где слова «четное» и «нечетное» надо сопоставить с числителем и знаменателем дроби, полученной после сокращения.

### 6.68 • ТЕМНЫЕ ТРЕУГОЛЬНИКИ МЕЖДУ ЕЛОЧНЫМИ ШАРАМИ

На лист черной бумаги положите в один слой вплотную друг к другу несколько блестящих елочных шаров. Если позади вас есть яркий источник света, то, посмотрев на шары сверху, вы увидите свои деформированные отражения. С удивлением вы обнаружите, что шары выглядят шестигранниками, а между каждой группой из трех соседствующих друг с другом шаров видны темные треугольники (рис. 6.24а). Если вы укажете пальцем на один из шаров, ваши отражения в других шарах укажут на тот же самый шар. Вы можете объяснить, почему так происходит? Отражения лучше видны, если взять большие отражающие сферы, которые используют для украшения сада.

**ОТВЕТ** • Предположим, один отражающий шар лежит на большой плоской поверхности, например на полу. Когда вы смотрите вниз на шар, вы видите свое искривленное изображение и практически все вокруг себя. Горизонт вы увидите в том месте шара, откуда отразился вам в глаз луч, пришедший на шар горизонтально (рис. 6.24б). Горизонт находится выше экватора шара. Пол можно увидеть между горизонтом и экватором.

Если два отражающих шара поместить вплотную друг к другу, каждый из них отражает свет так, как показано на рис. 6.24б, но теперь лучи из-под горизонта могут несколько раз отразиться, прежде чем достигнут наблюдателя, смотрящего на шары сверху. Поскольку в каждом месте, где происходит отражение, свет частично поглощается, эти лучи создают менее яркие изображения.



**Рис. 6.24 / Задача 6.68.** а) Темный треугольник среди отражающих шаров. б) Отражение от шара лучей света в направлении наблюдателя.

Когда группа состоит из трех шаров, совокупность отраженных изображений еще сложнее. Благодаря многократным отражениям ниже горизонта она включает в себя большое число темных изображений. Горизонту каждого шара приближенно соответствует прямая линия, а три прямые линии, соответствующие трем шарам, образуют треугольник. Из-за многократных отражений изображения внутри этого треугольника темные. Вероятно, шары не позволяют свету от источника попасть в не занятое шарами место на полу, поэтому пол внутри треугольника будет казаться наблюдателю темным и без учета отражений.

Чтобы понять, почему все отражения вашего пальца указывают на один и тот же шар, рассмотрим отражение в одном плоском зеркале пальца, указывающего вправо. Палец и его отражение указывают на одну и ту же точку справа. Не учитывая того, что теперь отражающая поверхность будет искривленной, тот же результат получится, если плоское зеркало заменить отражающим шаром. Любой другой отражающий шар из лежащих перед вами тоже будет давать изображение, указывающее в направлении вашего пальца.

### 6.69 • КАК БЛЕСТЯЩЕЕ СТАНОВИТСЯ ЧЕРНЫМ, А БЕЛОЕ — ЧЕРНЕЕ ЧЕРНОГО

Двусторонние лезвия обычно блестят. Однако если сложить вместе много лезвий и плотно сжать, боковая сторона этой стопки (та, куда выходят заостренные края лезвий) будет темной. Как блестящая поверхность становится темной?

Очевидно, что черная картонка темнее белой. Можно ли сделать так, чтобы при освещении одной и той же лампой белая картонка выглядела темнее черной картонки?

**ОТВЕТ** • Когда луч света попадает в пространство между заостренными скошенными концами соседних лезвий, прежде чем покинуть его, он несколько раз отражается от скошенных поверхностей (рис. 6.25). При каждом отражении поглощается около 45% падающего света. Поэтому, когда свет наконец доходит до наблюдателя, его интенсивность составляет только несколько процентов от интенсивности падающего света, что объясняет, почему боковая поверхность стопки кажется темной.

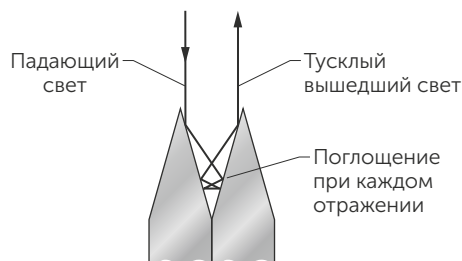


Рис. 6.25 / Задача 6.69. Луч света, отражающийся между скошенными концами лезвий соседних бритв.

Чтобы белый картон выглядел темнее, чем черный картон, сделаем из белого картона коробку, а ее внешнюю поверхность покрасим матовой черной краской. Теперь в одной из боковин коробки сделаем дырочку диаметром не больше 10% длины этой стороны коробки. Направим лампу на бок коробки с дырочкой. Попав через дырочку в коробку, свет там многократно рассеивается. При каждом рассеянии белый картон поглощает только небольшую толику света, но поскольку он рассеивается многократно, вышедший из дырочки свет оказывается достаточно тусклым.

С другой стороны, свет, падающий на окрашенную внешнюю поверхность коробки, поглощается краской, но поскольку он рассеивается только один раз, вы видите, что от внешней поверхности исходит более яркий свет, чем из дырочки. Таким образом, дырочка может оказаться темнее (более черной), чем черный картон.

### 6.70 • СВЕТООТРАЖАТЕЛИ

Светоотражатель (катафот, или ретрорефлектор) — устройство, отражающее падающий свет вне зависимости от угла падения строго в направлении источника. Плоские крошечных светоотражателей обычно нашивают на одежду любители бегать ночью: так их лучше видно. Когда сноп света от фар машины попадает на светоотражатель, он отражается обратно в направлении водителя, тот заранее видит бегуна и может его объехать. Почему же, если вы смотрите на пластинку из светоотражателя с небольшого расстояния, вы не увидите ни зеркального, ни даже искаженного отражения своего лица?

Чтобы в темноте даже при плохом освещении или на мокрой дороге видеть разметку, на дороге иногда укрепляют светоотражатели. Светоотражатели используют и на многих дорожных знаках, чтобы они были лучше видны ночью. Глядя из окна самолета, иногда можно и днем понять, где установлены светоотражатели. Когда самолет летит низко, присмотритесь к тени самолета. Рядом с ней иногда можно заметить короткие яркие вспышки. Это солнечный свет отражается от светоотражателей на дорожных знаках обратно в направлении солнца. (Может быть, вдали от места, куда падает тень самолета, вы тоже заметите вспышки света, но они обусловлены зеркальным отражением солнечного света от металлических или стеклянных поверхностей, а возможно, и от поверхности водоема.)

Пластины из светоотражателей обладают удивительным свойством: они убирают искажения световых лучей. Например, попробуем показать слайд-фильм на экране из светоотражателя, поставив между экраном и проектором слой гофрированного пластика, искажающего изображение. Свет, отразившись от светоотражателя, опять проходит через пластик и попадет на проектор. При этом искажения, связанные с первым прохождением через пластик, практически убираются, и изображение совсем не деформировано.

Как работает светоотражатель и каким образом он снимает искажения?

**ОТВЕТ** • Светоотражатели бывают двух типов: сферические и уголкового. Световой луч, прошедший внутрь сферы, преломляется, доходит до противоположной внутренней поверхности сферы и отражается из нее. Затем луч света еще раз преломляется, покидает сферу и уходит обратно в направлении источника света. Когда луч попадает в угол, образованный перпендикулярными плоскостями, он дважды или трижды отражается от внутренних

поверхностей, а затем уходит обратно в направлении источника. В идеальных светотражателях обоих типов отраженный свет возвращается точно к источнику. Светотражатель, закрепленный на спине любителя бега трусцой, неидеален. Поэтому отраженный от него свет слегка рассеивается, но все же водитель машины его видит.

Если держать пластинку из светотражателей напротив своего лица, отражения в ней вы не увидите. Дело в том, что в этом случае до глаз доходят только те лучи, которые от них же исходили. Лучи, исходившие от носа, вернутся к носу, но носом вы их не увидите.

Совокупность светотражателей устраняет искажения изображения, поскольку на обратном пути к источнику лучи света проходят именно те области, где произошло их искажение на пути к такому зеркалу. Например, если падающий луч отклоняется влево, отклонение отраженного луча поменяется на обратное, то есть он отклонится вправо. Поэтому луч, возвращающийся к источнику, параллелен испущенному источником лучу. Такое «снятие» искажений происходит даже в том случае, когда эти искажения обусловлены турбулентностью пламени. Дело в том, что свет возвращается к месту, где горит огонь, быстрее, чем пламя меняется в результате турбулентности.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 6.71 • КАК В ТЕМНОТЕ ПРИЗЕМЛИТЬСЯ В ТЫЛУ ВРАГА

Во время Второй мировой войны британское отделение Управления стратегических служб США\* столкнулось со сложной задачей: маленьким самолетам необходимо было приземляться в тылу врага ночью, в полной темноте. Чтобы сделать это незаметно, расчищали небольшой участок земли, служивший короткой взлетно-посадочной полосой, а ее границы отмечали небольшими светотражателями. Эти светотражатели представляли собой три зеркала, подогнанные друг к другу так, чтобы образовался угол куба. «Летчики надевали на лоб фонарик, и, хотя его свет был таким слабым, что с земли его заметить было трудно, отраженного от зеркал света было достаточно, чтобы летчик видел контуры взлетной полосы». (Письмо, Г.Б. Клэй, 1986 г.)

\* Управление стратегических служб — первая объединенная разведывательная служба США, созданная во время Второй мировой войны. После войны на ее основе было создано ЦРУ. *Прим. пер.*

## 6.72 • ОДНОСТОРОННЕЕ ЗЕРКАЛО

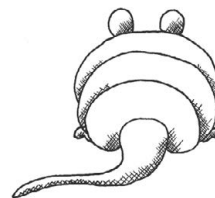
Как зеркало может пропускать свет только в одном направлении?

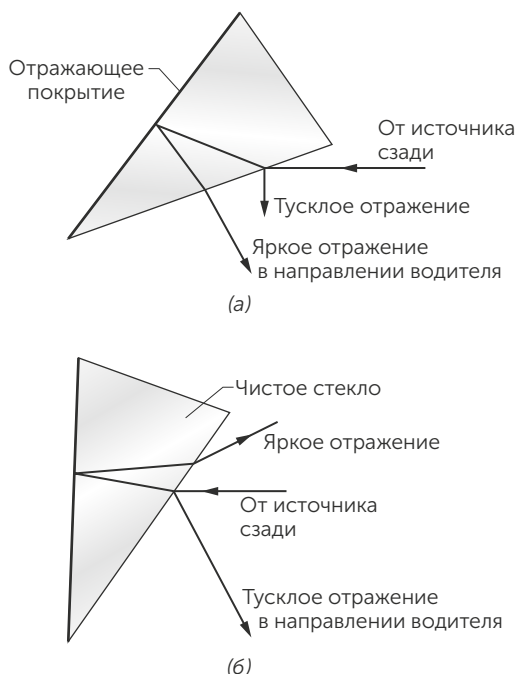
**ОТВЕТ** • Одностороннее зеркало — это обычное зеркало, у которого просто нет задника (им, например, может служить лист картона). С какой бы стороны ни падал на поверхность такого зеркала свет, он почти весь отражается, а небольшая часть проходит стекло насквозь. Иллюзия прохождения света только в одну сторону достигается за счет того, что комната с одной стороны от зеркала светлая, а с другой ее стороны она освещена слабо. В хорошо освещенной комнате отражение от зеркала настолько яркое, что маскирует слабый свет, прошедший через зеркало из полутемной комнаты. В темной комнате ее отражение в таком зеркале слишком тусклое, и его не видно на фоне яркого света, прошедшего через зеркало со стороны освещенной комнаты. Ночью из хорошо освещенной комнаты плохо видно, что происходит на улице, — из-за отражения от стекол света, падающего на них из комнаты. Но если потушить свет в комнате, улица делается виднее.

## 6.73 • ЗЕРКАЛО ЗАДНЕГО ВИДА

Как, поворачивая зеркало заднего вида, водитель изменяет яркость изображения?

**ОТВЕТ** • Зеркало заднего вида представляет собой клин из стекла с отражающим покрытием на стороне, противоположной относительно водителя. Днем зеркало ориентируют так, чтобы идущий сзади свет попадал внутрь клина и отражался от этого покрытия в направлении водителя, что позволяет ему видеть яркое отражение того, что происходит позади машины (рис. 6.26а). Меняя положение зеркала для поездки ночью, водитель так разворачивает основание клина по направлению к задней части машины, чтобы отраженные от зеркальной поверхности лучи уходили в потолок машины, а в его поле зрения попадал свет, отраженный от переднего края клина (рис. 6.26б). Хотя изображение, получающееся при отражении от этой поверхности, тусклое, привыкшие к темноте глаза водителя различают его хорошо.



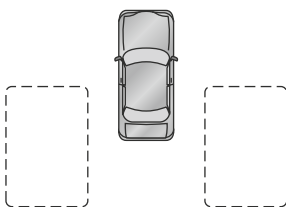


**Рис. 6.26 / Задача 6.73.** В зеркале заднего вида для дневного обзора используется яркое отражение от его дальней зеркальной поверхности (а); а ночью для обзора достаточно тусклого отражения от ближней к водителю слабо отражающей поверхности зеркала (б).

#### 6.74 • ЗЕРКАЛО БОКОВОГО ОБЗОРА

Это зеркало дает возможность водителю видеть машину, идущую за ним по соседней полосе. Однако при использовании плоского зеркала остается *слепое пятно* — область, где не видна машина, подъехавшая сзади слишком близко (рис. 6.27). Это опасно: водитель может начать перестраиваться, не зная, что рядом едет другая машина. Чтобы уменьшить размер слепого пятна, зеркало должно находиться около водителя или ближе к переднему краю автомобиля?

**ОТВЕТ •** Зеркало надо установить вблизи переднего края машины. Тогда идущая за вами машина будет видна в зеркале до тех пор, пока ее нос не попадет в область вашего периферического зрения. При обычной установке зеркала рядом с водителем маленькие медленнодвигающиеся автомобили могут исчезать из виду на несколько секунд.



**Рис. 6.27 / Задача 6.74.** Слепое пятно в зеркале бокового обзора (схематическое изображение). Обычно с разных сторон машины слепые пятна разные.

#### 6.75 • БАР В «ФОЛИ-БЕРЖЕР»

Картина Эдуарда Мане «Бар в „Фоли-Бержер“», написанная в 1882 году, неизменно притягивает к себе зрителей. На рис. 6.28 она воспроизведена схематически. На переднем плане девушка-барменша за стойкой, ее глаза выдают усталость. Сзади большое зеркало. В нем отражаются сама девушка, посетитель, батарея бутылок на стойке и заполнившая бар публика. Мане несколько деформировал реальность, что придало картине дополнительное очарование. Взглянув на нее, испытываешь некий суеверный страх и не сразу сообразишь, что «неправильно». Вы видите «ошибки» художника?

**ОТВЕТ •** Формы отраженных в зеркале изображений правильные, но расположены изображения неправильно. Это чувствуется уже при первом взгляде на картину, еще до того, как понимаешь, в чем дело. Настоящие бутылки слева на картине стоят ближе к барменше, а на отражении они на дальнем от нее краю стойки. Отражение девушки должно быть позади нее, а не сдвинуто, причем достаточно далеко, вправо. И самое странное: девушка смотрит прямо на вас, но в зеркале вы видите стоящего перед ней мужчину. Выходит, что именно вы и есть тот мужчина. Но даже если это так, ваше отражение не должно быть сдвинуто еще дальше вправо, как это нарисовано на картине. На самом деле фигура женщины заслонила бы от вас ваше отражение.



**Рис. 6.28 / Задача 6.75.** Схематическое изображение картины Эдуарда Мане «Бар в „Фоли-Бержер“».



## 6.76 • КАРТИНЫ ЭПОХИ ВОЗРОЖДЕНИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ ПРОЕКТОРЫ

Некоторые современные художники и историки искусства утверждают, что художники эпохи Возрождения (XV–XVI века) использовали кривые зеркала, проецируя с их помощью модель на холст. Если это правда, художникам оставалось лишь обвести изображение на холсте по контуру, а потом раскрасить его. Чем-то это напоминает раскраски «Соедини по точкам». Есть ли основания полагать, что такая техника действительно была распространена?

**ОТВЕТ •** Фотографический реализм некоторых полотен эпохи Возрождения, как, например, картины Лоренцо Лотто «Семейный портрет», заставляет предположить, что при написании этого двойного портрета художник использовал вогнутое зеркало. Он должен был поместить это зеркало перед позирующей парой, чуть сдвинув его в сторону, а мольберт поставить напротив зеркала. Затем зеркало надо было повернуть так, чтобы зеркальное отражение всей сцены попало на холст. Обычно художнику непросто выбрать перспективу правильно, чтобы зритель мог увидеть не плоскую картинку, а реалистичное трехмерное изображение. Однако если художник проецирует натуру на холст, а затем обводит контур полученного изображения, перспектива получается правильной автоматически.

Анализ показывает, что на самом деле при изображении удаленных трехмерных объектов художники допускали много ошибок. И это сильный аргумент против того, что они использовали зеркала или какие-то другие оптические устройства. Например, две параллельные линии, уходящие вдаль от художника, должны сходиться в одной точке, которую называют *точкой схода*. Художник, старающийся добиться реалистичности изображения, должен определить эту точку и относительно нее рисовать все уходящие вдаль линии. Однако в разных местах на исследованных картинах линии в перспективе сходились к разным точкам схода. Это позволяет предположить, что художник писал картину без использования зеркал.

## 6.77 • АНАМОРФОЗ В ИСКУССТВЕ

С XV по XVIII век художники иногда преднамеренно искажали изображение на картинах, так что поначалу нельзя было догадаться, что именно нарисовано. Иногда таким способом они прятали критику в адрес королей. Некая, поначалу ничего не говорящая форма

могла сложиться в понятный образ только при рассмотрении картины под определенным углом. В других случаях, чтобы восстановить зашифрованное изображение, надо было посмотреть на его отражение в блестящем конусе или цилиндре, поместив его в центр картины. Почему эти предметы становятся узнаваемы, только если смотреть на них таким странным способом?

**ОТВЕТ •** Если просто смотреть на анаморфные картины, фигуры и предметы на них создают на сетчатке глаза слишком искаженные и потому неузнаваемые изображения. Однако если посмотреть на картину так, как задумал художник, изображение на сетчатке достаточно близко отображает предмет, и его легко узнать.

Предположим, что художник нарисовал кошачью мордочку так, как он ее увидел бы отраженной в блестящем конусе, помещенном в центр холста. Если конус убрать, из-за искаженной перспективы мордочка становится неузнаваемой: глаза далеко разнесены, подбородок широкий и изогнутый вокруг центра рисунка, а все вместе никак не напоминает кошку. Но если вернуть конус на место и посмотреть на отражение рисунка в нем, искажение устраняется и в изображении на сетчатке глаза легко узнать кошку. Часто в качестве примера анаморфоза в искусстве приводят картину Ганса Гольбейна Младшего «Послы», которую надо рассматривать под малым углом, чтобы увидеть все, что на ней изображено.

## 6.78 • ГДЕ ПОД УЛИЧНЫМИ ФОНАРЯМИ СВЕТЛЕЕ

Когда зажигают два одинаковых уличных фонаря (открытых, создающих световой смог\*), где на тротуаре между ними будет самое яркое, а где — самое темное место? Если горит много стоящих вдоль прямой линии на равном расстоянии друг от друга фонарей, где вдоль этого ряда будут точки максимальной и минимальной освещенности? Можно ли как-то по-другому расставить фонари в ряд, чтобы увеличить освещенность самых темных мест?

**ОТВЕТ •** Предположим, что горят только два фонаря. Тогда минимальная интенсивность освещения будет строго посередине между ними, а максимальная интенсивность будет в точках, расположенных на некотором расстоянии от основания фонарей. Это расстояние

\* Световой смог — засвечивание ночного неба искусственными источниками освещения, свет которых рассеивается в нижних слоях атмосферы. *Прим. пер.*

зависит от их высоты и интервала между ними. Если зажглось много фонарей, стоящих в ряд на одинаковом расстоянии друг от друга, то опять точки посередине между фонарями будут освещены хуже всего, но точки максимальной освещенности теперь будут находиться у основания фонарей. Пусть  $D$  — расстояние между равноудаленными фонарями. Чтобы увеличить яркость в самых темных точках, надо расставить фонари парами, причем расстояние между фонарями внутри пары должно равняться  $D/2$ , а расстояние между центрами пар —  $2D$ . Этим способом можно подобрать расстояние между фонарями так, чтобы освещенность вдоль всего ряда изменялась минимально.

### 6.79 • МНОГОКРАТНЫЕ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ОКОН С ДВОЙНЫМИ СТЕКЛАМИ

Когда смотришь ночью на источник света через окно с двойными стеклами, видишь его повторенным много раз. Если такое окно стоит в диспетчерском пункте аэропорта, эти дополнительные изображения могут привести к опасной ситуации, если диспетчер примет их за самолеты. В чем причина появления дополнительных изображений и как расстояние между ними зависит от угла падения света на стекло? Зависит ли это расстояние от погодных условий?

Аналогичные многократные изображения можно видеть ночью, когда смотришь из окна самолета на огни взлетно-посадочной полосы. Если вы уже взлетели, зажгите лампу над креслом и поднимите блестящий предмет так, чтобы свет от лампы освещал его. В окне вы увидите несколько отражений этого предмета. За счет чего появляются эти дополнительные отражения?

**ОТВЕТ** • Когда смотришь на источник света через двойное стекло, его первичное изображение обусловлено светом, прошедшим прямо к наблюдателю через оба стекла (рис. 6.29). Второе, более туманное изображение связано либо с отражением света между оконными стеклами, либо даже с его отражением от двух поверхностей одного стекла. Хотя изображения, появляющиеся из-за отражения от поверхностей одного стекла, расположены ближе и увидеть их отдельно труднее. Самое яркое из изображений появляется, когда, прежде чем достичь наблюдателя, свет сначала отражается от внутреннего стекла, а затем от внешнего. Другие изображения — результат еще большего числа отражений. Подобные изображения увидеть

легче, если они расположены на достаточно большом расстоянии друг от друга, для чего свет от источника должен косо падать на окно.

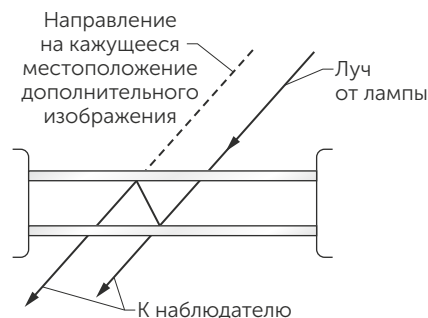


Рис. 6.29 / Задача 6.79. Прохождение светового луча через окно с двойными стеклами.

Иногда разница между давлением воздуха снаружи и между стеклами приводит либо к выпучиванию стекол, либо к втягиванию их внутрь. Кривизна стекол увеличивает расстояние между изображениями. Если окна с двойными стеклами стоят в диспетчерском пункте аэропорта, эту проблему решает уравнивание давления снаружи и между стеклами. Например, в каждом из стекол делают небольшое отверстие.

Окна самолета состоят из трех стекол, и поэтому в них можно увидеть дополнительные изображения. Если смотреть в окно самолета под углом, видно большое число изображений, являющихся результатом многократных отражений света. Когда самолет летит высоко, внешнее давление гораздо ниже атмосферного, и кривизна окна может до неузнаваемости исказить эти отраженные изображения.

### 6.80 • САМЫЙ МОЩНЫЙ ПРОЖЕКТОР В МИРЕ

В 1965 году в газетной статье, где говорилось о том, как иногда желаемое пытаются выдать за научные факты, Реджинальд Виктор Джонс упомянул двух английских портовых рабочих, предложивших способ, который, с их точки зрения, позволил бы значительно увеличить яркость прожектора. Они рассуждали так: возьмем угольную дугу, испускающую свет. Сфокусируем ее изображение с помощью эллиптического зеркала, а затем используем второе зеркало, чтобы собрать в фокусе еще одно изображение угольной дуги, затем третьим зеркалом сфокусируем следующее изображение и т. д. Прделав это много раз, с помощью последнего зеркала сфокусируем изображение обратно на угольную дугу, что сделает ее гораздо ярче. Повторяем эту

процедуру много раз, а затем, когда потребуется, убираем одно из зеркал и направляем луч прожектора в нужном направлении. Они полагали, что такой луч будет необыкновенно ярким. В чем была их ошибка?

**ОТВЕТ** • Согласно Джонсу, когда рабочие представили свой план британским официальным лицам, они получили ответ, в котором было сказано, что их план неосуществим, поскольку он нарушает второй закон термодинамики (в этот закон входит величина, называемая *энтропией*). Рабочие спорить не стали. Они сразу извинились, сказав, что не знали, что нарушают какие-то «официальные предписания».

Конечно, если процесс начинается при заданном значении энергии, повысить ее нельзя, не привнося в систему дополнительную энергию. Поэтому многократные отражения могут привести к концентрации светового пучка (и то лишь до определенной степени), но не повысить его энергию.

### 6.81 • ЛУЧ СМЕРТИ АРХИМЕДА

Историки давно спорят, удалось ли Архимеду во время осады Сиракуз римским флотом в 212 году до н. э. организовать защиту города, используя большие зеркала. Согласно легенде, Архимед расположил на берегу зеркала так, что все они одновременно направляли солнечные лучи на борт римского корабля и поджигали его. В результате много кораблей сгорело и утонуло, и врагу пришлось отступить. Совершил ли Архимед приписываемый ему подвиг?

**ОТВЕТ** • Действительно, с помощью системы плоских зеркал или одного искривленного зеркала, фокусирующего свет, поджечь дерево можно. Однако весьма маловероятно, что Архимед использовал подобный прием. Более привычное оружие, которое было в ходу в те времена, справилось бы с защитой города лучше, поскольку при использовании зеркал возникает несколько проблем.

Одна из них связана с фокусировкой. Чтобы падающий на дерево свет был достаточно интенсивным, пятно фокусировки должно быть небольшим. Одно плоское зеркало с этим не справится. (И слава богу! Ведь в противном случае любое неаккуратное использование на солнце зеркальца, скажем, в пудренице, могло бы привести к пожару.) Интенсивность сфокусированного света будет больше, если использовать несколько плоских зеркал, установив их так, чтобы они

образовывали почти параболическую поверхность. Однако, чтобы поджечь корабль, необходимо подобрать правильное фокусное расстояние, которое зависит от расстояния до корабля. В условиях битвы сделать это не представляется возможным, но это можно сделать заранее, а потом подпустить корабли противника на оптимальное расстояние.

Вторая проблема — это время, которое требуется, чтобы сфокусированный свет поджиг корабль. Поскольку в момент атаки корабль движется и раскачивается на волнах, практически невозможно удерживать сфокусированные световые лучи в одном и том же месте на его поверхности в течение времени, необходимым для возгорания дерева. А поскольку борта кораблей, вероятнее всего, еще и мокрые, задача, стоявшая перед Архимедом, кажется неразрешимой. Однако эксперимент, сделанный в 1973 году греческим исследователем Ионисом Саккасом, показал реальность такого эффекта.

В 1993 году русские развернули на орбите пластиковое зеркало диаметром 22 м, чтобы выяснить, можно ли долгой полярной ночью освещать северные территории, используя отраженный солнечный свет. Во время эксперимента запущенный зеркалом тусклый «солнечный зайчик» пронесся по Европе. Несколько наблюдателей видели свет, хотя в ту ночь небо было затянуто облаками.

### КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

#### 6.82 • ИСПЕПЕЛЯЮЩИЕ СТРАСТИ

В коротком рассказе писателя-фантаста Артура Кларка «Солнечный удар» действие происходит во время футбольного матча. На трибунах сто тысяч человек болельщиков. Половина из них военные, их отпустили в увольнение и раздали памятные программки в блестящей серебристой обложке.

Зрители с нетерпением ждали этой игры, поскольку это матч-реванш: в прошлом году гости подкупили главного судью, и команда хозяев проиграла. На самом деле, хозяева тоже дали судье взятку, но, видно, не такую большую.

Поскольку по правилам судью выбирает команда гостей, они снова выбрали того же арбитра. Публика с напряжением следит за тем, насколько честным будет судейство на этот раз. Поначалу все решения арбитра не вызывают вопросов, но после того, как гости забивают гол, судья не засчитывает

ответный гол команды хозяев. Он фиксирует нарушение правил и назначает штрафной удар в пользу команды гостей, который те с успехом реализуют. Итак, хозяева встречи проигрывают два очка, и их болельщики негодуют.

Однако вскоре у болельщиков появляется надежда: их команда самоотверженно атакует и забивает гол. Гол настолько очевидный, что судья не может его не засчитать. Вскоре после этого один из игроков команды хозяев, обойдя несколько защитников, посылает мяч в ворота и сравнивает счет. Зрители вскакивают с мест, поддерживая свою команду. Но внезапно рев трибун пронзает свисток судьи. Гол не засчитан, поскольку футболист якобы сыграл рукой.

Часть разъяренных болельщиков команды хозяев пытаются выбежать на поле, но дисциплинированных военных среди них нет. Вскоре порядок восстановлен и команды отходят к скамейкам запасных. Посреди поля стоит один судья. Вдруг раздается сигнал трубы, и военные, поднявшись как по команде, своими блестящими программами направляют на судью солнечных зайчиков. Ярko вспыхнув, судья превращается в дымящийся факел.

В некоторых странах к футболу относятся весьма серьезно.

### 6.83 • ПРИЗРАЧНЫЕ ОГНИ НА КЛАДБИЩЕ

На старом кладбище небольшого городка Силвер-Сити в Колорадо иногда собираются приезжие, чтобы посмотреть на странные огни, блуждающие между черными мраморными надгробными плитами. На кладбище темно: город далеко, а в другом направлении местность практически пустынная. Обычно эти огни просто белые точки, но иногда они становятся ярче и приобретают голубой оттенок. Это призраки, вышедшие из могил, или у огня есть более рациональное объяснение?

**ОТВЕТ** • При определенных углах падения черные мраморные надгробья зеркально отражают падающий на них свет. Однако при достаточно большом угле падения мраморные плиты свет поглощают. Если темной ночью вы проходите через кладбище, какие-то надгробья ориентированы так, что отраженный от них свет городских огней или звезд направлен в вашу сторону. Свет может отражаться как от широкой поверхности камня, так и сбоку от его грани или от скругленного угла. Когда идешь, кажется, что эти отраженные изображения как-то странно двигаются, то приближаясь, то удаляясь от вас. Создается впечатление, что они ожили. Сходство с живыми существами им придает и движение потоков воздуха разной температуры, благодаря которым траектории световых лучей непрерывно меняются. Вероятно, вы видели подобные пляшущие, дрожащие сполохи при свете костра или над раскаленной дорогой.

### 6.84 • КАКОЙ ВИДИТ РЫБУ РЫБАК

Если вы стремитесь попасть стрелой в рыбу под водой, надо ли целиться непосредственно в нее? Каждый

любитель боуфишинга\* знает, что целиться надо под рыбу. Почему? Что будет, если вы находитесь прямо над рыбой? Изменится ли при таком расположении глаз место, где вы видите рыбу?

**ОТВЕТ** • Идущие от рыбы световые лучи, проходя через поверхность воды в воздух, преломляются, то есть отклоняются от вертикали (рис. 6.30). Когда глаз видит этот свет, человек мысленно, не учитывая преломление, помещает его источник под воду вдоль той же отраженной линии. В результате создается впечатление, что рыба находится выше того места, где она на самом деле. Именно поэтому стрелять надо под рыбу, то есть ниже того места, где вы ее видите. Если вы находитесь прямо над рыбой, то этот эффект отсутствует и стрелять надо вертикально.

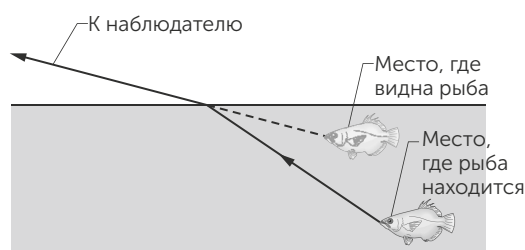


Рис. 6.30 / Задача 6.84. Кажущееся и истинное местонахождение рыбы.

### 6.85 • КАКИМ ВИДИТ РЫБА РЫБАКА

Каким увидит окружающий мир рыба, если поднимет голову и посмотрит вверх? Увидит ли она наш мир искаженным из-за того, что световые лучи проходят

\* Боуфишинг — охота на рыбу с луком или арбалетом.  
Прим. пер.



через поверхность воды? Зависит ли ее картина мира от глубины, на которой рыба находится?

Если ловить рыбу на мушку, надо ли, чтобы мушка попала в точно определенное место, или рыба может увидеть и плавающую поодаль мушку?

Представьте себе, что вы лежите на спине на дне мелкого бассейна. Вы увидите внешний мир таким же, как его видит рыба? Изменится ли картина мира, если вы наденете маску с плоским пластиковым стеклом, в которой есть воздух? Улучшается ли под водой зрение близорукого или дальновзоркого человека?

Когда рыба-брызгун видит насекомое на свисающем над водой растении, она слегка высовывает рот из воды и, выстрелив в жертву струей воды, сбивает ее в воду, где ловит и съедает. Когда рыба целится, ее глаза находятся под водой. Вопрос: она целится именно в ту точку, где видит насекомое?

**ОТВЕТ** • Рыба видит внешний мир искаженным, поскольку ее глаза воспринимают лучи света, преломленные на границе воды и воздуха. В результате преломления световые лучи меняют направление, и под водой направление распространения света ближе к вертикали. Лучи, падающие вертикально, в воде не преломляются, но чем больше угол между направлением распространения лучей и вертикалью, тем сильнее они отклоняются от своего первоначального направления.

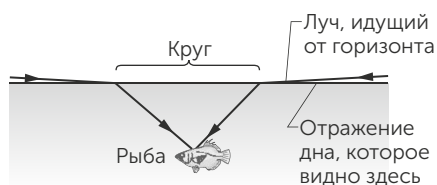


Рис. 6.31 / Задача 6.85. Внешний свет достигает рыбы через круг у нее над головой.

Из-за преломления рыба видит внешний мир только в границах некоторого круга на поверхности воды прямо над ней (рис. 6.31). Изображение горизонта надводного мира попадает на периметр этого круга, а изображения объектов над водой — внутрь круга.

Вне круга рыба видит главным образом зеркальное отражение дна пруда, если пруд мелкий и вода чистая, или темную поверхность, если пруд глубокий или вода грязная. Поэтому, когда рыбу ловят на сухую мушку\*,

\* Сухие мушки имитируют водных насекомых на поверхности воды или наземных насекомых, упавших на воду. Прим. пер.

рыба увидит приманку целиком, если она окажется недалеко от центра круга над головой рыбы. Если мушка окажется ближе к краю круга, в глазах рыбы ее сухая часть будет сильно искажена и, вероятно, затеряется на фоне изображений деревьев и других предметов на горизонте. Если же мушка не попадает в круг, рыба может видеть только ее подводную часть.

При нормальном зрении человек, погруженный под воду, не увидит в круге у себя над головой четкого отображения внешнего мира. Идущие по воздуху лучи света попадают на роговицу глаза человека, преломляются, а затем фокусируются, формируя изображение на сетчатке глаза. Если вода соприкасается с роговицей, преломление световых лучей практически не происходит, и поэтому человек плохо видит под водой.

Видимость улучшается, если использовать маску, поскольку воздух вблизи роговицы восстанавливает ее способность преломлять свет и, следовательно, улучшает фокусировку. Однако свет, попадающий через прозрачное пластиковое стекло маски в воздух под ней, тоже преломляется. Это дополнительное преломление исключает образование круга на поверхности воды, в который отображается внешний мир, и поэтому человек видит надводный мир практически так же, как если бы его глаза находились над водой.

При близорукости свет, формирующий изображение отдаленного предмета, фокусируется не на сетчатке, а перед ней. Если, опустив глаза под воду, уменьшить преломление на роговице, изображение предмета сместится на сетчатку, а значит, оно станет более четким.

Иногда рыба-брызгун выстреливает струей воды в насекомое, находящееся прямо над ней. В этом случае преломление не влияет на линию прицела рыбы. Однако если насекомое находится где-то в другом месте, преломление учитывать надо. Рыба может делать это либо методом проб и ошибок (пока наконец не попадет в насекомое), либо опираясь на предыдущий опыт, либо умение стрелять заложено в нее генетически.

## 6.86 • КАК ПРОЧЕСТЬ ПИСЬМО В ЗАПЕЧАТАННОМ КОНВЕРТЕ

Предположим, я хочу продемонстрировать свои телепатические способности и предлагаю вам написать на листке бумаги какое-то слово и положить этот листок, не сворачивая, в обычный белый конверт. Вы запечатываете конверт и, прежде чем отдать его мне, осматриваете. Через конверт слова не видны, а комната освещена недостаточно ярко, так что проникающий



в конверт свет не позволяет увидеть тень от слова на его поверхности.

Взяв конверт в руки, я сообщаю, что, если вы будете думать об этом слове, я мысленно «увиджу» его. И хотя я время от времени поглядываю на конверт, никаких попыток посмотреть через него на свет я не предпринимаю. Сосредоточившись на несколько минут, я называю написанное слово.

Конечно, никакой я не телепат. Но как мне удалось угадать написанное вами слово? Подсказка: благодаря тем же физическим свойствам мокрая одежда, прежде всего из хлопка белого цвета, становится полупрозрачной.

**ОТВЕТ** • Получив конверт, я незаметно слегка промасливаю его. В обычных условиях свет в конверт не проникает. Он рассеивается на древесных волокнах и наполнителе, из которых состоит бумага. Количество рассеянного света можно определить по показателю преломления, определяющему скорость распространения света в веществе и изменение

направления луча света при переходе из среды в среду. В бумаге есть включения, заполненные воздухом с показателем преломления, близким к единице, а показатели преломления волокон около 1,5. Благодаря большой разнице показателей преломления свет сильно рассеивается на всех поверхностях, ограничивающих воздушные включения.

Когда бумага впитывает жирную смазку с промежуточным показателем преломления, количество рассеянного света уменьшается. Теперь показатель преломления не меняется существенно на границах между воздухом и жиром или между жиром и волокнами и наполнителем. Поскольку свет рассеивается не так сильно, он проникает в конверт и освещает слово, написанное на бумаге чернилами или карандашом. Темные линии в основном поглощают свет, тогда как окружающая их бумага рассеивает обратно часть по-

павшего внутрь света через пропитанный жиром конверт. Я вижу рассеянный свет и могу различить темные линии (а значит, и слово) по контрасту со светлым окружением.



## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 6.87 • ГЛОТАНИЕ ШПАГИ И ЭЗОФАГОСКОПИЯ

Сегодня эзофагоскопия — рутинная процедура для обследования состояния слизистой оболочки пищевода, при которой прибор для визуального наблюдения — эзофагоскоп — вводится в пищевод пациента через рот. Устройство изогнуто, что позволяет повернуть его и пройти из полости рта в пищевод. Одним из элементов эзофагоскопа является световод, передающий свет к концу прибора и освещающий пищевод. Другой элемент передает изображение освещенной полости пищевода обратно на устройство, обеспечивающее его вывод на монитор. Врач может манипулировать эзофагоскопом, меняя освещенные участки пищевода. Этот прибор используется для выявления симптомов рака или язвы, а иногда с его помощью ищут проглоченные пакеты с наркотиками, которые таким способом нелегально перевозят.

Сейчас методы эзофагоскопического исследования хорошо разработаны, но начиналось все несколько странно. В примитивном эндоскопе для исследования нижних отделов толстой кишки использовалась прямая трубка, а в качестве источника света — свеча\*. Прямая трубка входила в состав и первых эзофагоскопов, однако она была слишком короткой и не достигала желудка. Однако врач, начавший первым работать с эзофагоскопами, нашел способ удлинить трубку. Он привлек к работе фокусника, демонстрировавшего цирковой трюк «глотание шпаги». Исполнители этого трюка умеют, откинув голову назад и расслабив мускулы вдоль пищевода, выпрямить пищевод — канал, соединяющий глотку с желудком. Введя в выпрямленный пищевод трубку и направив свет в ее свободный конец, врач увидел полость пищевода, положив начало современной эзофагоскопии.

\* Первый аппарат для исследования прямой кишки был сконструирован немецким врачом Филиппом Боззини в 1806 году. Прим. пер.

### 6.88 • ОПТИКА ДВЕРЦЫ ДУШЕВОЙ КАБИНКИ

Если держать полоску прозрачной пластиковой ленты непосредственно над напечатанным текстом, он хорошо виден. Но почему, если подвинуть ленту к себе так, что расстояние до текста будет больше чем полсантиметра, текст уже не виден? Почему принимающего душ человека можно четко разглядеть через покрытую ледяным узором (рельефную) дверцу кабинки, только если он стоит к ней очень близко (рис. 6.32а)?

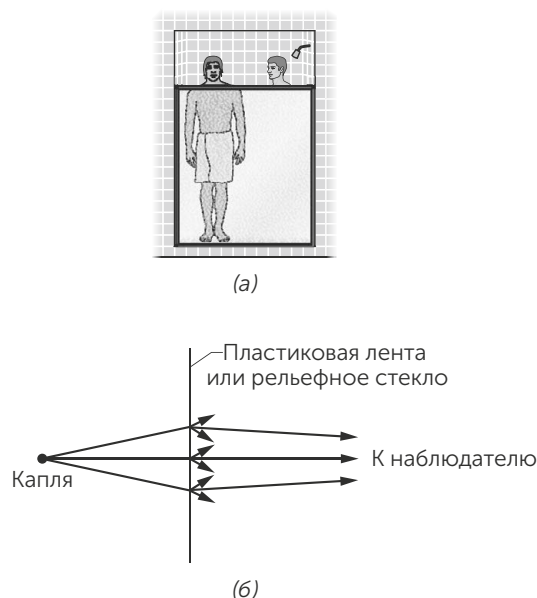
В некоторых музеях изобразительных искусств при демонстрации картин используется аналогичный оптический эффект. Картины предохраняет стекло или прозрачный пластик, но, если это простое оконное стекло, разглядеть картину трудно из-за мешающих отражений в стекле выставочного зала. Чтобы не отвлекать внимание посетителей музея, стекло делают слегка шероховатым. Почему шероховатость скрывает отражения зала, не искажая изображение на картине?

**ОТВЕТ •** Если смотреть, например, на каплю через обычное оконное стекло, глаз воспринимает какую-то часть исходящих от капли световых лучей, а мозг интерпретирует их, автоматически продолжая эти лучи обратно и создавая образ капли. Мы видим ясный и четкий образ капли, поскольку воспринимаем лучи, исходящие из очень маленькой области на стекле вдоль линии зрения — условной линии, соединяющей точку фиксации взгляда со зрачком.

Если стекло заменить плоским листом пластика, каждый луч, проходящий через пластик, рассеивается на имеющихся в нем неоднородностях и превращается в расходящийся пучок лучей (рис. 6.32б). Теперь глаз воспринимает не только те лучи от капли, которые направлены вдоль линии зрения, но и те, которые рассеялись на неоднородностях пластика. Однако мозг по-прежнему меняет на обратное направление всех воспринимаемых лучей, пытаясь выявить, где находится их источник. Если поместить лист пластика близко к капле, пучок лучей, прошедших через пластик, узкий, и образ капли остается четким и ясным. Но если увеличить расстояние от пластика до капли, увеличивается как угловая расходимость пучка лучей, так и область на пластике, световые лучи от которой воспринимает глаз. При этом создается нечеткий образ капли.

Если смотреть через пластиковую ленту на страницу с текстом, прочесть его можно будет, только если удастся различить буквы. Если эта лента находится на расстоянии, превышающем полсантиметра

от текста, размытые изображения букв перекрываются настолько, что отличить одну от другой не удастся.



**Рис. 6.32 / Задача 6.88.** а) Купающийся человек виден, только если он стоит рядом с покрытой ледяным узором дверцей кабинки. б) Рассеяние света на неоднородностях.

Так же обстоит дело и с человеком, принимающим душ за рельефной дверцей кабинки, и с защитным покрытием для картин. В музее посетители, стараясь рассмотреть детали, обычно подходят к картине близко, а предметы в зале находятся достаточно далеко от нее. Поэтому при шероховатом стекле на отражениях предметов, находящихся в зале, детали размыты и неразличимы.

Когда речь заходит о дверях душевых кабинок, часто возникает вопрос, почему из рельефного стекла делают их внешнюю поверхность. Если внутреннюю поверхность сделать рельефной, на нее будет попадать вода. Тогда вода, частично задерживаясь в бороздках и углублениях рельефной поверхности, делает ее почти гладкой, а значит, луч света не расширяется. При этом купающийся будет хорошо виден, даже если он будет стоять далеко от двери.

### 6.89 • МАГИЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Фокусник заворачивает в газету пробирку, разбивает ее на мелкие кусочки молотком, а затем сыпает осколки в прозрачный стакан с водой. Пошептав заклинания над стаканом, он призывает осколки собраться вместе и опять сложиться в пробирку. Затем фокусник

опускает руку в воду, обнаруживает, что осколки наполнили в точности то, о чем он их просил, и вынимает из стакана пробирку. В чем секрет этого фокуса?

Положите в маленький стакан стеклянный прозрачный шарик и поставьте все вместе на напечатанный текст. Если посмотреть сверху вниз через шарик, текст прочесть не удастся. Как сфокусировать текст, не сдвигая стакана?

**ОТВЕТ** • Чтобы показать фокус с пробиркой, сначала положите пробирку в воду. Вы видите эту пробирку в воде, поскольку проходящий через воду свет либо отражается, либо преломляется пробиркой. Пробирку можно сделать невидимой, растворив в воде сахар. Когда у раствора сахара в воде и стекла, из которого сделана пробирка, будут одинаковые оптические свойства, то есть, когда сравняются их коэффициенты преломления, свет, проходящий через раствор, будет проходить через стекло, не меняя направление распространения. Значит, зрители не увидят погруженную в раствор пробирку, поскольку именно преломление света выдает ее. То же самое относится и к осколкам второй пробирки, когда вы опускаете их в раствор сахара в воде. Осталось только нащупать в стакане первую пробирку и достать ее оттуда.

Стеклянный шарик так сильно фокусирует свет, идущий от букв, что невозможно получить их четкое изображение. Чтобы сделать фокусировку более слабой, надо налить в стаканчик воды. Коэффициенты преломления воды и стекла примерно равны, поэтому свет не так сильно преломляется, переходя из одной среды в другую. Теперь глаз должным образом сфокусирует исходящие лучи, и текст можно будет разобрать.

## 6.90 • ЧЕЛОВЕК-НЕВИДИМКА И ПРОЗРАЧНЫЕ ЖИВОТНЫЕ

Герберт Уэллс написал известный роман о человеке, который стал невидимым (рис. 6.33). Возможно ли это с точки зрения оптики? Будет ли человек невидим, если станет прозрачным, как тонкое стекло? Сможет ли такой человек видеть сам? Почему глаза человека прозрачные, а кожа нет? Могут ли животные быть почти прозрачными?

**ОТВЕТ** • Конечно, невидимым человек быть не может. Даже если бы он был совершенно прозрачным (как тонкое стекло), искривленные части его тела действовали бы как сложные линзы. Если бы такой человек шел впереди вас, вы бы видели происходящее вокруг

вас в искаженном виде. Кроме того, от его поверхности, как от поверхности ледяной скульптуры, отражался бы свет. Чтобы избежать искажений и отражений, оптические характеристики такого человека должны быть такими же, как у воздуха. Это значит, что сам человек должен был бы состоять из воздуха, а это требование невыполнимо.

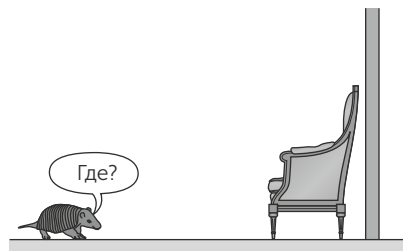


Рис. 6.33 / Задача 6.90. Человек-невидимка, отдыхающий в своем любимом кресле.

Чтобы человек-невидимка мог видеть, ему необходимо фокусировать свет, а затем частично поглощать его. Поскольку хрусталик глаза должен фокусировать свет, его оптические свойства должны отличаться от оптических свойств воздуха. Поскольку сетчатка глаза должна поглощать свет, по крайней мере, она должна быть не совсем прозрачной. И то и другое вы бы заметили, посмотрев человеку-невидимке в глаза. Допустим, однако, что он фокусирует свет очень маленькими непрозрачными пятнами (см. о камере пинспек в задаче 6.102). Тогда он имеет шанс остаться незамеченным.

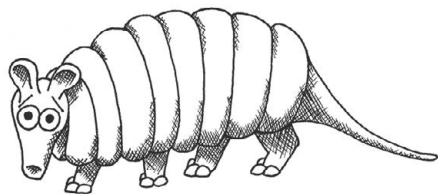
Когда видимый свет падает на тело человека и проходит через его кожу, он рассеивается на коллагеновых волокнах, мембранах и пр., то есть там, где на пути света меняются оптические свойства среды. Рассеяние важно, поскольку изменение оптических свойств происходит на расстояниях, превышающих длину волны света. Любое изображение, передаваемое через кожу, в результате рассеяния так зашумлено, что человек непрозрачен для видимого света. Впрочем, существуют методы компьютерного анализа, позволяющие уменьшить этот шум, так что передача изображения через ткани человеческого тела становится частично возможной.

Роговица и хрусталик человеческого глаза прозрачны для видимого света, несмотря на наличие коллагеновых волокон в роговой оболочке и белок-кристаллинов в хрусталике. Дело в том, что коллагеновые волокна и полипептидные молекулы кристаллинов плотно упакованы в структуры с так называемым

ближним порядком. Это означает, что в небольшой области (несколько диаметров волокон) ориентация волокон или пептидов одинакова. Плотная упаковка означает, что изменение оптических свойств происходит на расстояниях *меньше* длины волны света. В результате преобладает рассеяние вперед, то есть в направлении сетчатки. Таким образом, свет может доставлять информацию об изображении через глаз к сетчатке, воспринимающей свет, а затем начинается распознавание изображения.

Некоторые морские животные используют отражение света, чтобы стать менее заметными. При этом видны не столько животные, сколько океан вокруг них. Отражения маскируют глаза животного, так что оно становится неузнаваемым для хищника. Те же отражения маскируют кишечник животного, непрозрачный из-за пищи внутри него. До сих пор не слишком ясно, с чем связана прозрачность этих морских существ, но наверняка она связана с минимизацией различий в оптических свойствах биологических структур, что позволяет уменьшить рассеяние света. *Неизбежные* различия в оптических свойствах существуют на расстояниях меньше длины волны света, поэтому свет всегда рассеивается вперед, как будто никаких различий вовсе нет. Существуют животные, прозрачность которых объяснить совсем просто: они способны так сильно уплотняться, что рассеяние внутри них вообще не играет роли.

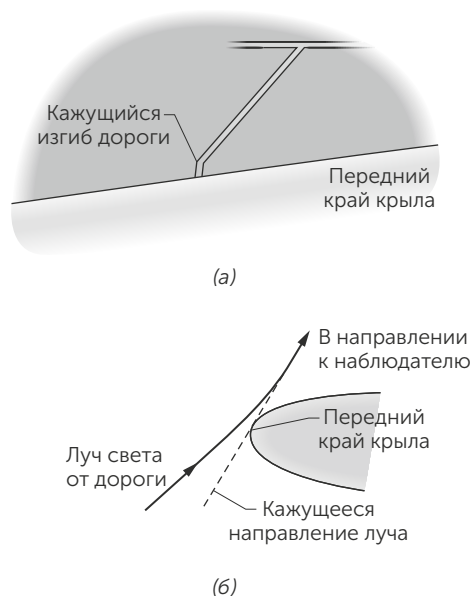
На Гавайях светящаяся каракатица *Euprymna scolopes* прячется, используя уникальные белки в уложенных в стопки пластинках-рефлекторах. Эти пластинки ведут себя как отражающие свет тонкие мембраны, подобно тому, как отражают свет несколько параллельных мыльных пленок. Интересно, что свет производит особая бактерия, живущая в световом органе на нижней стороне тела каракатицы. Когда каракатица освещена — на нее падает, скажем, лунный свет, — ей, чтобы остаться незамеченной, желательно не отбрасывать тень на дно. Для этого каракатица создает поток кислорода в направлении бактерий, которые «включаются» и начинают излучать свет. Затем пластинки отражают этот свет в область тени, устранивая ее.



## 6.91 • РЕФРАКЦИЯ\*, ИЗГИБАЮЩАЯ ДОРОГУ

Если в реактивном самолете вы сидите у окна либо над крылом, либо около его задней кромки, обратите внимание на прямую дорогу, проносящуюся мимо передней кромки крыла. Часто кажется, что ближайший к крылу участок дороги изгибается (рис. 6.34а), а излом вместе с самолетом движется вдоль дороги. В чем причина появления такого излома?

**ОТВЕТ** • Лучи, идущие от основного участка дороги к наблюдателю, распространяются по прямой, так что он видит истинную ее форму. Однако свет, идущий от участка, который виден совсем рядом с передней кромкой крыла, проходит через область, где рассекающее воздух крыло существенно меняет плотность воздуха. Световые лучи, идущие через область с переменной плотностью, меняют направление и загибаются вверх (рис. 6.34б). Когда глаз воспринимает эти лучи, возникает ощущение, что их источник располагается ниже, чем он есть на самом деле. Изгиб — точка, разделяющая лучи, на которые влияют изменения плотности воздуха, и те, на которые изменения плотности не влияют.



**Рис. 6.34 / Задача 6.91.** а) Дорога, какой ее видит наблюдатель. б) Луч света, проходящий мимо крыла (вид сбоку).

\* Традиционно термин «рефракция» употребляется для описания прохождения света в средах, где показатель преломления меняется плавно от точки к точке (траектория луча имеет вид плавно искривляющейся линии), в то время как термин «преломление» чаще используется для описания резкого изменения траектории луча на границе сред.

## 6.92 • НАДО ЛИ ПОЛИВАТЬ РАСТЕНИЯ НА ЖАРКОМ СОЛНЦЕ?

Некоторые садоводы утверждают, что газоны или кустарники не следует поливать при ярком солнце, поскольку капли воды на стеблях и листьях фокусируют солнечный свет, который может листья сжечь. Справедливо ли это утверждение?

**ОТВЕТ** • Никто из ученых не наблюдал повреждения листьев при таком поливе. Наоборот, сообщалось, что на самом деле вода охлаждает листья, в том числе и из-за испарения. Расчеты показывают, что фокусировка солнечного света и связанный с этим нагрев существенны, только если капли воды на листьях имеют форму идеальных шариков. Но по листьям большинства растений вода растекается (говорят, что вода смачивает листья). Правда, есть растения, например лотос, листья которых имеют специфическую микроструктуру (например, волоски), благодаря которой капли воды превращаются в почти идеальные сферы. Таким растениям на прямом солнце может угрожать перегрев, но даже такие почти сферические капли просто скатываются с их листьев.

В засушливой местности к совету поливать растения вечером, а не днем при ярком солнце, стоит прислушаться. Когда солнце низко, вода с большей вероятностью не испарится, а впитается в землю.

## 6.93 • МОЖНО ЛИ ЗАЖЕЧЬ КОСТЕР С ПОМОЩЬЮ ЛЬДА?

Вторая часть научно-фантастического романа Жюль Верна «Путешествие и приключения капитана Гаттераса» называется «Ледяная пустыня». После неудачной попытки добраться до Северного полюса капитан Гаттерас и несколько оставшихся верными ему членов взбунтовавшейся команды вынуждены зимовать во льдах вблизи Северного полярного круга. Дрова у них есть, но нет ничего, чем эти дрова можно поджечь. Им необходимо добраться до другого, тоже застрявшего во льдах корабля, но для этого надо совершить долгий переход по ледяной пустыне. Ясно, что по дороге они замерзнут и умрут, но судовой врач предложил хитроумный план, следуя которому они использовали лед, чтобы поджечь щепки. Вы догадались, как это можно сделать? Сработает ли план врача?

**ОТВЕТ** • Согласно Жюль Верну, доктор из прозрачного куска льда смастерил выпуклую линзу, собирающую световые лучи. Во льду не было замороженных

пузырьков воздуха, которые обычно остаются при замерзании воды. С помощью топорика он отколол кусок льда. Придав куску льда нужную форму ножом, он окончательно отполировал его руками. Затем врач вынес ледяную линзу на яркое солнце и подобрал высоту так, что точка, в которой концентрируются солнечные лучи (фокус), попала на щепки. Щепки загорелись через несколько секунд.

Идея этого метода принадлежит Уильяму Скорсби — выдающемуся английскому ученому, первопроходцу арктических исследований. Он рассказал, что с помощью грубо сделанной линзы из прозрачного льда ему удалось поджечь дрова, расплавить свинец и разжечь матросскую трубку. Совсем недавно Мэттью Уилер из города Макбрайд в Британской Колумбии рассказал мне, что сделал фотографии камерой, где вместо обычных линз использовал линзы из льда.

Огонь можно зажечь и используя обычные линзы для очков, конечно, если это очки для дальнозорких. Выпуклые линзы таких очков могут сфокусировать свет на щепках, но линзы из очков для близоруких свет не фокусируют. Поэтому сцена из романа Уильяма Голдинга «Повелитель мух» нереалистична: Хрюша был близоруким, и Ральф не мог воспользоваться его очками, чтобы зажечь костер.

## 6.94 • БРИЛЛИАНТЫ

Почему бриллианты сверкают? Почему они искрятся всеми цветами радуги и почему эти цвета тем ярче, чем больше бриллиант? Почему он кажется темным, если смотреть через его нижнюю грань на небольшой источник света? Почему грязь на нижней грани бриллианта уменьшает блеск его верхней грани?

**ОТВЕТ** • Бриллиант сверкает всеми цветами радуги, если свет, прошедший через его верхнюю грань, разлагается в спектр и через верхнюю грань возвращается обратно к наблюдателю. Чтобы избежать потерь, нижние грани должны быть ориентированы так, чтобы свет не выходил через нижнюю поверхность, а весь от нее отражался. В этом случае имеет место полное внутреннее отражение света. Именно поэтому, если смотреть через нижнюю грань бриллианта на свет, он будет выглядеть темным. Если нижняя грань бриллианта покрыта жиром или грязью, какая-то часть прошедшего внутрь камня света уходит в этот грязный слой, и бриллиант блестит меньше. Поэтому, чтобы бриллиант оставался сверкающим, его надо мыть и снизу, и сверху.



Одним из параметров, определяющим, насколько данный материал при освещении разлагает белый свет на цвета видимого спектра, является его *дисперсия*, или *зависимость показателя преломления от длины волны* (то есть цвета). Дисперсия у алмаза очень высокая, и поэтому он разлагает свет гораздо лучше стекла с низкой дисперсией. Это значит, что сделанный из стекла фальшивый бриллиант с большим числом граней будет блестеть, но искриться разными цветами не будет. Мерцание большого бриллианта гораздо красочнее, чем маленького, из-за того, что луч света проходит внутри крупного камня большее расстояние, в результате чего расхождение лучей разных цветов увеличивается.

### 6.95 • ОПАЛЫ

Чем обусловлена игра цвета опала? У опала механизм цветообразования должен быть не таким, как у алмаза, его дисперсия мала. Кроме того, у опала и сами цвета другие. Если вращать бриллиант под ярким источником белого цвета, он переливается всеми цветами радуги. А если так же вращать опал, разброс цветов будет небольшим. Что определяет различие между бесцветным и благородным черным опалом?

**ОТВЕТ •** Опал — это не кристалл, а аморфный кремнезем, оксид кремния, содержащий небольшое количество воды. Кремнезем собран в небольшие сферические глобулы (диаметром порядка 100 нм), которые упакованы плотно, как апельсины в ящике. В пространстве между этими сферами содержатся воздух, водяной пар и жидкая вода. Оптические свойства структуры из кремниевых сфер и пустот между ними зависят от размеров глобул. Белый свет, попавший внутрь опала, испытывает дифракцию (один из типов рассеяния) на этой периодической структуре, при этом лучи разных цветов выходят из опала под разными углами. Угол дифракции для каждого из цветов определяется периодом структуры (диаметром глобул) и углом падения света. Если, осматривая опал, вы двигаете его, тут и там вспыхивают и гаснут точки разных цветов. Говорят, что опал *горит*.

Если цвета яркие и хорошо различимы, как в случае черного опала, каждый из них должен состоять из световых волн с близкими длинами. Такой узкий интервал длин волн возможен, если все кремниевые сферы примерно одного размера. Однако самую красивую игру цвета под любым углом демонстрируют опалы,

состоящие из групп кремниевых глобул, ориентированных и упакованных в разных местах по-разному. В этом случае говорят о *дефектах упаковки*. Черный опал с дефектами еще и потому так красив, что в нем есть небольшие включения углерода, оксидов железа или титана, поглощающие часть света. Благодаря этому создается черный фон для исходящих ярких цветных лучей, что делает их лучше различимыми. В бесцветных опалах сферические глобулы кварца сильно разнятся по размерам, и поэтому такие опалы не блестят. В белых опалах этот разброс меньше, но все же еще достаточен, чтобы они выглядели бледными и *молочно-белыми*.

### 6.96 • АЛЕКСАНДРИТОВЫЙ ЭФФЕКТ

Цвет большинства драгоценных камней примерно одинаков как при солнечном свете, так и при искусственном освещении. Но есть камни, например александрит и танзанит, обладающие удивительной способностью менять цвет: на солнце они сине-зеленые, а при свете электрической лампочки красно-желтые. Впервые полудрагоценный камень александрит нашли в России на Урале в 1831 году. Его назвали в честь наследника русского престола и будущего русского царя Александра II. Почему же александрит меняет цвет?

**ОТВЕТ •** Камни, обнаруживающие александритовый эффект, хорошо пропускают только сине-зеленый и красный свет видимого спектра. Однако сине-зеленый свет они пропускают лучше, чем красный. Когда смотришь на такой камень при солнечном свете, куда входят все цвета видимого спектра, проходят главным образом сине-зеленые лучи, и камень выглядит зеленым. Искусственное освещение, созданное горячей нитью накаливания внутри электрической лампочки, обычно обеднено цветами синей области спектра. Из-за этого при искусственном освещении сине-зеленых лучей проходит гораздо меньше, чем красных, и камень выглядит существенно краснее, чем при солнечном свете. Но оказывается, что в свете электрической лампочки камень еще более красный, чем он должен бы быть, согласно этим рассуждениям. По-видимому, это можно объяснить особенностями человеческого зрения.

### 6.97 • ЗВЕЗДЧАТЫЙ САПФИР

Почему, если смотреть на звездчатый сапфир, освещенный небольшим источником света, над его поверхностью видна парящая шестилучевая звездочка?

**ОТВЕТ** • Звездочка получается в результате рассеяния света на игольчатых включениях из оксида титана. Сонаправленные кристаллики группируются вместе вдоль линий, ориентированных под углом  $120^\circ$  друг относительно друга. Глядя на камень, мы видим три пересекающиеся линии, образующиеся при рассеянии света на таких скоплениях, а шесть лучей звездочки получаются при пересечении этих линий в одной точке. Если при обработке камня его поверхность делают не плоской, а сферической или овальной, кажется, что звездочка находится где-то над поверхностью, и возникает ощущение, что она парит в воздухе. Это мнимое изображение, которое создает зрительная система, «интерпретируя» воспринимаемый ею свет. На листке бумаги, помещенном в то место, где, как кажется, находится блестящая звездочка, она не видна.

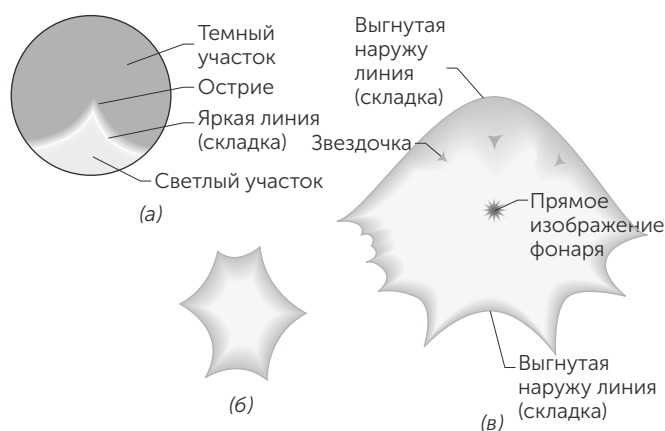
### 6.98 • СВЕТ, ПРОШЕДШИЙ ЧЕРЕЗ БОКАЛ С ВИНОМ, ОКНО И КАПЛЮ ВОДЫ

Посмотрим на стол, на который падает солнечный свет, прошедший через бокал с белым вином. Стол освещен неоднородно. На нем можно увидеть одну или несколько ярких линий, так называемые *каустики*. Искривленные стенки бокала перенаправляют световые лучи, что и приводит к образованию таких линий. Отражение света от окон тоже приводит к образованию похожих узоров на окружающих их предметах. Однако, вероятно, чаще всего каустик можно увидеть внутри керамической чашки или пластикового стакана с кофе (но стакан должен быть не из вспененного полистирола). Здесь каустик представляет собой две пересекающиеся яркие искривленные линии (рис. 6.35а).

Большое количество разнообразных каустик получается при прохождении луча лазера через гофрированный или рифленый кусок пластика наподобие тех, которые используют в качестве абажуров для офисных люминесцентных ламп. Двигая кусок пластика под музыку, можно даже устроить миниатюрное лазерное шоу. Можно использовать и гладкий кусок пластика, если на него накапать прозрачный клей. Двигающиеся каустики также возникают на дне плавательного бассейна, когда солнце освещает рябь на поверхности воды, и вообще на мелководье.

Самые необычные каустики можно увидеть, посмотрев ночью через каплю воды на уличный фонарь. Если вы носите очки, это может быть капля на стеклах очков или на оконном стекле, но тогда подойдите

к окну поближе и встаньте так, чтобы ваши глаза были совсем рядом с ней. Если капля маленькая, будет видно пятно, ограниченное яркими пересекающимися вогнутыми кривыми с выступающими остриями (рис. 6.35б). Если капля побольше и подрагивает на стекле, снизу картина будет почти такой же, как в случае маленькой капли, но сверху пятно ограничено яркой выгнутой наружу кривой (рис. 6.35в). Прямо под ней видны звездочки. Их можно заставить «танцевать», осторожно пошевелив каплю. Если удастся повернуть каплю относительно линии прямой видимости фонаря, острый выступ, который сначала был снизу пятна, сожмется, а затем сместится внутрь его и превратится в звездочку.



**Рис. 6.35 / Задача 6.98.** Узоры света, образованные: а) чашкой кофе в лучах солнца, б) маленькой каплей воды возле вашего глаза и в) большой каплей воды.

Почему при столь разных условиях образуются подобные картины? Можно ли выделить в них основные элементы?

**ОТВЕТ** • Двумя основными элементами каустик являются *складки* (изогнутые линии) и *острия* (пересечения двух складок). Мы обсуждаем пример из оптики, но складки и острия — основные элементы более общей математической теории, которая называется *теорией катастроф*. Они появляются из-за того, что при отражении или преломлении на поверхностях (поверхности бокала с вином, волнующейся воды и т. д.) световые лучи собираются в пучок. Свет, концентрируясь, образует яркие линии. Точнее: из-за концентрации света в воздухе образуется трехмерная поверхность, на которой резко возрастает интенсивность света. Если

поместить в это место в пространстве рассеивающую поверхность — экран, то мы увидим линию — двумерное сечение этой поверхности.

Трехмерные поверхности бывают трех видов, у каждой из них есть *сингулярность* (особенность). Каустика в сечении, проходящем через сингулярность, наиболее компактна. Когда сечение не проходит через сингулярность, говорят, что структура *не разворачивается*.

Солнечный свет, отражаясь от окна здания на стену, может давать изображение, в общем виде повторяющее форму окна, но с искривленными краями, которые представляют собой складки каустики. Складки могут быть вогнутыми и выгнутыми в зависимости от того, вогнуто ли стекло внутрь или выгнуто наружу. Когда окно выгнуто наружу, отражение представляет собой овал; когда окно вогнуто, появляется яркий крест. Окно с двойными стеклами, одно из которых вогнуто, а другое выгнуто, может привести к появлению отражений обоих типов.

## 6.99 • ТЕНИ С ЯРКИМИ ГРАНИЦАМИ И ПОЛОСАМИ

Когда пойдете принимать ванну, прихватите с собой карандаш и, осветив его сверху фонариком, проследите за его тенью на дне ванны. Если держать карандаш над водой или погрузить его в воду целиком, тень на дне будет напоминать карандаш. Однако если опустить в воду только часть карандаша и держать его под углом к поверхности, тень становится похожа на два стержня с закругленными концами, напоминающие сосиски. Стержни разделены светлой полоской (рис. 6.36а). Почему тень имеет такую форму? По-английски это называется *sausage-shadow effect*, что можно перевести как *эффект сосисочной тени*.

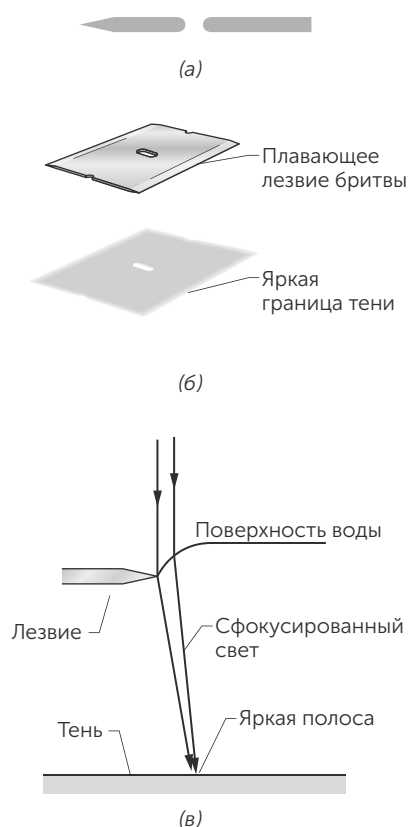
Опустим осторожно обычное двустороннее лезвие для бритвы на поверхность воды. Если глубина воды всего несколько сантиметров, края тени бритвы обычные. Почему, если вода глубже, по краю тени появляется яркая полоса (рис. 6.36б)? Будут ли края яркими, если бритву слегка приподнять над уровнем воды?

Почему тень от плавающего волоса часто представляет собой цепочку, состоящую из участков с обычными и яркими краями?

Наполним ванну водой глубиной по крайней мере шесть сантиметров и проведем по ее поверхности пальцем или карандашом. Почему на дне остаются темные подрагивающие круги с яркими краями?

Человек, плывущий или вылезавший из освещенного солнцем бассейна, отбрасывает похожую тень.

**ОТВЕТ •** Эффект сосисочной тени связан с поверхностным натяжением (взаимным притяжением молекул воды друг к другу и к карандашу), в результате чего вода несколько поднимается вверх по поверхности карандаша, а поверхность воды вблизи карандаша становится вогнутой. Свет, прошедший через искривленную поверхность воды около карандаша, частично попадает на отбрасываемую им тень, создавая яркую полосу между тенями от погруженной в воду и оставшейся над водой частями карандаша.



**Рис. 6.36 / Задача 6.99.** Тени от карандаша (а) и лезвия бритвы (б) в мелкой воде. в) Кривизна поверхности воды вблизи предмета фокусирует световые лучи, что приводит к появлению яркой полосы по краю тени.

Вес бритвы вдавливают поверхность воды под ней, а по краям бритвы поверхность воды выпуклая. Свет, проходящий через искривленную поверхность, фокусируется, но, если воды слишком мало, лучи света достигают дна до того, как сойдутся в фокусе, и поэтому

края тени выглядят обычно. Когда вода глубже, световые лучи фокусируются на краю тени, образуя яркую полосу (рис. 6.36в). Если чуть-чуть приподнять бритву над водой, вода тянется вслед за бритвой, и ее поверхность становится вогнутой. Такая поверхность рассеивает свет в область тени без фокусировки, и, следовательно, края тени выглядят как обычно.

Тень от плавающего волоса может напоминать связку сосисок, причем края тени могут быть и обычными, и яркими в зависимости от того, как искривляется поверхность воды на протяжении длины волоса.

Если двигать в воде какой-нибудь предмет, за ним на поверхности воды остаются воронкообразные вихри. В глубине вихревой воронки поверхность воды вогнутая. Свет от такой поверхности расходится в разные стороны, и на дне, куда поступает мало света, образуется темный круг. Вблизи горлышка воронки поверхность воды выпуклая. Прошедшие через нее световые лучи фокусируются по краю тени, и граница тени становится яркой. Если вода достаточно глубокая, на границе образуется яркая полоса, причем ее внешний и внутренний край особенно яркие.

### 6.100 • ЯРКИЕ И ТЕМНЫЕ ПОЛОСЫ НА КРЫЛЕ

В 1983 году Энтони Хьюиш\* во время полета заметил идущие вдоль крыла самолета две полосы, темную и светлую (рис. 6.37а). Ширина этих полос, которые не слишком контрастировали с освещенной солнцем поверхностью крыла, была от 1 до 2 см. Угловая высота солнца относительно края крыла была порядка  $25^\circ$ . Больше часа он наблюдал за этими полосами. Затем, когда самолет стал снижаться, полосы начали сдвигаться к передней кромке крыла, а потом вообще исчезли.

Я видел подобные полосы, а также наблюдал сходное явление, когда солнце было с противоположной стороны самолета: примерно на середине крыла выростала вверх темная полоса, заметно искажая вид внешней части крыла (рис. 6.37б). Когда я наклонял голову вперед или назад относительно корпуса самолета, полоса сдвигалась.

С чем связано появление таких полос?

**ОТВЕТ •** Пусть точка наблюдения находится внутри самолета. В этой системе отсчета воздух проносится

\* Энтони Хьюиш (род. 1924) — английский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1974 года. *Прим. ред.*

вдоль неподвижного крыла. Обтекающее крыло течение создает ударную волну: распространяющийся фронт резкого изменения характеристик среды, где скорость воздуха резко уменьшается, а его плотность, соответственно, резко увеличивается. Перпендикулярный крылу самолета фронт ударной волны распространяется на всю его длину. (Если бы фронт ударной волны можно было увидеть, он напоминал бы пористый барьер, протянувшийся вдоль крыла.) Солнечные лучи, пробивающиеся через фронт ударной волны, где плотность воздуха меняется, заметно преломляются. Картина, которую видел Хьюиш, получалась так: падающие на какое-то конкретное место на крыле самолета световые лучи при преломлении меняли направление и уходили ближе к задней части крыла. Именно там была видна яркая полоса, а темная полоса соответствовала месту, которое эти лучи осветили бы, если бы не было ударной волны.

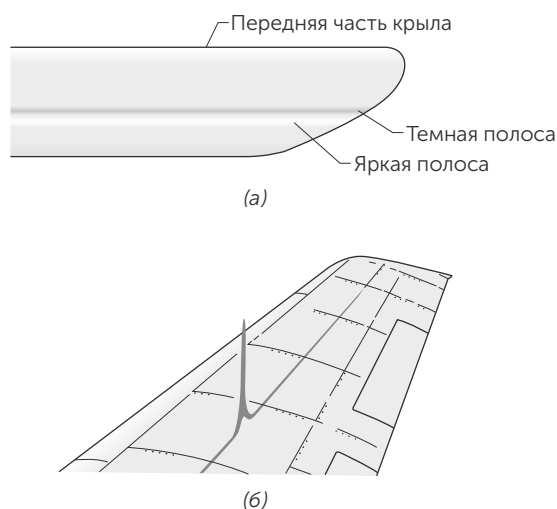


Рис. 6.37 / Задача 6.100. а) Яркая и темная полосы вдоль крыла самолета. б) Темная полоса, «вырастающая» из крыла.

Темная полоса, дополнительно обнаруженная мной, тоже связана с прохождением световыми лучами фронта ударной волны, но их источником были детали освещенного солнцем крыла. Когда лучи, исходящие от соседних деталей на крыле, проходили через ударный фронт, преломлялись они по-разному. Дальше эти лучи расходились, оставляя область между соседними деталями относительно темной, а темная полоса, которую я видел, была составлена из этих темных участков.

Иногда я видел две полосы.

## КОРОТКАЯ ИСТОРИЯ

### 6.101 • УДАРНЫЕ ВОЛНЫ ОТ АВТОМОБИЛЯ THRUST SSC

Рекорд скорости на земле был установлен в 1997 году на британском турбовентиляторном автомобиле Thrust SSC во время гонок по дну высохшего озера в пустыне Блэк-Рок в штате Невада. Пока это единственный автомобиль, на котором удалось развить *сверхзвуковую скорость* (скорость, превышающую скорость звука). Зрители не только слышали громкий хлопок — свидетельство наложения ударных волн, исходивших от различных частей машины, но и сфотографировали эти волны. На снимках, которые многие делали во время гонки, должны были бы запечатлеться привычные очертания холмов вдоль трассы. Однако, когда световые лучи, отраженные от холмов, проходили по пути к фотокамере через фронт ударной волны, в котором плотность воздуха слегка менялась, они изменяли направление распространения. В результате на фотографиях появились искаженные изображения холмов, что подтверждает факт возникновения ударной волны. На одной из фотографий я насчитал четыре ударные волны, идущие вверх от машины.

### 6.102 • КАМЕРЫ ПИНХОЛ И ПИНСПЕК

Камера пинхол (камера-обскура) представляет собой крошечное круглое отверстие, через которое проходит свет и попадает на пленку. Как с помощью такого устройства можно получить изображение на пленке? Какого размера должно быть отверстие? Некоторые очень небольшие отражающие поверхности, например осколки стекла, тоже можно использовать, чтобы получать подобные изображения.

Можно сделать и большой вариант пинхол-камеры. Для этого в занавеске на окне достаточно проделать небольшое отверстие, и если в комнате темно, а свет с улицы проходит через это отверстие, на противоположной стене можно увидеть перевернутое изображение картины за окном. В прошлом подобные опыты были в диковинку.

Патрик Кэйб из Университета Северной Каролины в Пембroke предложил интересный способ продемонстрировать этот эффект с помощью шарика для пинг-понга. Порядок работы следующий. 1. Выкрасьте

черной краской одну половинку шарика. 2. Просверлите дырочку диаметром 2 мм в центре выкрашенной стороны шарика. 3. Сложите из черной плотной бумаги цилиндр диаметром чуть меньше диаметра шарика. 4. Вставьте шарик в один из концов цилиндра так, чтобы черная полусфера смотрела наружу. 5. Заклейте скотчем шов на бумаге, а затем закрепите скотчем шарик, не закрывая отверстия. 6. Посмотрите в открытый конец цилиндра, направив его другой конец на какой-нибудь ярко освещенный предмет. На белой матовой стенке шарика внутри цилиндра, как на экране, вы увидите перевернутое изображение этого предмета.

Камера пинспек по принципу действия противоположна камере пинхол и состоит из небольшой непрозрачной крупинки, помещенной перед фотопленкой (ее можно приклеить к листу прозрачного пластика). Большое отверстие перед этой крупинкой работает как кадровая рамка камеры, ограничивающая количество света, поступающего на нее. Какого типа изображение можно получить с помощью такой камеры?

Какое изображение получится, если небольшая крупинка будет загораживать свет от люминесцентной лампы, освещающей экран?

**ОТВЕТ •** Рассмотрим небольшой источник света, помещенный перед камерой пинхол. Световые волны от источника дифрагируют на отверстии камеры, то есть расходятся и интерферируют. При этом некоторые волны усиливают, а другие гасят друг друга. Результат прост: свет оставляет небольшое яркое пятнышко на фотопленке. Это пятнышко — изображение источника света; каждая точка светящегося или отражающего свет объекта формирует свое почти точечное изображение. Если отверстие камеры слишком большое, эти изображения перекрываются, и, возможно, столь сильно, что их нельзя отличить одно от другого. Перекрывание изображений уменьшается при уменьшении размера отверстия, но при этом падает и яркость изображения. Итак, каков же оптимальный размер отверстия?

Ответ зависит от того, как на пути к фотопленке расходится световая волна, прошедшая через отверстие. Когда фронт волны (поверхность, все точки которой колеблются с одинаковыми фазами) достигает отверстия, его условно разбивают на зоны в форме колец, центры которых совпадают с отверстием. Световые волны, проходящие через центральную зону, достигают пленки *в фазе* (синхронно) (в этом случае говорят о *конструктивной интерференции*), поэтому



такие волны стремятся усилить друг друга, и получается яркое изображение.

Когда размер отверстия камеры точно совпадает с размером центральной зоны, изображение самое яркое. Если отверстие меньше, прохождение света через центральную зону затруднено, и изображение становится тусклым. Если радиус отверстия больше радиуса центральной зоны, свет из следующей зоны тоже достигает фотопленки, но такие световые лучи доходят до пленки по более длинному, наклонному пути и достигают ее *не точно в фазе* (не совсем синхронно) с лучами, прошедшими через центральную зону. Значит, волны будут частично гасить друг друга (имеет место *деструктивная интерференция*), что делает изображение более тусклым. В оптимальной ситуации отверстие должно быть таким маленьким, чтобы свет проходил только через центральную зону, и тогда изображение будет ярким и достаточно четким.

Непрозрачная крупинка камеры пинспек отображает на пленке каждый небольшой источник света, исходящего от предмета перед камерой, в виде теневого пятна. Все вместе эти теневые пятна создают *теневое* (или *негативное*) изображение предмета.

Если непрозрачную крупинку поместить между люминесцентной лампой и экраном, на экране получится теневое изображение лампы: крупинка отбрасывает на экран тень от каждого из участков лампы, и все вместе эти тени создают тусклое изображение трубки. Это изображение не абсолютно темное, поскольку каждое теневое изображение отдельного участка по-прежнему освещается остальной поверхностью лампы.

### 6.103 • ИЗОБРАЖЕНИЯ СОЛНЦА ПОД ДЕРЕВОМ

Почему во время солнечного затмения в тени под деревом видно большое количество изображений солнца? Есть ли изображения солнца в тени под деревом в другое время? Почему под раскидистыми кронами высоких деревьев у теневых изображений листьев иногда бывает два края, один внутри другого? Почему такие изображения нельзя увидеть под более низкими деревьями?

**ОТВЕТ •** Во время солнечного затмения изображения солнца появляются благодаря небольшим дырочкам в листьях или просветам между соседними листьями. Каждая дырочка действует как камера пинхол (см. предыдущую задачу), создавая изображение на земле в тени дерева. И когда затмения нет, возникают

подобные изображения, но разглядеть их труднее из-за того, что яркий солнечный свет, отраженный от окружающих предметов, в какой-то мере освещает и тень. Во время солнечного затмения кругом становится темнее, и изображения солнца видны лучше. В любом случае их гораздо легче разглядеть на плоской поверхности, чем на неровной, покрытой травой земле.

Тень от листа, которую мы видим под раскидистой кроной высокого дерева, отбрасывает один из листьев на нижних ветках. Он освещен солнечным светом, пробивающимся через просветы между листьями на более высоких ветвях. Когда нижний лист освещают лучи, прошедшие через два просвета, могут получиться два перекрывающихся теневых изображения, причем края одного из них могут попасть внутрь другого.

### 6.104 • СВЕТ, ПАДАЮЩИЙ ЧЕРЕЗ ОКОННУЮ СЕТКУ; ЛИНИИ МЕЖДУ ПАЛЬЦАМИ

Если ночью вы посмотрите на далекую яркую лампу через москитную сетку на окне, находящемся по крайней мере на расстоянии нескольких метров от вас, будет видна решетка из темных и ярких линий (рис. 6.38а). В результате чего получается такая картина? Аналогично выглядит яркая лампа, если посмотреть на нее через ткань самого обычного зонтика. Иногда эта решетка бывает цветной. Почему, если в ярко освещенной комнате посмотреть в зазор между почти соприкасающимися большим и указательным пальцами, между ними будет видно множество темных линий (рис. 6.38б)?

**ОТВЕТ •** Картины из темных и ярких линий — это обычно результат дифракции света, то есть изменения направления распространения световых волн при прохождении через узкую щель или вблизи узкого препятствия, причем каждая точка фронта волны становится источником вторичных сферических волн. Под некоторыми углами вторичные волны распространяются *в фазе* (синхронно), усиливая друг друга (конструктивная интерференция), что приводит к появлению ярких линий. Под другими углами волны распространяются *не в фазе* (несинхронно) и стремятся погасить друг друга (деструктивная интерференция), благодаря чему появляются темные линии. Так возникает картина, состоящая из светлых и темных линий.

Однако такая картина появляется, только если проходящие через щель световые волны *когерентны*, то есть до дифракции на щели они распространяются синхронно (или почти синхронно). Большинство обычных

источников (например, электрические лампочки) излучают *некогерентный* свет — случайные, несоординированные световые волны. Однако, проходя через очень маленькое отверстие, некогерентный свет становится когерентным (рис. 6.38в). Поскольку отверстие маленькое, все прошедшие через него световые волны практически идентичны, а значит, распространяются почти синхронно. Когда такой свет падает на узкие отверстия, например на ткань, из которой сделан зонтик, или на оконную сетку, образуется дифракционная картина.



**Рис. 6.38 / Задача 6.104.** Изображение, которое видно:  
а) через сетку и б) между большим и указательным пальцами.  
в) Свет, прошедший через маленькую дырочку, освещает узкую щель и образует дифракционную картину на экране.  
г) Свет, прошедший через ту же щель, попадает на зрачок и образует дифракционную картину на сетчатке.

Если убрать отверстие, чтобы некогерентный свет от источника (например, от электрической лампочки) падал прямо на узкую щель, дифракционная картина исчезнет. Как и раньше, при прохождении света через щель образуются вторичные волны, но в разные моменты времени от щели распространяются несоординированные волны, и поэтому экран освещен равномерно.

Теперь заменим экран глазом и посмотрим через узкую щель прямо на источник света. В этом случае сама

щель играет роль маленькой дырочки, которая была в традиционной постановке эксперимента (рис. 6.38г). Поскольку щель маленькая, расходящиеся от нее световые волны почти синхронно достигают зрачка. Проходя через зрачок, эти почти когерентные волны создают дифракционную картину на сетчатке. Ее мы и видим, когда смотрим на отдаленную лампу через сетку на окне, через ткань зонтика или в щель между близко сведенными пальцами.

## 6.105 • ЯРКИЕ ЦАРАПИНЫ И РАЗНОЦВЕТНАЯ ПАУТИНА

Почему, если смотреть на солнце через окно самолета или здания, на стекле видны яркие царапины, расположенные на концентрических окружностях (рис. 6.39а)? Почему иногда такие царапины кажутся направленной на солнце полоской? Почему обычно царапины не видны, если смотреть не в направлении солнца?

Почему паутина кажется разноцветной, если через нее посмотреть на солнце, и почему ее расцветка меняется, если поменять угол зрения? (Цвета могут быть блеклыми. Их легче заметить, если под паутиной будет что-то темное, но на нее саму должны падать прямые солнечные лучи.)

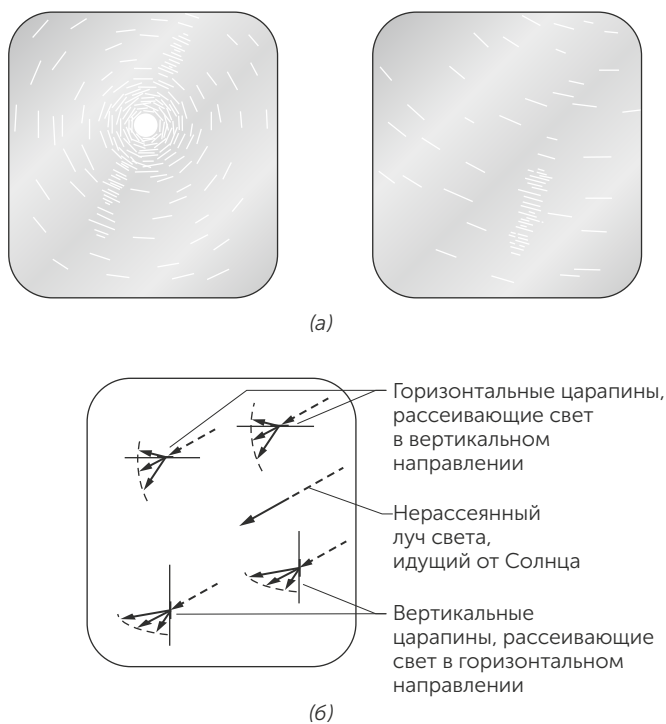
**ОТВЕТ •** Только кажется, что царапины располагаются вдоль концентрических окружностей. Обычно стекло на окне покрыто множеством коротеньких, случайно ориентированных царапинок, но только часть из них выглядят яркими, и отсюда возникает оптическая иллюзия. Луч света, рассеянный царапиной, расходится наподобие веера в плоскости, перпендикулярной самой царапине (рис. 6.39б). Чтобы увидеть какую-то определенную царапину, надо видеть раствор соответствующего веера, который имеет небольшой угол раскрытия и ширину, равную длине царапины.

Если царапина оказывается строго слева или справа от солнца, линия взгляда попадет в раствор рассеянного веером света от этой царапины, только если царапина вертикальная. Если же царапина выше или ниже солнца, ее можно увидеть, только если она расположена горизонтально. В общем случае царапина видна, если она расположена вдоль касательной к окружности с центром вокруг того места, где вы видите солнце. Поэтому, когда вы видите большое количество мелких царапинок, создается иллюзия, что на самом деле они расположены на окружностях вокруг солнца. Если где-то имеется скопление царапин, может казаться,

что они образуют отходящую от солнца радиальную полосу.

Взгляд попадает внутрь веера рассеянного света, только если царапина находится вблизи того места, где видно солнце. Иначе рассеянный царапиной свет не виден, и царапина незаметна.

Если самолет попадает в столб пепла и дыма, поднявшегося в воздух при извержении вулкана, царапины на оконных стеклах могут привести к экстремальной ситуации. Так, 24 июня 1982 года у британского авиалайнера, пролетавшего над дымящимся вулканом Галунггунг в Индонезии, отказали все четыре двигателя, а поднявшийся в воздух вулканический пепел поцарапал окно кабины пилота. Экипажу с трудом удалось запустить три двигателя, и командир направил борт в Джакарту, где самолет должен был совершить вынужденную посадку в темноте. Однако через поцарапанные окна ничего не было видно. Посадка проходила по командам второго пилота, пытавшегося рассмотреть огни посадочной полосы через две узкие полоски сохранившего прозрачность стекла.



**Рис. 6.39 / Задача 6.105.** а) Концентрические окружности из ярких царапин на окне, когда лучи солнца прямо падают на окно и когда окно чуть смещено. б) Рассеяние света царапиной. Свет падает на окно снаружи и рассеивается в комнату.

Если подойти близко к паутине и посмотреть через нее на солнце, видишь свет, рассеянный (испытывший дифракцию) на шелковистых нитях и клейких шариках — ловушках, оставленных пауком на некоторых из них. Рассеяние на нити во многом напоминает рассеяние на царапине оконного стекла: рассеянный свет расходится от нити плоским веером. Рассеянный на шарике свет представляет собой расходящийся световой конус. И в том и в другом случае угол, на который расходится рассеянный свет, различен для разных длин волн, а это значит, что при рассеянии возможно разложение белого света на цвета. Если изменить угол зрения, меняются и цвета, которые можно увидеть. Именно за счет того, что углы, на которые отклоняется рассеянный свет разных цветов, различны, царапины на окне могут казаться цветными.

#### 6.106 • ЯРКИЕ ПОЛОСЫ НА ВЕТРОВОМ СТЕКЛЕ

Когда вы ночью под дождем едете по улице, на ветровом стекле автомобиля видны яркие полосы света, созданные уличными фонарями и другими источниками света (рис. 6.40а). Эти полосы, а они могут быть прямыми или изогнутыми, направлены в одну общую точку. При движении машины кажется, что они вращаются вокруг этой точки. Если в дневное время смотреть на солнце через ветровое стекло, на нем тоже можно увидеть похожие полосы.

Часто кажется, что полоса света от лампы или солнца не плоская, что это яркая линия, ведущая от ветрового стекла к источнику света. Искривленные полосы напоминают тропинку, которая берет начало в долине, а затем взбирается на холм. Почему появляются такие полосы и что придает им глубину?

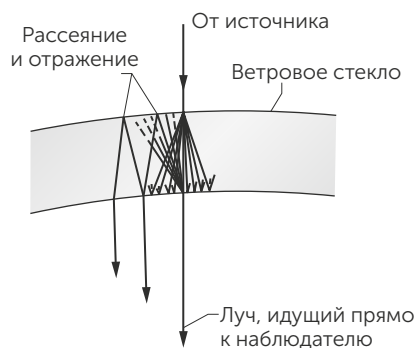
Ночью на ветровом стекле можно видеть еще много разных не столь ярких полос и пятен. Обычно пятна разбросаны по стеклу случайным образом, но иногда они «выстраиваются», образуя прямые или изогнутые линии. Есть полосы, которые, как кажется, проходят через источник света. Хотя этим они напоминают полосы, описанные выше, но в отличие от них не указывают на какую-то определенную точку на ветровом стекле. Такие полосы иногда видны не только через ветровое стекло. Иногда их можно увидеть даже через очки.

**ОТВЕТ •** Щетки дворников проделывают дугообразные бороздки в налипшей на ветровом стекле грязи. Рассеянный на бороздке свет расходится плоским веером в направлении, перпендикулярном касательной

к бороздке (см. предыдущую задачу). Свет, рассеянный на большом числе соседних бороздок, формирует полосу, которую мы видим. В зависимости от кривизны ветрового стекла такая полоска может быть либо прямой, либо изогнутой. В любом случае ее нижний конец указывает на центр дуги, то есть на место крепления дворника.



(a)



(б)

**Рис. 6.40 / Задача 6.106.** а) Полоски и пятна на ветровом стекле машины. б) Внутреннее отражение внутри ветрового стекла.

Полоса не кажется плоской, потому что на самом деле каждый глаз видит свою полосу. Меньше всего эти две полосы расходятся на том конце, где мы видим источник света, а вблизи шарнира дворника расстояние между ними самое большое. Мозг человека объединяет эти два изображения в одно. В нашем восприятии участки, разнесенные на большее расстояние, кажутся ближе тех участков, расстояние между которыми меньше. В случае широкого источника света уходящая вглубь полоска выглядит странно: она самая широкая там, где мы видим такой источник, но этот участок полоски воспринимается как самый отдаленный. Эта картина полностью противоположна обычной,

которую мы видим, глядя на уходящую вдаль настоящую дорожку.

На ветровом стекле и на самых разнообразных стеклах и пластиках можно видеть и полосы другого типа. Причина их появления — прямые лучи света, идущие к вам от источника через слой стекла и рассеивающиеся внутри этого слоя (рис. 6.40б). Когда луч света проходит через слой, возникает частичное отражение. Световые лучи, оставаясь внутри слоя, могут еще много раз отражаться от его внутренних поверхностей, но при каждом отражении часть света покидает слой. Если слой искривлен и вы смотрите на вогнутую поверхность, видны не только световые лучи, идущие прямо к глазам, но в какой-то мере и лучи, выходящие из слоя стекла сбоку от направления вашего взгляда. Вы видите полосу, уходящую прямо вдоль линии, направленной от вас к источнику света. Если каким-то образом сделать невозможным попадание прямых лучей света от источника на стекло, например, высунувшись из окна машины, закрыть пальцем нужное место снаружи ветрового стекла, полоса исчезнет. (Не забудьте съехать с проезжей части и остановить машину. Этот эксперимент не стоит того, чтобы потерять руку в результате дорожного происшествия.)

Яркие пятна — результат рассеяния или отражения от брызг грязи, прилипшей к ветровому стеклу. Если стекло искривлено, можно увидеть и световые лучи, исходящие от заляпанных грязью участков стекла. В этих местах видны яркие пятна.

### 6.107 • ОТРАЖЕНИЯ ОТ ГРАМПЛАСТИНКИ

Расположите на столе виниловую пластинку так, чтобы ее центр оказался примерно посередине между вами и небольшой настольной лампой, освещающей пластинку. Потушите в комнате остальной свет (в комнате должно быть темно), закройте один глаз и посмотрите на отражения на пластинке. Вы увидите, что ее поверхность освещена неравномерно. Нет на ней и одного яркого пятна, как было бы при отражении лампы в зеркале. Вместо этого на пластинке видны яркие узкие линии.

Меняя положение пластинки, можно добиться того, что на ней будут видны пересекающиеся линии или две линии, напоминающие гиперболы. В обоих случаях по крайней мере одна из линий будет проходить через центр пластинки. Иногда на пластинке, всегда на той линии, которая проходит через ее центр, появляется особо яркое пятно. Похожую картину из ярких пятен

можно иногда увидеть, посмотрев ночью через оконные жалюзи на уличный фонарь. Вы можете объяснить, что вы видите?

**ОТВЕТ** • Все бороздки на пластинке наклонены так, что отраженные от них лучи направлены под углом вверх. Однако видны только те места на пластинке, где отраженные от бороздок лучи имеют нужный наклон. Это места, откуда отраженный свет уходит в направлении вашего глаза. Расположение этих бороздок соответствует ярким линиям, которые вы видите. Особо яркое пятно — зеркальное отражение лампы от пластинки. Эта ситуация напоминает солнечную и лунную дорожки (задача 6.39).

Отражения на пластинке похожи на полосы света на ветровом стекле машины (см. предыдущую задачу), и если источник света достаточно яркий, как и на ветровом стекле, картина отражений может казаться объемной.

#### 6.108 • РАЗНЫЕ ЦВЕТА НА ПРЕДМЕТАХ С МЕЛКИМ РЕЛЬЕФОМ

Если на CD- или DVD-диск или на тисненую бумагу некоторых сортов направить белый свет, отражение будет ярким и красочным. Если виниловую пластинку определенным образом ориентировать по отношению к падающему свету, можно добиться того, что она тоже будет казаться разноцветной.

Хотя кажется, что свет уличного фонаря белый или желтоватый, он излучает свет нескольких цветов. Это можно увидеть и сфотографировать, прикрепив недорогую дифракционную решетку (кусочек пластика с мелкими бороздками или узкими прорезями) к объективу фотоаппарата. Если просто смотреть на фонарь через объектив, его прямое изображение кажется обычным, но края изображения могут быть окрашены из-за хроматических аберраций объектива.

Почему в каждом из этих случаев исходно белый свет разлагается на разные цвета?

**ОТВЕТ** • При рассеянии (преломлении) света системой мелких углублений происходит конструктивная и деструктивная интерференция световых волн. Возьмем пятно, которое выглядит красным. Это значит, что при рассеянии в этом месте белого света входящие в его состав волны красного света, которые уходят в направлении глаз наблюдателя, интерферируют конструктивно, то есть они распространяются с одинаковой

фазой и усиливают друг друга. Волны других цветов, рассеивающиеся в направлении наблюдателя, интерферируют деструктивно, то есть они распространяются не в фазе и ослабляют друг друга. Поэтому в отраженном в этом месте свете доминирует красный цвет. Другие пятна наблюдатель видит под другими углами, и в отраженном от них свете преобладают другие цвета.

Чтобы заметить разложение на цвета, в вашем поле зрения (и в «поле зрения» лампы) расстояние между бороздками должно быть небольшим, порядка длины волны видимого света. Если свет падает на виниловую пластинку прямо и вы смотрите на нее прямо сверху, расстояние между бороздками слишком велико, чтобы произошло разложение белого света на цвета, и поэтому вы видите только черный пластмассовый диск. Чтобы разложить белый свет на цвета видимого спектра, надо направить свет практически вдоль поверхности диска. Если ваш взгляд также направлен вдоль поверхности диска, то в вашем поле зрения (и в «поле зрения» лампы) бороздки на ближнем к вам и дальнем от вас краях пластинки будут достаточно близко друг к другу, так что разложение белого света на цвета будет заметно.

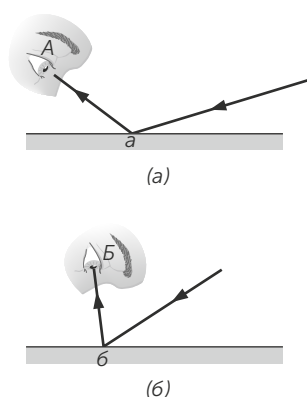
#### 6.109 • ПРОТИВ ПОДДЕЛОК: ОПТИКО-ПЕРЕМЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Одним из элементов защиты кредитных карт, водительских удостоверений и других идентификационных пластиковых документов являются оптико-переменные изображения, меняющиеся при наклоне карточки. Часто такие изображения называют голограммами — это разновидность фотографий, позволяющих создавать объемное изображение. Действительно, самые ранние объемные изображения на кредитных карточках были голограммами. Однако использование голограмм как элементов защиты оказалось не слишком удачным решением. Во-первых, они темные и нечеткие: их трудно рассмотреть в обычном магазине, где освещение не всегда яркое. Во-вторых, что гораздо хуже, голограмму легко подделать. Используемые сегодня оптико-переменные изображения яркие, четкие, их легко рассмотреть в магазине и трудно подделать. Как объемные изображения делают яркими и защищенными от подделок?

**ОТВЕТ** • На большинство кредитных карточек сейчас наносят оптико-переменные рисунки. Они видны при дифракции рассеянного света (именно такой свет обычно бывает в магазине) на участках с очень мелким



рельефом, который называют защитной решеткой. От решетки отражаются сотни или даже тысячи световых волн. Глаз человека, смотрящего на карту, воспринимает какую-то часть этих волн, и они вместе создают мнимое изображение. Это изображение можно назвать логотипом кредитной карты. Если, например, наблюдатель смотрит в направлении **A**, в точке **a** решетка создает некое заданное изображение (рис. 6.41a). Но когда наблюдатель смотрит в направлении **B**, в точке **б** решетка создает другое изображение (рис. 6.41б). Эти изображения яркие и четкие, поскольку параметры решетки подобраны так, чтобы они были видны в рассеянном свете.



**Рис. 6.41 / Задача 6.109.** а) В точке **a** решетка отражает свет к наблюдателю, взгляд которого ориентирован в направлении **A**, в результате чего получается некое заданное мнимое изображение. б) В точке **б** решетка отражает свет к наблюдателю, взгляд которого ориентирован в направлении **B**, так что создается другое мнимое изображение.

Подобрать параметры защитной решетки очень трудно, поскольку надо определить, какими свойствами должен обладать рельеф решетки, чтобы под одним углом зрения было видно одно заданное изображение, а под другим — другое. Эта работа требует сложного компьютерного моделирования.

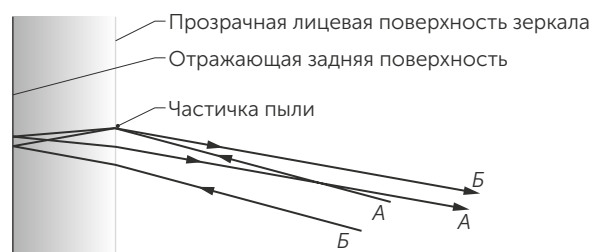
### 6.110 • ЦВЕТНЫЕ КОЛЬЦА НА ЗАПОТЕВШЕМ ИЛИ ПЫЛЬНОМ ЗЕРКАЛЕ

Приняв горячий душ, потушите свет в ванной, станьте лицом к запотевшему зеркалу и зажгите спичку. Спичку надо держать не прямо перед глазами, а чуть сдвинув ее в сторону. Вы увидите, что изображение пламени в запотевшем зеркале окружено цветными кольцами. Кольца будут видны и в том случае, если зеркало покрыто не капельками воды, а пылью или пудрой.

Затем в темной комнате встаньте спиной к ярко освещенному окну и поставьте перед собой запотевшее зеркало. Меняя расстояние до зеркала, в какой-то момент вы увидите круги, наложенные на ваше отражение. Подобрав расстояние, как-то вместо глаз я увидел фантазмагорический набор цветных колец. И опять зеркало может быть не запотевшим, а пыльным.

**ОТВЕТ •** В этих двух опытах свет по-разному рассеивается (преломляется) частицами — капельками воды или пылинками — на зеркале. Вот две основные возможности.

В первом случае кольца центрированы вокруг небольшого источника света, расположенного чуть в стороне от направления вашего взгляда на зеркало. При такой постановке опыта каждая частица рассеивает свет обратно в направлении от зеркала. Лучи рассеянного света попадают внутрь круговой области с ярким центром, окруженным попеременно яркими и темными кольцами. Угол рассеяния зависит от длины волны света. Поскольку эти углы разные для света разных цветов, мы видим разноцветные кольца. А именно, так как угол рассеяния лучей красного цвета чуть больше угла рассеяния лучей синего цвета, наружное кольцо красное, а внутреннее синее. На самом деле, мы не видим целиком всю картину распределения света, рассеянного каждой из частиц на зеркале. Но в совокупности тот рассеянный свет, который мы видим, тоже формирует освещенный круг, центр которого, как нам кажется, совмещен с отражением источника света.



**Рис. 6.42 / Задача 6.110.** Два пути, по которым до наблюдателя доходят лучи света, рассеянные пылинкой на лицевой поверхности зеркала.

Во втором случае большой источник света располагается у вас за спиной, а зеркало находится перед вами. Теперь круги центрированы вокруг ваших глаз. При такой постановке опыта круги возникают благодаря двум системам лучей, рассеянных частицами в направлении

наблюдателя (рис. 6.42). Рассмотрим одну частицу. 1. Преломленный на ней луч света (луч А на рисунке) проходит к задней блестящей поверхности зеркала, откуда отражается в направлении наблюдателя. 2. На выbranной нами частице рассеивается луч, уже отразившийся от задней поверхности зеркала (луч Б).

Световые волны двух типов интерферируют, достигнув наблюдателя. От некоторых частиц они приходят к наблюдателю не в фазе (имеет место деструктивная интерференция) и гасят друг друга. Рассеянные световые волны от других частиц приходят к наблюдателю с одинаковой фазой. В этом случае интерференция конструктивная, и волны усиливают друг друга. Все вместе они образуют один из наборов концентрических ярких и темных колец, причем яркие кольца окрашены в разные цвета, поскольку одновременно с рассеянием происходит разложение света на цвета.

Какой из вариантов интерференционной картины вы видите, зависит от того, как вы ориентированы по отношению к источнику света. Если поместить небольшой источник света строго между вашими глазами и зеркалом, эти две картинки будут перекрываться.

#### 6.111 • ЦВЕТ МОЛОКА В ВОДЕ

Под небольшим аквариумом с водой (подойдет любой сосуд с прозрачными плоскими стенками) установим источник белого света и направим его узкий луч через аквариум. При выключенном верхнем свете начнем капать в воду цельное (не обезжиренное) молоко. Сначала луч света в воде практически не виден, но затем он становится хорошо различим. Продолжим капать молоко и будем следить за цветом луча в воде, глядя либо сбоку, либо почти прямо на источник света. Через какое-то время мы обнаружим, что луч имеет голубоватый оттенок, если смотреть на него сбоку, и красноватый, если сверху. Почему луч меняет цвет? Почему молоко, которое мы пьем, белое, а не красное или голубое?

**ОТВЕТ •** Молоко содержит частицы белка и жира размером от десятых долей микрона до нескольких микрон; на этих частицах рассеивается свет. Угол рассеяния цветов синей области видимого спектра больше, чем у цветов красной области спектра. Когда концентрация частиц увеличивается настолько, что цвета можно заметить, то, если смотреть в аквариум сбоку, основной цвет луча будет голубым, а если смотреть сверху, по направлению распространения луча, то красным.

Отдельные цвета заметны, только если концентрация частиц не слишком велика. Когда их становится слишком много, как обычно бывает в молоке, свет, прежде чем покинуть сосуд, рассеивается много раз. Тогда с какого направления ни смотри, глаз в равной мере воспринимает цвета из красной и синей областей спектра. Их комбинация определяет белый цвет молока.

Если вылить почти все молоко из стакана, оставив на дне совсем немного, вдоль края молочной лужицы можно увидеть чистую яркую полосу. Она видна там, где поверхность молока искривляется, так как благодаря смачиванию молоко чуть поднимается вдоль стенок стакана. При отражении от искривленной поверхности свет концентрируется, и поэтому здесь он ярче света, отраженного от остальной поверхности молока.

#### 6.112 • ЦВЕТ ДЫМА ОТ КОСТРА

На темном фоне, например на фоне лесных зарослей, дым, поднимающийся от костра, кажется голубоватым, но на ярком фоне, например на фоне солнечного неба, в нем заметны оттенки желтого, красного или оранжевого. Почему цвет дыма разный при разных условиях наблюдения?

**ОТВЕТ •** Дым — дисперсная система, состоящая из мелких твердых частиц. Рассеяние света зависит от размера частиц, и на этих частицах сильнее рассеивается синий. Если мы наблюдаем дым на темном фоне, а свет попадает в дым сбоку или из-за нас, то мы видим рассеянное дымом излучение, и оно синеватое. Если же источник яркого света находится за дымом, то мы видим это яркое излучение, из которого при прохождении через дым изъята рассеиванием часть синего, и пришедшее к нам излучение немного красноватое.

#### 6.113 • ЭФФЕКТ АНИСОВОГО ЛИКЕРА

Некоторые алкогольные напитки содержат анис. В Греции такой ликер называется *узо*, во Франции — *пастис*, в Турции — *раки*, а в Италии *самбука*. Все они ведут себя необычно: когда в изначально вполне прозрачный напиток постепенно добавляют воду, он вдруг становится молочно-белым. На что влияет вода и почему меняется цвет ликера? Добавляя в молочно-белый напиток алкоголь, можно добиться обратного эффекта.

**ОТВЕТ •** Каждый из этих напитков — однородный раствор анисового масла в этиловом спирте. Когда на этот раствор направляют луч света (например, солнечный

луч), пройдя через раствор, он выходит с противоположной стороны сосуда, оставаясь лучом. Когда в раствор добавляют воду (третью жидкость), ситуация меняется, поскольку анисовое масло не растворяется в воде. Сначала напиток прозрачен (проходя через него, луч света остается лучом). Однако когда концентрация воды повышается и достигает некоторого критического значения, молекулы масла неожиданно начинают образовывать взвешенные в жидкости капли. Говорят, что в системе произошел фазовый переход: однородный раствор превращается в неоднородную дисперсную систему, состоящую из микроскопических капелек жидкости, распределенных в другой жидкости, то есть в эмульсию. Капли рассеивают видимый свет. Поэтому любой луч света, направленный на напиток, много раз рассеивается, что вызывает помутнение напитка и придает ему молочный оттенок. Если после этого в напиток добавить еще алкоголь, благодаря чему концентрация воды станет ниже критического значения, произойдет обратный фазовый переход, и ликер снова станет прозрачным.

#### 6.114 • ЦВЕТ МАСЛЯНЫХ ПЯТЕН, МЫЛЬНОЙ ПЛЕНКИ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КАСТРЮЛИ

Почему масляные пятна на мокрой улице окрашены во все цвета радуги? Почему этого нет, если улица сухая? Почему масляные пятна бывают цветными, даже если солнце спряталось за тучи?

Почему мыльные пленки и мыльные пузыри разноцветные? Почему, когда пленка становится слишком тонкой или слишком толстой, она перестает быть цветной? Ведь не окрашены подобным образом предметное стекло микроскопа или оконные стекла.

Пусть мыльная пленка, удерживаемая в вертикальном положении, освещена спереди лучом белого света. По мере того как под действием силы тяжести вода в этой пленке стекает вниз, горизонтальные цветные полосы на ней тоже смещаются вниз, а затем, если фон позади пленки темный, сверху она становится черной, перед тем как лопнуть. Как ярко освещенная спереди пленка может стать черной? Если осторожно осмотреть черный участок пленки, можно заметить особо темные пятна. Как они появляются? Почему сразу за черным участком идет белая, а не синяя полоса? Ведь среди всех цветов видимого спектра у синего цвета самая маленькая длина волны, поэтому именно в синий цвет должен был бы окраситься очень тонкий участок пленки под темной областью.

Иногда кажется, что на металлической кастрюле, даже если ее тщательно вымыли, есть цветные пятна. Почему они появляются? Похожие цветные пятна можно увидеть, когда масло стекает по полированной металлической поверхности. Почему мы их не видим, если поверхность неполированная?

**ОТВЕТ** • При освещении белым светом прозрачного слоя, или пленки, толщиной приблизительно совпадающей с длиной волны видимого света, может происходить разложение света на цвета видимого спектра. Предположим, что луч определенного цвета падает перпендикулярно на такую пленку (рис. 6.43). Часть света отражается от внешней поверхности пленки, а часть проникает внутрь пленки, проходит через нее, отражается от внутренней поверхности, проходит через пленку в обратном направлении и выходит из нее. Глаз воспринимает две исходящие от пленки волны. Эти волны интерферируют. Если волны распространяются в фазе (синхронно), интерференция конструктивная (волны усиливают друг друга), и на пленке получается яркое пятно соответствующего цвета. Если окажется, что волны распространяются не в фазе (несинхронно), интерференция деструктивная (волны стремятся погасить друг друга), и мы видим на пленке темное пятно.

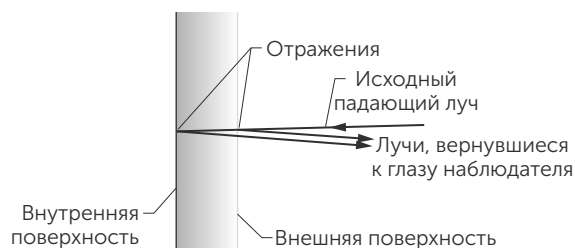


Рис. 6.43 / Задача 6.114. Свет, отраженный в направлении наблюдателя от внешней и внутренней поверхностей тонкой пленки.

Толщина пленки — один из факторов, определяющих, для какого цвета выполняются условия усиления или гашения. Поэтому, когда под влиянием силы тяжести вертикальная пленка стекает, утолщаясь внизу, на разных высотах появляются разные яркие цветные полосы. Меняя расстояние и угол зрения, наблюдатель меняет расстояние, которое проходит отраженный от пленки и достигающий его свет. Это значит, что меняется яркость цветов, которые он видит. *Иризацей*, или *радужным эффектом*, называют изменение цвета

при изменении ракурса. Голубая рубашка всегда голубая, поскольку красителям не свойственна иризация — красители работают иначе: они поглощают часть спектра и рассеивают остальное.

Игра цветов видна и на масляном пятне, когда разлитое масло образует на воде тонкую пленку. Разноцветные масляные пятна видны и тогда, когда солнце закрыто облаками, но на небе есть особенно яркий участок. На сухой улице из-за шероховатости дорожного покрытия толщина пленки масла непостоянна. Световые волны разных цветов, соответствующие разным толщинам пленки, перекрываются, и пятно выглядит тусклым и, возможно, даже бесцветным.

Когда под действием силы тяжести вода в вертикальной мыльной пленке стекает вниз, сверху пленка истончается, и в какой-то момент ее толщина становится гораздо меньше длины волны света. Все световые волны, отражающиеся от этого участка, почти полностью гасят друг друга, и поэтому верхняя часть пленки выглядит черной. В этот момент дальнейшее уменьшение толщины пленки может прекратиться. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, слои молекул мыла на противоположных поверхностях пленки сближаются настолько, что их электростатическое отталкивание друг от друга становится существенным. Во-вторых, по-видимому, молекулы воды на обеих поверхностях пленки упорядочиваются (образуя нечто напоминающее кристалл), и эти структуры начинают перекрываться. Поскольку перекрытие связано с затратой энергии, на этой стадии истончение пленки прекращается. Несмотря на это, тонкие пленки нестабильны и могут внезапно разорваться и распасться. Однако если пленка содержит заряженные примеси, она может и дальше истончаться, не разрываясь. Такие особо тонкие места выглядят особенно темными на фоне черного участка тонкой пленки.

Сразу за черным участком идет бледно-синяя полоса, поскольку волны синего света испытывают *неполную конструктивную интерференцию* (они распространяются не совсем синхронно и поэтому лишь в какой-то мере усиливают друг друга). Однако эту голубую полосу трудно различить, и может показаться, что первая полоса, которая видна под черным участком, белая. Толщина этого участка пленки такова, что интерференция волны разных цветов видимого спектра не совсем конструктивная, и их комбинация воспринимается как белый цвет. Ниже, за белой полосой, идет желто-красная (оранжевая) полоса, затем

сине-красная (лиловая), и только затем следует полоса почти чистого синего цвета.

По мере того как пленка стекает, она утолщается снизу, и там цветные полосы начинают перекрываться. Постепенно они перекрываются до такой степени, что эта часть пленки становится белой. Толстые пленки, такие как предметные стекла микроскопа и оконные стекла, не дают интерференционных картин по двум причинам. Во-первых, для получения интерференционной картины в толстой пленке нужен чрезвычайно узкополосный (монохроматический) источник. Во-вторых, поскольку толщина этих объектов колеблется от точки к точке, она не поддерживается постоянной с точностью порядка длины волны света, что необходимо для получения интерференционных картин.

Благодаря тонкой окисной пленке цветные полосы достаточно часто можно видеть на вытертой насухо металлической кастрюле. Кроме того, если на металле есть тонкий слой масла и он блестит, масляный слой тоже может приводить к образованию цветной интерференционной картины. Правда, если поверхность шероховатая, свет, отражающийся от внутренней поверхности маслянистого слоя, рассеивается в случайных направлениях и разрушает интерференционную картину.

#### 6.115 • СТРУКТУРНАЯ ОКРАСКА НАСЕКОМЫХ, РЫБ, ПТИЦ И ОБЕЗЬЯН

В перьях канарейки есть пигмент, поглощающий все цвета, входящие в состав белого света, кроме желтого, и поэтому канарейка желтая. В окружающем нас мире разнообразие цветов, включая и окраску животных, чаще всего объясняется наличием подобных пигментов. Однако окраска многих животных обусловлена не пигментацией, а необычными оптическими свойствами поверхности их тела (крыльев, раковин, перьев, кожи и т. д.).

У некоторых бабочек и других насекомых переливатые крылья: их цвет меняется в зависимости от того, под каким углом и с какого расстояния на них смотреть. Один из впечатляющих примеров — крылья бабочки морфо. Хотя в ее крыльях присутствует коричневый пигмент (их нижняя сторона коричневая), сверху они переливаются разными оттенками голубого цвета.

Сельдь использует сходный (хотя и несколько более сложный) оптический эффект, придающий ее чешуе серебристо-белый цвет. Благодаря такой окраске хищнику труднее различить сельдь в воде.



Надкрылья некоторых тропических жуков-вертячек хорошо отражают белый солнечный свет, если смотреть на них под определенным углом. Однако при других углах зрения они привлекают внимание своей переливчатой окраской. Некоторые другие жуки также демонстрируют при разных углах зрения либо сильное отражение либо радужную окраску. Наверное, самые интересные структурные цвета можно наблюдать у пластинчатоусых жуков, надкрылья которых действуют как жидкий кристалл, отражающий яркий свет различных цветов. А жуки-скакуны, наоборот, используют оптические эффекты для маскировки. Их поверхность отражает только свет, по цвету напоминающий почву в местах их обитания.

У некоторых млекопитающих кожа ярко окрашена. Например, у самцов обезьян мандрилов морда, ягодицы и мошонка голубые. Их окраска хотя и очень яркая, но не переливчатая. Другие оптические эффекты ответственны за синие и белые пятна у гусениц коконопрядов и голубой сойки. В зависимости от влажности передние крылья жука-геркулеса либо желтые, либо черные. Если влажность неожиданно меняется, жуку требуется всего несколько минут, чтобы изменить их цвет.

С чем связана окраска животного во всех этих случаях?

**ОТВЕТ •** Многие бабочки своей переливчатой окраской обязаны прозрачным пленчатым образованиям типа чешуек, на которых происходит интерференция света. На верхней поверхности крыльев бабочки морфо эти чешуйки налегают друг на друга, образуя ступенчатую структуру. Толщина чешуек и расстояние между ними по вертикали таковы, что, когда через них проходит белый свет, возникает конструктивная интерференция волн синего цвета, отраженных от двух расположенных последовательно одна за другой (скажем, верхней и следующей за ней нижней) чешуек. Интерференция отраженных волн других цветов, входящих в спектр белого света, либо неполная, либо полностью деструктивная, и поэтому мы видим только синий свет, отраженный от крыльев бабочки. Когда угол зрения меняется, слегка меняется путь, который проходит свет до того, как достигает наших глаз. Из-за этого меняется длина волны, или, иначе говоря, оттенок испытывающих конструктивную интерференцию волн. Поскольку оттенок крыльев меняется в зависимости от угла зрения, крылья кажутся переливчатыми.

Окраска сельди тоже объясняется интерференцией света на чешуе, но у этих рыб чешуи образуют три перекрывающиеся структуры, каждая из которых обеспечивает конструктивную интерференцию отраженного света разных частей видимого спектра. Если наблюдатель видит яркий свет, отраженный одновременно от всех трех структур, ему кажется, что цвет белый. Но этот белый цвет не совсем обычный: окраска рыбы слегка меняется, если изменить угол зрения и расстояние до нее. Сельдь трудно разглядеть в воде, поскольку цвет отраженного ею света мало чем отличается от цвета окружающей ее воды.

Надкрылья тропических водных жуков-вертячек покрыты узкими чешуйками, расположенными наподобие дифракционной решетки — оптического устройства, которое обычно состоит из большого числа параллельных узких желобков, создающих интерференционную картину. Если смотреть на яркую центральную часть «дифракционной решетки» на надкрыльях жука, их поверхность кажется ярко-белой. Если же смотреть на яркие участки сбоку, то благодаря дифракции лучи разных цветов достаточно расходятся, и можно разглядеть отдельные цвета. Когда эти жуки кружатся в воде, быстрое изменение цвета и интенсивности окраски их надкрылий приводит в замешательство охотящихся на них хищников.

У пластинчатоусых жуков множественные отражения создаются не чешуйками, а своеобразным расположением микрофибрилл хитина. Параллельно уложенные микрофибриллы располагаются слоями так, что в каждом следующем слое их ориентация несколько смещена относительно предыдущего. Когда солнечный свет проникает сквозь эти слои, отражения от разнесенных на определенное расстояние слоев подвергаются конструктивной интерференции, так что надкрылья жуков словно испускают разноцветное сияние.

Чтобы оставаться незаметными на земле, жуки-скакуны должны быть коричневыми или черными, но на самом деле они разноцветные. Например, на надкрыльях скакунов *Cicindela oregona* имеются круглые сине-зеленые пятна, окруженные красным. Эти цвета — результат интерференции света на чешуйках кутикулы, покрывающих надкрылья. Если наблюдать за жуком в его естественной среде обитания, зрительная система смешивает цвета, и создается впечатление, что жук окрашен в коричневый цвет. Сходным образом наша зрительная система воспринимает комбинацию различных цветов от очень маленьких, отдельно



неразличимых участков, когда мы смотрим на цветной экран или картину художника-пуантилиста.

Голубой цвет кожи мандрила и некоторых других млекопитающих — результат почти периодического (квазипериодического) расположения коллагеновых волокон в дермальном слое кожи. На каждом микроскопическом участке эти волокна параллельны друг другу, а расстояние между ними и их толщина таковы, что рассеянный обратно кожей свет является голубым. В некоторых местах у обезьян, например на морде, коллагеновых волокон так много, что в отраженном от кожи свете доминирует синий цвет. В других местах, например на ягодицах, коллагеновых волокон меньше, но под слоем коллагена имеется слой, содержащий поглощающий свет темный пигмент меланин. На темном фоне голубой свет, рассеянный обратно кожей, особенно заметен. Кожа обезьян хоть и яркая, но не переливатая: для этого требуется, чтобы структурированные рассеивающие свет участки были разнесены шире.

Синие пятна гусениц коконопрядов — результат рассеяния света на покрывающих их тело волосках из плотной эпителиальной ткани. Под этими волосками — темная поверхность. Волоски настолько малы, что в направлении наблюдателя они рассеивают главным образом синий свет. Остальной свет доходит до темной поверхности, где и поглощается. Поэтому в этих местах мы видим синие пятна. В тех местах, где видны белые пятна, поверхность под волосками либо отражает, либо рассеивает свет в направлении наблюдателя, и поэтому здесь пятна не кажутся темными. Синий свет, рассеянный волосками, теряется на фоне более яркого белого света, исходящего от поверхности под ними.

У голубой сойки перья сине-голубые благодаря преимущественному рассеянию света синей области видимого спектра маленькими клетками с ячеистой структурой в бороздках перьев. Цвет оперения других птиц зависит одновременно и от рассеяния света, и от пигментации, или, возможно, еще от каких-то других вариантов интерференции световых волн.

Твердые кожистые надкрылья жука-геркулеса состоят из тонкой прозрачной пленки, покрывающей желтый губчатый слой. Ниже губчатого слоя лежит черная ткань. Когда губчатый слой заполнен воздухом, в рассеянном им свете остается практически только желтый свет, и, следовательно, надкрылья кажутся желтыми. В условиях повышенной влажности губчатый слой заполняется водой, и он становится более прозрачным: через этот слой проходит больше света,

который поглощается нижним черным слоем. Тогда надкрылья выглядят черными.

### 6.116 • ЖЕМЧУГ

В чем причина блеска и игры света на жемчужинах и на внутренних поверхностях раковин, в которых они растут?

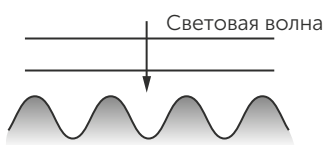
**ОТВЕТ •** Переливчатая окраска (изменение цвета при изменении угла зрения) — результат интерференции световых волн, а не просто поглощения света пигментами. Жемчужина состоит из *перламутра*, структура которого напоминает скрепленные цементом кирпичики из карбоната кальция (в форме кальцита или арагонита) в матрице из больших органических молекул. Плоские пластинки арагонита (кирпичики) разделены очень узкими щелями материала матрицы (слой цемента). Блеск и переливчатая окраска жемчужин появляются скорее благодаря рассеянию света на таких щелях, а не внутри кирпичиков. Эти щели представляют собой некое подобие дифракционной решетки. Более широкие щели приводят к яркой интерференционной картине (*конструктивная интерференция*) длинных световых волн (из красной области видимого спектра). Чтобы на поверхности жемчужины был ярко и отчетливо виден какой-нибудь чистый цвет, щели должны быть примерно одинаковой ширины, и расстояния между ними должны быть примерно одинаковыми. Тогда рассеянные на щелях волны усиливают друг друга. Если расстояния между щелями и их ширины варьируют, жемчужина становится блеклой и тусклой. Этим объясняется черный цвет некоторых жемчужин, но, возможно, в них имеется и пигмент, создающий темный фон.

### 6.117 • БУГОРКИ НА ГЛАЗАХ НАСЕКОМЫХ И САМОЛЕТЫ-НЕВИДИМКИ

Сложный глаз насекомых состоит из множества структурных единиц, или *омматидиев*, через которые проходит свет и в которых начинается обработка зрительной информации. Насекомое видит мозаику из изображений, создаваемых омматидиями. У многих насекомых внешняя поверхность омматидия гладкая. Но у некоторых из них она сплошь покрыта крохотными коническими бугорками. Какова же их функция? Физический эффект, объясняющий, зачем нужны эти бугорки, имеет отношение и к поглощающим поверхностям самолетов-невидимок, и к покрытиям окон с двойными и тройными стеклами.

**ОТВЕТ** • Одна из характеристик оптических свойств материала — коэффициент преломления, определяющий скорость света в данном материале. Когда свет проходит через поверхность, разделяющую среды с разными коэффициентами преломления, он частично отражается от этой пограничной поверхности, а оставшаяся часть проходит через нее. Например, если луч света направить на слой стекла, часть света отразится от поверхности раздела «воздух — стекло».

Поскольку коэффициент преломления омматидия больше, чем воздуха, на границе между ним и воздухом происходит частичное отражение света, и не весь падающий на глаз свет принимает участие в создании изображения. А отражательная способность омматидиев с бугорками гораздо меньше, и поэтому в глаз проникает гораздо больше света. Преимущество такой неровной поверхности связано с формой бугорков: на выступающем конце они уже, чем у основания (рис. 6.44). При наличии выступов световая волна падает не на гладкую поверхность, составленную из омматидиев, а переотражается с выступа на выступ — это уменьшает итоговое отражение, и внутрь глаза попадает больше света.



**Рис. 6.44 / Задача 6.117.** Бугорки на поверхности глаза насекомого уменьшают количество отраженного от глаза света.

Подобное решение применяется в строительстве. В регионах с холодным климатом любое отражение от стекла означает, что в помещение поступает меньше света, а значит, свет меньше обогревает его. В этих случаях, чтобы уменьшить отражение, поверхность одного или нескольких оконных стекол покрывают неровной пластиковой пленкой.

Затруднить обнаружение самолета-невидимки с помощью радара можно, если на его поверхности есть выступы, обеспечивающие поглощение радиоизлучения в области спектра обнаружения. Когда поверхность самолета ровная, поглощается только часть сигнала радара, а оставшаяся часть отражается. (Сходная ситуация возникает, когда видишь блики света на черном стекле: хотя существенная часть падающих лучей поглощается, отраженного света достаточно, чтобы увидеть стекло.) На поверхности самолета-невидимки

имеются шероховатости, расстояние между которыми меньше длин волн радара, лежащих в микроволновом диапазоне. Излучение радара, падающее на неровную поверхность, постепенно поглощается, и отражение в направлении детектора радара уменьшается.

### 6.118 • ПЕРЕЛИВЧАТЫЕ РАСТЕНИЯ

В густой, почти непроницаемой тени тропического леса растения получают очень мало света. Именно это может быть причиной того, что некоторые растущие здесь папоротники и цветковые растения переливаются синим и зеленым цветом, а у других растений листья имеют бархатистый отлив из-за выпуклой формы эпидермальных клеток. Как в условиях плохой освещенности эти свойства помогают растениям выжить?

**ОТВЕТ** • Сине-зеленые переливы на поверхности папоротников связаны с интерференцией света, отраженного от расположенных друг над другом слоев целлюлозных волокон с разными оптическими характеристиками, то есть с разным коэффициентом преломления. Толщина этих слоев тоже разная. Такие слои ведут себя как набор тонких пленок. Отраженные световые волны с частотами из синей области видимого спектра имеют приблизительно одинаковую фазу и усиливают друг друга. Поэтому мы видим сине-зеленый отлив. Проходящие через слои волны света из красной области спектра тоже распространяются с почти одинаковыми фазами, усиливая друг друга, и красный свет попадает внутрь листьев (к хлоропластам, в которых происходит фотосинтез). Такое строение покровов позволяет растению поглощать больше света по сравнению с тем, которое оно поглотило бы в отсутствие интерференции. Некоторые растения имеют переливчато-синие плоды — тоже благодаря наличию тонких слоев, на которых происходит интерференция света.

Выпуклые эпидермальные клетки на бархатно-блестящих листьях имеют форму линз, фокусирующих свет на расположенных под ними хлоропластах. Это позволяет растениям выжить в условиях плохой освещенности.

### 6.119 • ПРОТИВ ФАЛЬШИВОМОНЕТЧИКОВ — ЦВЕТОПЕРЕМЕННАЯ КРАСКА

Правительства всех стран стремятся быть на шаг впереди фальшивомонетчиков, быстро осваивающих новейшие технологии для подделки бумажных купюр. Для пресечения их деятельности используются,

в частности, защитные нити, специальные водяные знаки (и то и другое можно увидеть, посмотрев купюру на просвет) и микропечать (микротекст выполнен точками, настолько маленькими, что их нельзя воспроизвести с помощью ксерокса). Однако труднее всего фальшивомонетчикам воспроизвести изменения цвета надписей на банкнотах, выполненных цветопеременной краской. Например, на лицевой стороне 20-долларовой американской банкноты в нижнем правом углу изображено число 20. Надпись выполнена цветопеременной краской. Если смотреть на нее сверху вниз, это число будет красным или красно-желтым. Если же купюру наклонить и посмотреть на нее под углом, оно станет зеленым. Копировальная машина может повторить цвет рисунка, соответствующий только одному углу зрения, а значит, воспроизвести изменение цвета она не может. Как же чернила меняют цвет?

**ОТВЕТ •** Цветопеременная краска, которую используют на банкнотах, меняет цвет в результате интерференции на прозрачных тонкопленочных включениях — чешуйках, взвешенных в обычных чернилах. Свет, попавший в обычные чернила над включениями, проходит через тонкие слои хрома (Cr), фторида магния ( $\text{MgF}_2$ ) и алюминия (Al). Слои хрома выполняют роль слабо отражающих свет зеркал, слои алюминия — роль зеркал, отражающих лучше, а слои  $\text{MgF}_2$  «работают» как мыльная пленка. В результате световые волны, отраженные вверх от каждой из границ между слоями, опять проходят через обычные чернила и интерферируют, достигая глаз наблюдателя.

В зависимости от толщины слоев  $\text{MgF}_2$  конструктивная интерференция, при которой волны усиливают друг друга, имеет место для волн разной длины (разных цветов). На американских банкнотах, напечатанных с использованием цветопеременной краски, толщина слоя  $\text{MgF}_2$  выбрана так, что при взгляде сверху происходит конструктивная интерференция волн, соответствующих красному или красно-желтому цвету. Когда банкноту наклоняют, наклоняется и каждое включение. Тогда условия конструктивной интерференции волн, достигающих наблюдателя, выполняются для волн, соответствующих зеленому цвету. Переход к другим длинам волн происходит из-за того, что свету требуется пройти более длинный путь через наклонные включения. Это значит, что, меняя угол зрения, наблюдатель меняет цвет изображения. В других странах используют другие тонкопленочные включения для изменения цвета на банкнотах.

В наши дни меняющие цвет чернила и краски доступны для коммерческого использования.

### 6.120 • НАСЫЩЕННЫЙ ЦВЕТ ЛЕПЕСТКОВ

На клумбе или в вазе цвет лепестков многих цветов меняется от лепестка к лепестку, но, если лепестки оборвать и разложить их рядом вплотную друг к другу на плоской поверхности, они все окажутся одного цвета. С чем связано изменение цвета лепестков при естественном их расположении?

**ОТВЕТ •** Когда лепестки лежат на плоской поверхности вплотную друг к другу, глаз воспринимает свет, отраженный от поверхности лепестка, только один раз. Благодаря поглощению света молекулами внутри лепестков в отраженном от лепестков свете, расходящемся в разных направлениях, некоторые цвета ослаблены. Например, красные лепестки гасят лучи из синей области видимого спектра, так что мы видим главным образом отраженные красные лучи. Однако если свет отражается от лепестков только один раз, как в случае с разложенными на плоской поверхности лепестками, поглощается не так много синего света, и красный цвет становится ненасыщенным (приглушенным).

То же самое можно сказать о цветах, у которых лепестки растут практически в одной плоскости. И в этом случае глаз воспринимает свет, отраженный от лепестков только один раз. Ситуация меняется, если лепестки собраны плотно и мы видим их под разными углами. Тогда есть лучи, которые до того, как будут восприняты нашими глазами, претерпевают несколько отражений. Фактически лепестки образуют «ловушку для света». Поскольку при каждом отражении поглощается какая-то часть лучей определенных цветов, оставшиеся цвета кажутся более насыщенными (глубокими). Более того, разглядывая лепестки один за другим или даже один лепесток, можно заметить, что насыщенность цвета меняется от точки к точке.

### 6.121 • СИЯНИЕ ЖЕЛТЫХ ЛИСТЬЕВ ОСИНЫ

Осенью, когда листья пожелтеют, посмотрите на солнце сквозь листву осины. Почему в этом случае листья на дереве ярче, чем когда солнце будет у вас за спиной?

**ОТВЕТ •** После того как листья стали желтыми, они независимо от направления взгляда наблюдателя поглощают синие лучи видимого спектра и пропускают желто-красные лучи, однако разные стороны листа

действуют с разной эффективностью. Если смотреть на них против солнца, то есть когда солнце светит в лицо, все листья одинаково хорошо «убирают» лучи синей области видимого спектра, поэтому свет, прошедший через листья, ярко-желтый. Когда же вы стоите к солнцу спиной, то видите и рассеянный листьями свет, и отраженный — из которого синий не вычтен. Поэтому в суммарном свете ослабление синего и относительное усиление желтого оказываются слабее.

### 6.122 • ЦВЕТ ГЛАЗ

От чего зависит цвет глаз человека? Почему глаза бывают голубыми, зелеными или карими (коричневыми)? Почему некоторые люди рождаются с голубыми глазами, а потом цвет глаз меняется и они становятся карими?

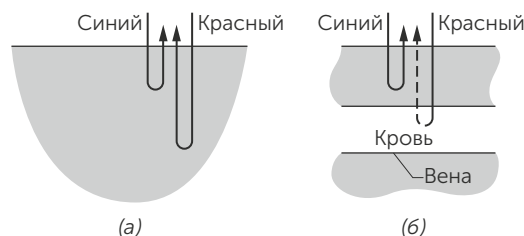
**ОТВЕТ** • Голубой цвет глаз обусловлен преимущественным обратным рассеянием синего света протеинами, жирами и другими частицами во внутриглазной жидкости, где они находятся во взвешенном состоянии. Мы видим этот цвет, если позади внутриглазной жидкости имеется темный фоновый слой. Если фон не слишком темный или на поверхности радужной оболочки имеются пигменты, синий цвет плохо различим, и глаза кажутся карими. Глаза выглядят зелеными, если имеется пигмент, поглощающий все цвета, кроме желтого, тогда при обратном рассеянии комбинация синих и желтых лучей воспринимается как зеленый цвет. Голубой цвет глаз может ослабнуть с возрастом, если частицы во внутриглазной жидкости становятся достаточно большими, так что на них рассеивается не только синий свет, но в равной степени свет всех цветов видимого спектра.

### 6.123 • ПОСИНЕТЬ ОТ ХОЛОДА

Почему бледнокожие европейцы синеют, когда им холодно? Почему чисто выбритая кожа европейца приобретает голубоватый оттенок? Почему вены голубые, а не красные? Ведь кровь все же красная, а не голубая.

**ОТВЕТ** • На поверхности кожи белого человека имеются частицы, рассеивающие синий свет сильнее всех остальных цветов видимого спектра. Однако интенсивность синего цвета слишком мала, и поэтому он виден только на темном фоне. Если на лице человека густая растительность, синий оттенок будет виден на чисто выбритой коже по контрасту, из-за того, что оставшиеся волосы создают темный фон. Когда светлокожий

европеец замерзает, кровенаполнение капилляров кожи уменьшается настолько, что кожа теряет свою розоватую окраску, и тогда можно различить рассеянный голубой свет. Именно поэтому кожа трупа тоже приобретает голубоватый оттенок.



**Рис. 6.45 / Задача 6.123.** а) Кожа рассеивает обратно и синий, и красный свет. Красный свет проникает глубже. б) Вена поглощает большое количество красного света; интенсивность рассеянного обратно красного света мала.

Вены кажутся голубыми, поскольку красный свет проникает в кожу глубже, чем синий. Чтобы понять, в чем тут дело, рассмотрим свет, рассеянный двумя соседними участками кожи. Участок кожи на рис. 6.45а расположен *не над* веной, а на рис. 6.45б — *над* веной. От участка *а* мы воспринимаем рассеянный в определенной пропорции как красный, так и синий свет. Наличие вены не влияет на рассеяние синего света на участке *б*, поскольку он не проникает внутрь кожи достаточно глубоко и не достигает вены. Однако прошедший глубже красный свет достигает вены и частично поглощается кровью. Таким образом, на участке *б* в рассеянном обратном свете интенсивность красного света *меньше*, чем на участке *а*.

Поскольку участки *а* и *б* соседние, мозг подсознательно сравнивает их цвета. Объективно на этих участках интенсивность рассеянного синего света одинакова, но на участке *б* интенсивность рассеянного красного света меньше. Из-за приглушенности красного цвета нам кажется, что на участке *б* синий цвет ярче, чем на участке *а*. Именно поэтому вена на участке *б* кажется голубой, то есть ее «раскрашивает» наш мозг.

### 6.124 • УЗОРЫ ИЗ ПЯТНЫШЕК

На многих освещенных солнцем поверхностях можно увидеть пятнистую структуру — узор из ярких и темных, часто цветных пятен. Сначала попробуйте увидеть эти узоры на плоской темной поверхности. Когда станет понятно, как их можно разглядеть, вы станете их замечать и на других поверхностях, например



на блестящем металле или даже на ногте. Такие узоры гораздо лучше заметны, если источником света является лазер.

Если, двигая головой, следить за тем, что происходит с узором из пятнышек, созданным лазером, может показаться, что он сдвигается либо в том же, либо в противоположном направлении. Иногда создается впечатление, что пятнышки не смещаются в одном направлении, а перемещаются хаотически. Что определяет то, как они двигаются?

В некоторых случаях пятнышки двигаются, даже если наблюдатель неподвижен. Налейте в ложку не до краев обычного, не обезжиренного, молока и посмотрите на нее при ярком солнце. Вы увидите, что по краям, там, где глубина молока меньше, «танцуют» яркие цветные пятнышки. Если красное яблоко или помидор осветить красным светом гелиево-неонового лазера (длина волны 0,63 мкм), на их поверхности можно будет увидеть колеблющиеся пятнышки. В чем причина появления всех этих пятнышек?

**ОТВЕТ •** Узоры из пятен, их называют спеклами (от англ. speckle — «крапинка», «пятнышко»), являются результатом интерференции световых волн, отраженных от поверхности. Волны, падающие на поверхность, имеют примерно одинаковую фазу, но из-за шероховатости поверхности на микроскопическом уровне для отраженных волн это условие не выполняется. Итак, световые волны, отраженные от углублений на поверхности, проходят чуть более длинный путь до глаза наблюдателя, чем волны, отраженные от соседних приподнятых участков. Таким образом, в зависимости от условий отражения в данном месте отраженные световые волны приходят к глазу наблюдателя либо в фазе, либо не в фазе. Это значит, что они либо усиливают, либо гасят друг друга. Короче говоря, некоторые места на поверхности яркие, а другие нет.

При свете лампы подобные узоры из пятнышек не видны, поскольку испускаемый ею свет — результат случайного излучения электромагнитных волн атомами. Это значит, что освещающие поверхность световые волны в один момент времени могут быть в фазе, а в следующий момент — в противофазе. При этом узоры из пятнышек меняются так быстро, что заметить их невозможно, и, следовательно, мы видим просто равномерно освещенную поверхность. Чтобы увидеть пятнистую структуру, нужен когерентный источник света (излучающий волны примерно с одинаковым

соотношением фаз). На практике это означает, что нужно использовать свет лазера.

Если зрение нормальное, кажущееся движение узора из пятнышек зависит от цвета, падающего на поверхность света. Это связано с тем, что в глазах световые волны разных цветов преломляются по-разному и поэтому кажется, что их источники находятся на разных расстояниях. Некоторые исследователи считают, что пятнышки, созданные лазером, можно использовать для проверки зрения, когда пациент, например маленький ребенок, не может назвать буквы на обычной таблице для проверки зрения.

«Танец» цветных пятнышек на молоке, вероятно, связан с движениями двух типов. Во-первых, по краю, где глубина молока маленькая, испарение приводит к возникновению циркуляции жидкости. Во-вторых, даже в отсутствие циркуляции молекулы участвуют в броуновском движении, сталкиваясь случайно друг с другом и с протеиновыми и жировыми глобулами молока. Слой молока должен быть тонким, иначе до того, как выйти из молока, свет рассеивается много раз, фазы волн становятся несогласованными, и не возникает интерференционной картины. В этом случае молоко кажется просто белым.

Возможно, подвижные пятнышки на боку яблока или помидора обусловлены слабым движением содержащихся в шкурке окрашенных образований (пластид). При их движении расстояние между ними и наблюдателем меняется, что изменяет картину интерференции рассеянных в направлении наблюдателя световых волн, а значит, и связанного с ней узора из пятнышек.

#### 6.125 • ЦВЕТА ПРИ СВЕТЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЛАМПЫ

Если при люминесцентном освещении вращать какой-нибудь предмет, например монету, можно заметить на ней бледные синие и желтые цвета. Проще всего это показать, если на темном фоне освещать вращающуюся монету одной люминесцентной лампой. Те же цвета проступают и на колеблющейся при люминесцентном освещении струне: ее размытые очертания бледно окрашены. Тонкий слой воды вокруг того места, где струя из крана ударяется о раковину, тоже выглядит цветным. С чем связаны эти цветовые эффекты?

**ОТВЕТ •** При работе люминесцентной лампы в заполненной парами ртути трубке происходит электрический разряд. При соударении с электронами атомы



переходят в возбужденное состояние, а затем быстро возвращаются в основное состояние, излучая синий и зеленый свет, а также свет в ультрафиолетовом диапазоне. Ультрафиолетовое излучение поглощается люминофором, покрывающим трубку изнутри, затем в течение короткого времени он испускает световые волны. Когда хотят, чтобы свет лампы был белым, выбирают люминофор, который излучает главным образом волны, соответствующие красному и желтому цветам: смешиваясь со светом, исходящим от атомов ртути, они дают белый свет.

Глаз видит, что от лампы все время исходит белый свет. Однако через трубку идет переменный ток, при частоте 50 Гц направление тока изменяется 100 раз в секунду, излучение синего и зеленого света атомами ртути оказывается непостоянным. В промежутках между моментами активной эмиссии ртути от трубки исходит только красный и желтый свет, обязанный излучению люминофора. Поэтому при освещении вращающегося предмета люминесцентным светом отраженный от него свет при разных ориентациях попеременно меняется, и вы периодически видите разные цвета — от почти белого до красного и желтого. Можно сказать, что вращающееся зеркало выделяет из потока света моменты преобладания того или иного излучения. Примерно так же обстоит дело с отражениями от колеблющейся струны и от слабых волн на поверхности воды вблизи того места, где струя из крана ударяет о раковину.

### 6.126 • ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СОЛНЦЕЗАЩИТНЫЕ ОЧКИ

Почему поляризационные солнцезащитные очки, линзы которых представляют собой поляризационный светофильтр, позволяют блокировать отраженный от полотна дороги слепящий свет лучше, чем простые темные очки? Почему поляризационные очки настолько улучшают видимость под водой, что, например, позволяют рыбаку заметить рыбу?

Снимите очки. Держа одно стекло перед глазом, закройте другой глаз и, направив взгляд вдоль наклонной линии, посмотрите на лужу воды. Вращая стекло относительно направления взгляда, можно увидеть, что при каких-то углах поворота (ориентациях фильтра) лужа исчезает. С чем это связано?

**ОТВЕТ** • Свет — это электромагнитная волна, представляющая собой колебания векторов электрического и магнитного полей. В световой волне эти вектора

всегда направлены перпендикулярно направлению распространения волны. Если для наглядности заметить электрическое и магнитное поле короткими стрелочками, волну можно представить себе как стебель розы с торчащими в разные стороны шипами. *Поляризация* света (или ее отсутствие) относится к ориентации электрического поля, иначе говоря, векторов-стрелочек, представляющих собой электрическое поле. Поле *не поляризовано*, если эти стрелочки могут быть ориентированы в произвольном направлении, перпендикулярном направлению распространения света. Если свет *поляризован*, все стрелочки ориентированы вдоль одной линии: либо в одном направлении, либо в противоположном. Поляризованный свет встречается нечасто: свет от большинства обычных источников, включая солнце, не поляризован.

Отражаясь от некоторых поверхностей, неполяризованный свет становится поляризованным. Например, если неполяризованный солнечный свет отражается от тротуара или воды, он, при определенном угле падения, становится *горизонтально поляризованным*. Это означает, что электрическое поле световых волн лежит в горизонтальной плоскости (короткие стрелочки-вектора направлены горизонтально). Если глаза наблюдателя воспринимают этот свет, в месте отражения на тротуаре или на воде он видит *яркое пятно* — ослепляющий, резкий свет. Такой свет утомляет глаза и ухудшает видимость, например при вождении автомобиля.

Отраженный свет становится не таким ярким, когда вы надеваете обычные солнцезащитные очки, в которые вставлены затемненные пластиковые диски. Однако такие очки ухудшают обзор, затемняя все, что вы видите перед собой через лобовое стекло, а это может мешать следить за встречным транспортом. Другое дело поляризационные очки. Они поглощают горизонтально поляризованный свет и тем самым уменьшают блики от покрытия дороги или воды. Поскольку такие стекла поглощают часть излучения, они тоже ухудшают обзор, но в гораздо меньшей степени. Поэтому вы ясно и четко, без обычных слепящих бликов, видите дорогу перед собой. В таких очках можно разглядеть даже рыбу под водой, до того скрытую яркими бликами на воде.

Если вращать один из поляризационных дисков (одно из стекол очков) вокруг линии взгляда на лужу (прямой линии, соединяющей глаз и фиксированную точку), лужа исчезает, когда поляризационный фильтр блокирует отраженный от нее горизонтально поляризованный свет. Летая в поисках воды, некоторые

водные насекомые находят ее по отраженному горизонтально поляризованному свету. Такой свет наиболее ярк, когда солнце находится под углом порядка  $40^\circ$  над горизонтом. По-видимому, это одна из причин, почему водные насекомые чаще вылетают на поиски воды не в середине дня, а рано утром или в сумерки.

### 6.127 • ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА НЕБА

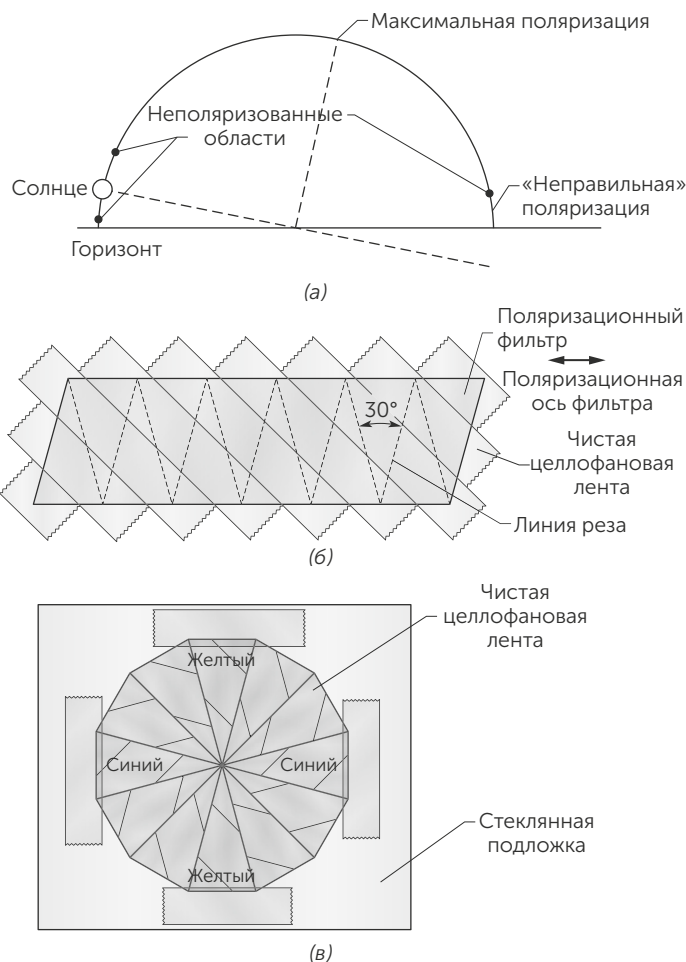
Почему свет большей части ясного неба слабо поляризован? Почему от некоторых участков исходит вообще не поляризованный свет?

Почему обычно свет от облаков не поляризован? Это помогает фотографировать облака: наденьте на объектив поляризационный фильтр и вращайте его до тех пор, пока облака не станут четко выделяться на фоне неба. Почему свет от облаков поляризован, если на закате солнца облака видны на востоке, а на восходе солнца — на западе? Если смотреть на такие облака через поляризационные очки или сверху, пролетая над ними в самолете, можно увидеть яркую дорожку, уходящую поверх облаков к расположенной напротив солнца части горизонта. Если поворачивать очки вокруг линии взгляда, дорожка исчезает. Почему появляется такая дорожка?

**ОТВЕТ •** Хотя прямой солнечный свет не поляризован, благодаря рассеянию на молекулах воздуха свет, идущий от большей части неба, поляризован. Рассмотрим такой пример. Пусть солнце находится низко на западе, а рассеивающие свет молекулы — в зените. Мы воспринимаем световые волны, в которых электрическое поле направлено (поляризовано) в направлении север — юг, и говорим, что свет горизонтально поляризован вдоль направления север — юг. Когда солнце низко, свет, идущий от большей части небосвода, поляризован вдоль той же оси. Однако при рассеянии на молекулах остаются участки неба на севере и на юге вблизи плоскости горизонта, где свет поляризован вертикально.

Свет, идущий от области неба почти напротив солнца (на востоке вблизи плоскости горизонта, если солнце низко на западе), должен был быть поляризован вдоль направления север — юг (рис. 6.46а). Однако свет, идущий оттуда, на самом деле поляризован вертикально, поскольку эту область скорее освещает свет от остальной части небосвода вблизи горизонта (где он вертикально поляризован), а не прямые солнечные лучи. Чуть выше этой области на небосводе есть место, где поляризация света отсутствует. Оно отделяет область

небосвода вблизи горизонта, где доминирует вертикальная поляризация, и область выше над горизонтом, где свет поляризован вдоль направления север — юг.



**Рис. 6.46 / Задача 6.127.** а) Поляризация света неба. Устройство для наблюдения поляризации неба: чистая целлофановая лента приклепляется к поляризационному фильтру (б); из треугольников складывается круг (в).

Можно сделать простой прибор, позволяющий получить красочную картину поляризации небосвода. Возьмите пластинку из поляризационного пластика и прижмите к ней параллельно друг другу нарезанные кусочки чистой целлофановой или лавсановой ленты так, чтобы они составляли угол  $45^\circ$  с направлением поляризации. Если у вас есть широкая целлофановая лента, можно обойтись и одной полоской. Если направление поляризации не указано, посмотрите через пластик на лужу. Вращайте пластик до тех пор, пока лужа не исчезнет. В таком положении ось поляризации направлена по вертикали. Добавьте второй слой полосок или вторую полоску поверх первой для усиления

эффекта. Затем разрежьте пластинку на 12 равнобедренных треугольников с углом  $30^\circ$  при вершине и основанием, параллельным направлению поляризации (рис. 6.46б). Затем на чистом стекле уложите треугольники по кругу так, чтобы острые углы сходились в середине, а сторона поляризационного пластика с прижатыми кусочками ленты была повернута к вам. Теперь как можно меньшими кусочками клейкой ленты прикрепите основания треугольников и место, где сходятся вершины треугольников, к стеклу. Посмотрев на небо через этот прибор (треугольники должны находиться на противоположной от вас стороне стекла), вы увидите окрашенные в синий или желтый треугольники. Это результат поляризации света неба.

Хотя объяснить появление окрашенных участков нелегко, принцип работы такого прибора прост. Когда на устройство падает поляризованный свет неба, сначала он проходит через пленку определенной толщины. При этом вектор электрического поля световой волны поворачивается вокруг направления ее распространения. Электрические поля, соответствующие разным цветам, поворачиваются на разные углы. При выходе из пленки свет определенных цветов поляризован должным образом и проходит через поляризационный фильтр, и поэтому такие цвета видны. Другие цвета с «неправильной» поляризацией поглощаются фильтром и поэтому не видны. Если вам не хочется делать этот прибор, попробуйте сложить пленку и поляризационный пластик, посмотреть на небо и поворачивать этот «бутерброд».

Свет, рассеивающийся при прохождении через облака, обычно не поляризован. Это связано с тем, что в результате многократного рассеяния в облаках полностью «стирается память» о поляризации, которую свет мог бы иметь. Когда наблюдаешь за облаками на небе через поляризационный фильтр (или фотографируешь их), вращая фильтр, можно добиться того, что небо станет не таким ярким. Поскольку яркость облаков при вращении фильтра не меняется, контрастность увеличивается.

Однако, когда солнце низко, а угловое расстояние от точки строго напротив солнца до расположенных выше облаков составляет от  $30^\circ$  до  $40^\circ$ , прошедший через них свет может быть поляризован горизонтально. Какая-то часть солнечных лучей, освещающих облака, проходит внутрь составляющих их капель воды, отражается от противоположной поверхности капли, а затем выходит из капли. Такой свет образует *туманную* (или *белую*) *радугу*. Она очень напоминает обычную радугу за исключением того, что капельки воды слишком

малы и разделения на цвета не происходит. Но зато этот процесс приводит к поляризации света в радуге.

Когда солнце совсем низко или только зашло за горизонт, облака на горизонте напротив солнца освещены главным образом не прямыми солнечными лучами, а рассеянным светом неба вблизи горизонта. Этот рассеянный свет поляризован почти вертикально, как и свет, идущий к наблюдателю от таких облаков. Если посмотреть на такие облака через поляризационные солнечные очки или из самолета, вертикально поляризованный свет проходит через стекла, и мы видим относительно яркие облака. Остальные облака, от которых исходит неполяризованный свет, выглядят темнее. Поэтому мы видим уходящую к горизонту напротив солнца тропинку из ярких облаков.

Согласно легенде, когда солнца не было видно, викинги определяли его положение с помощью волшебного камня. Сейчас считается, что это был кордиерит. Когда свет проходит через такой камень, его цвет меняется в зависимости от направления поляризации света. Викинг, смотревший через камень на свободное от туч небо, вращал камень вокруг направления своего взгляда. При вращении цвет камня менялся от светло-желтого до темно-голубого. Обладая определенным опытом и совершив осмотр разных участков неба, викинги могли определить положение солнца, даже когда оно опускалось за горизонт, что часто бывает в высоких широтах, где они плавали.

### 6.128 • КАК МУРАВЕЙ НАХОДИТ ДОРОГУ ДОМОЙ

В пустыне Сахара живут муравьи-бегунки *Cataglyphis fortis*. В поисках пищи муравей, двигаясь беспорядочно, удаляется от муравейника и может пройти около 500 м, совершив по дороге множество резких поворотов. Более того, часто он движется по ровному песку, где нет никаких ориентиров, которые могли бы указать ему дорогу назад. Но если муравей решил вернуться домой, он поворачивается лицом к дому и бежит прямо к нему. Как на пустынной равнине он находит путь к муравейнику без каких-либо указателей?

**ОТВЕТ** • Удаляясь от муравейника, муравей-бегунок отслеживает пройденный путь (он действует как одометр — прибор для измерения пройденного расстояния) и направление поворотов. Он способен определять направление благодаря тому, что его глаза чувствительны к поляризованному свету. Поэтому он может отслеживать поляризацию света, падающего

с неба, и ориентацию своего тела относительно направления этой поляризации.

Поразительно, но мозг муравья может непрерывно обновлять информацию о пройденном расстоянии и об изменении направления, так что он все время знает, куда надо двигаться, чтобы вернуться к муравейнику. Каждый из участков пройденного муравьем пути — вектор (определенной длины и направления), и муравей, по сути, выполняет сложение векторов. Если на пути муравья встречаются ориентиры, он может использовать и их. Однако в экспериментах, где использовались ориентиры, указывающие обратный путь к муравейнику, примерно половина муравьев предпочитала складывать вектора, а не путаться в ориентирах. Операция суммирования векторов вызывает затруднения у многих студентов, а живущий в пустыне муравей-бегунок с массой мозга всего 0,1 мг делает это автоматически.

### 6.129 • ЦВЕТНЫЕ ПЯТНА И ПОЛЯРИЗАЦИЯ

Как-нибудь утром после холодной ночи поищите на окне, обращенном к солнцу, намерзшие тоненькие слои льда (их еще называют *морозные узоры*). Подождите немного, пока часть льда растает и образуется лужица, или сами налейте на подоконник немного воды или положите зеркало (рис. 6.47). Посмотрите в лужицу так, чтобы видеть отражение намерзшего льда. Почему отражение льда разноцветное?

Полиэтиленовая пищевая пленка не имеет цвета, но, если натянутый кусок такой пленки вставить между двумя поляризационными фильтрами, она станет разноцветной. Когда вращаешь один из фильтров, цвета на пленке меняются. Вместо пищевой пленки можно использовать несколько слоев целлофана. Почему пленка становится разноцветной?

На некоторых произведениях современного искусства цвет проявляется при освещении пластика поляризованным светом. В некоторых случаях разноцветная мозаика получается при использовании по-разному ориентированных слоев целлофана разной толщины. Эту конструкцию освещают проектором, на котором установлен поляризационный фильтр. Зритель, глядя через другой поляризационный фильтр, видит цветную мозаичную картину. Художники создают и трехмерные конструкции из пластика и поляризационных фильтров.

Если вести машину в поляризационных очках, на заднем стекле впереди идущей машины можно заметить большие пятна, обычно образующие какой-то

узор. Иногда, глядя во время полета в окно самолета через поляризационные очки, можно увидеть похожую цветную картину. С чем связано появление таких пятен?

**ОТВЕТ** • Лед, растянутая пищевая пленка, чистая целлофановая лента и закаленное заднее стекло машины — это *двоякопреломляющие материалы*. Когда поляризованный свет проходит через такой материал, направление поляризации поворачивается относительно направления распространения света. Угол поворота различен для различных цветов: красный свет, прошедший через такой материал, обладает одной поляризацией, желтый — другой и т. д. Если поляризационный фильтр поставить на пути света, прошедшего через двоякопреломляющий материал, он пропустит цвета с «правильной» поляризацией, но заблокирует цвета с «неправильной» поляризацией. И хотя изначально свет был белым, после прохождения через двоякопреломляющий материал мы получим цветную картину.

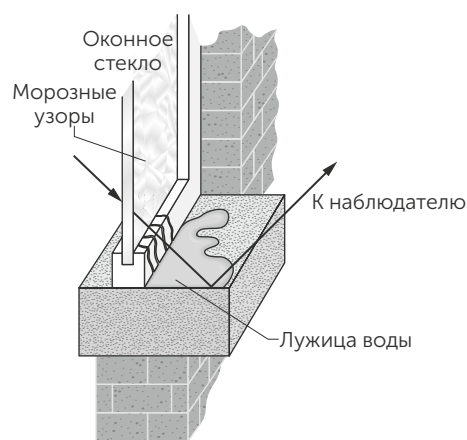


Рис. 6.47 / Задача 6.129. Цветное отражение кристаллов льда в лужице воды.

Свет, падающий на покрытое морозными узорами стекло, — это поляризованный свет неба, а лед — двоякопреломляющий материал. Однако свет, прошедший через лед, не проходит через поляризационный фильтр, а отражается от лужицы воды. Отражение «отбирает» только горизонтально поляризованный свет, и прошедший через лед свет таких цветов видит наблюдатель.

Если речь идет о заднем стекле машины, свет становится горизонтально поляризованным при отражении либо от внешней, либо от внутренней поверхности наклонного стекла. Поляризационные очки на едущем сзади водителе блокируют свет такой поляризации, и окно выглядит относительно темным. Однако часть

света, отраженного от внутренней поверхности стекла, проходит через участки с двойным лучепреломлением, и его поляризация меняется. Это те участки, где в процессе изготовления стекла появляются остаточные механические напряжения, обеспечивающие его повышенную прочность. Закаленное стекло получают из расплава путем быстрой закалки струями воздуха. В таком стекле имеются внутренние напряжения, благодаря чему, разбиваясь, оно распадается не на опасные крупные осколки, а на относительно безопасные мелкие кусочки. При отражении от внутренней поверхности стекла поляризация меняется там, куда при закалке попадали струи воздуха. Поляризационные очки на водителе едущей сзади машины частично пропускают этот свет, и напряженные участки кажутся ярче, чем остальное заднее стекло.

Напряженные участки могут быть смутно различимы и без поляризационных очков, если заднее стекло освещается главным образом поляризованным светом неба, а не неполяризованным прямым солнечным светом. Когда поляризованный свет проходит через стекло и отражается от внутренней поверхности, на напряженных участках его поляризация меняется. Отраженный от таких участков свет отличается по интенсивности от света, отраженного без изменения поляризации от остальной внутренней поверхности. Поэтому водитель может заметить пятна на заднем стекле едущей перед ним машины. Похожие пятна можно увидеть и на окне самолета.

### 6.130 • БЕСЦВЕТНЫЕ ПЕНА И МЕЛКИЙ ПОРОШОК

Почему пена на пиве белая, а не янтарная и не темная, как напиток в кружке? Почему большинство цветных материалов теряют цвет, если их измельчить в порошок? Почему чистое стекло прозрачное, а разбитое на осколки нет? Почему кристаллики соли прозрачные, а слой соли нет, если его глубина больше размера нескольких кристалликов?

**ОТВЕТ •** Желтый цвет светлого пива обусловлен тем, что молекулы пива частично поглощают все лучи падающего света, кроме желтого. Если пиво темное, поглощение еще сильнее. Пена на пиве обоих сортов белая, так как падающий свет в основном отражается от поверхностей множества пузырьков, а не поглощается внутри жидкости. Если смотреть на не слишком большую пенную шапку с близкого расстояния, можно увидеть слабые интерференционные цвета.

Цвет большинства твердых тел определяется селективным поглощением света других цветов в объеме тела. Если же материал размолоть в порошок, падающий свет рассеивается на огромном количестве образовавшихся поверхностей, и только небольшая его часть проходит внутрь гранул, испытывает селективное поглощение, а затем доходит до наблюдателя.

Кусок чистого стекла прозрачен — на обеих поверхностях стекла какая-то часть световых волн отражается, но большая их часть проходит через стекло. Каждая молекула внутри стекла рассеивает проходящий свет во всех направлениях, но только интерференция рассеянных вперед волн является конструктивной (волны усиливают друг друга). Интерференция световых волн, рассеянных в других направлениях, деструктивная (волны гасят друг друга).

Если стекло разбить и собрать в кучку мелкие кусочки, свет отражается много раз от большого числа образовавшихся поверхностей, после чего большая его часть выходит обратно из осколков. Свет, прошедший через кучу осколков стекла насквозь, много раз отражается и преломляется в случайных направлениях. Следовательно, если такой свет видит наблюдатель, воспроизвести образ источника света ему не удастся, а это означает, что разбитое стекло непрозрачно.

По тем же причинам отдельный кристаллик соли прозрачен, но, если кристалликов много, образуется слишком большое количество поверхностей и все вместе они непрозрачны.

### 6.131 • БЛЕСТЯЩИЙ ЧЕРНЫЙ БАРХАТ, БЛЕСТЯЩИЕ ПОКРЫТИЯ

Почему у черного бархата одна сторона яркая, а другая матовая? Поскольку черный материал поглощает свет всех цветов, как черный бархат может блестеть? Почему черное лаковое покрытие блестит? Почему при изготовлении зеркал используют металлическое покрытие, а, например, не бумажное?

**ОТВЕТ •** На блестящей стороне черного бархата имеется регулярная структура из параллельных бороздок. Если смотреть на кусок бархата вдоль линии, перпендикулярной направлению бороздок, виден свет, отраженный от их сторон. Ткань будет блестеть больше всего, если вы так смотрите на нее, а источник света находится перед вами. Хотя пигменты внутри нитей поглощают какое-то количество света, отраженного от равномерно расположенных параллельных бороздок



света достаточно, чтобы материя выглядела блестящей. На матовой стороне бархата таких бороздок нет. Свет, падающий на эту сторону, рассеивается нитями в разных направлениях, что исключает возможность яркого отражения в каком-либо одном направлении.

Блеск лака или краски обусловлен ярким зеркальным отражением света от внешней поверхности. Если используют «полуглянцевую» краску, свет частично проходит в окрашенный слой, где рассеивается в разных направлениях пигментом, содержащимся в краске. Мы видим сумму этого рассеянного света и света, отраженного от внешней поверхности, так что краска блестит меньше.

И на бумажной поверхности, и на металлическом покрытии есть неоднородности, но неоднородности металлического покрытия малы в сравнении с длиной волны света. В результате свет, отраженный от металлического покрытия, способен сформировать изображение в глазу. Неоднородности на бумажной поверхности больше. Рассеянный на них свет расходится в разные стороны, и изображение внутри глаза не формируется. Поэтому зеркало, в которое вы смотрите, имеет металлическое покрытие, а не бумажное.

### 6.132 • ЦВЕТ ЗЕЛЕННОГО СТЕКЛА И ЗЕЛЕНый БАРХАТ

Если через зеленое стекло вы посмотрите на нить горящей лампочки накаливания, конечно, вы увидите зеленый свет. А что будет, если вы посмотрите на ту же лампочку через три или еще большее число слоев зеленого стекла?

Если на солнце разложить кусок зеленого бархата, будет видно, что он зеленый. А что вы увидите, если соберете его складками? Почему край складки (ее внешняя часть) становится бесцветной, но ярко блестит?

Почему, когда кто-то надевает одежду из зеленого бархата, некоторые ее края кажутся зелеными, а другие белыми?

**ОТВЕТ** • Глядя через некоторые (но не все) сорта зеленого стекла, можно увидеть свет, цвет которого зависит от толщины стекла. Если смотреть через один не слишком толстый слой такого стекла, виден главным образом зеленый свет, но небольшое количество красных лучей тоже проходит через стекло. Когда число слоев, а следовательно и толщина стекла, увеличивается, интенсивность прошедшего света, зеленого и красного, уменьшается. Однако интенсивность прошедшего зеленого света уменьшается быстрее. Когда

слоев три, интенсивность прошедших зеленых и красных лучей становится примерно одинаковой, а их комбинацию мы воспринимаем как белый свет. Если и дальше увеличивать число слоев, можно заметить, что свет приобретает красноватый оттенок.

Примерно так же обстоит дело и с зеленым бархатом. Такой бархат отражает главным образом зеленый свет, но с определенной примесью красного. Когда кусок бархата лежит на плоскости, достигающий глаз свет отражается от него один раз, и бархат кажется зеленым. Но если бархат собрать в складки, свет, который вы видите, несколько раз отражается внутри них. При каждом отражении уменьшается интенсивность и зеленого, и красного света, но интенсивность отраженного зеленого цвета падает быстрее. Отразившись внутри складок много раз, свет приобретает красный оттенок.

Когда смотришь на одежду из бархата при белом свете, глаз воспринимает много света, рассеянного на верхних кончиках бархатных нитей. Свет слабо поглощается, поскольку он отражается всего один раз, и остается ярким и белым. Свет, проникающий внутрь бархата, а затем выходящий из него, становится зеленым и более темным. Художники, чтобы отобразить блики на одежде или драпировках из бархата, контуры рисуют яркими белыми линиями по контрасту с остальным более темным фоном. Во всех этих ситуациях эффект может зависеть от того, что чувствительность глаза к свету разного цвета различна и зависит от мощности освещения.

### 6.133 • ПРЕКРАСНАЯ ПЕРСИКОВАЯ КОЖА И КАЖУЩАЯСЯ МЯГКОСТЬ

Глядя на человека, например ребенка, вы понимаете, что у него мягкая кожа, поскольку у вас есть некий визуальный ориентир, позволяющий сделать такой вывод. Легче всего в этом разобраться, если источник света находится чуть позади человека и вы улавливаете скольльзящие лучи света, идущие от его кожи. При изображении человека с помощью компьютерной графики этот ориентир отсутствует, кожа выглядит твердой, и вы тут же понимаете, что это просто модель. Если на светлом фоне смотреть на спелый персик, сходный визуальный ориентир позволит определить, мягкий ли он. Персик явно отличается, скажем, от нектарина, и вы делаете вывод, что персик мягкий. Каков же этот визуальный ориентир?

**ОТВЕТ** • В случае кожи таким ориентиром является малое количество света, рассеянного либо на внешнем

контуре человека, на которого вы смотрите, либо поверхностным слоем кожи или (что скорее) волосками на поверхности кожи. Даже если кажется, что никакой растительности на коже нет, на ней все же есть мягкий пушок, почти незаметный, если смотреть прямо. Однако, если находящийся где-то позади источник света освещает человека скользящими лучами, свет частично рассеивается на этих волосках, слабо подсвечивая его внешний контур. Мозг интерпретирует эту подсветку как «мягкое». Если такого отблеска нет и контур тела резкий и четкий, мозг воспринимает это тело как «твердое».

При правильном освещении короткие волоски на поверхности персика вызывают мягкое свечение его контура, и персик выглядит мягким. У нектарина таких волосков нет, и поэтому он выглядит твердым. Благодаря рассеянию света пушистыми волосками кожа некоторых молодых женщин кажется такой мягкой, что ее называют *персиковой*.

А вот еще один похожий эффект. Если человек стоит перед источником света, например против солнца, видно, как ярко сияют волосы у него на макушке.

#### 6.134 • ВЕЧЕРИНКИ С «ТВИНКИ» И ВАЗЕЛИНОМ

Говорят, что в Массачусетском технологическом институте вечеринки иногда проходят почти в темноте (при свете ультрафиолетовых ламп). Собираясь на такие вечеринки, студенты натираются вазелином или кремом, которым наполняют бисквитные пирожные «Твинки». Иногда во время вечеринки они еще пьют тоник, от которого исходит мрачное голубое сияние. Почему эти вещества светятся при ультрафиолетовом свете?

**ОТВЕТ •** Некоторые компоненты вазелина и крема для «Твинки» флуоресцируют: они поглощают ультрафиолетовый свет, а затем испускают лучи синей области видимого спектра. Я подозреваю, что виной тому какие-то ароматические углеводороды. Когда полицейским нужно подтвердить, что тот или иной предмет побывал в руках у преступников, они используют вазелин. Это вещество, удерживающее в себе определенные ароматические углеводороды, наносится небольшими пятнышками на предмет, который затем передают преступнику. Наличие ароматических углеводородов можно выявить, осветив эти пятнышки ультрафиолетовым светом. Тоник при темном свете отсвечивает голубым благодаря содержащемуся в нем хинину, который поглощает ультрафиолетовый свет, а испускает голубой.

#### 6.135 • ЦВЕТ МЯСА

Почему внешняя поверхность куска свежей говядины ярко-красная, а внутри мясо имеет фиолетовый оттенок? Почему умеренно прожаренное мясо ярко-красное внутри, а если оно полностью прожарено, то коричневое? Почему в магазине бекон, ветчину или солонину упаковывают в плотную бумагу или переворачивают так, чтобы на них не падал свет? Почему иногда копченое мясо и другие мясные продукты долгого хранения светятся желтым или зеленым? Почему иногда поверхность мяса переливается разными цветами?

**ОТВЕТ •** Цвет мяса определяет главным образом пигмент, который называется миоглобин. В живом организме миоглобин, связывая гемоглобин в крови, накапливает и доставляет кислород из легких в мышечные ткани. При забое животных пополнение тканей кислородом прекращается, и миоглобин приобретает фиолетовый оттенок. Когда мясо режут, оно подвергается воздействию воздуха. На поверхности разрубленного мяса миоглобин, взаимодействуя с кислородом воздуха, образует ярко-красный оксимиоглобин. Но внутри, на каком-то расстоянии от поверхности, где кислорода не так много, происходит диссоциация оксимиоглобина: содержащееся в нем железо окисляется, и образуются окисные соединения железа. Получается так называемый метмиоглобин, имеющий коричнево-красный цвет. Чтобы поверхность мяса оставалась красной, мясники обычно заворачивают мясо в пропускающую воздух пленку. Тогда его поверхность остается красной, и покупатели считают, что мясо свежее.

При нагреве миоглобин внутри мяса начинает взаимодействовать с кислородом, образуя ярко-красный оксимиоглобин. Из-за этой реакции не слишком прожаренное мясо внутри ярко-красное. Тем временем на поверхности мяса миоглобин меняет свои физико-химические свойства, входящее в него железо окисляется, и поверхность мяса приобретает коричневый цвет. Если продолжать нагрев, температура внутри мяса повышается, и цвет мяса меняется во всем куске.

В процессе приготовления мясных продуктов долгого хранения, таких как ветчина, бекон и солонина, выделяется окись азота, которая, соединяясь с миоглобином, образует розовый пигмент. Если такое мясо на свету взаимодействует с кислородом, разрушается связь между миоглобином и окисью азота, в результате чего железо миоглобина окисляется и образуются коричневатый метмиоглобин. Иногда происходит

окисление других компонентов, входящих в комплекс окись азота — миоглобин, в результате чего образуются желтый или зеленый пигменты. Чтобы избежать этого неприятного изменения цвета, такие мясные продукты выкладывают в магазинах так, чтобы на них не попадал свет. Кроме того, чтобы исключить реакцию с кислородом, используют герметичную упаковку.

Радужная окраска свежего или приготовленного мяса своим появлением обязана рассеянию света на миофибриллах (мышечных волокнах) на поверхности мяса или непосредственно под ней. Если на миофибриллы обезвоженной поверхности мяса свет падает вертикально, может происходить конструктивная интерференция волн, главным образом волн зеленого света, рассеянных в разных местах. Это приводит к появлению радужного, зеленоватого свечения, которое не обязательно связано с заражением мяса бактериями или окончанием срока его хранения.

### 6.136 • НЕДОЛИТОЕ ПИВО

Почему у пивных кружек часто бывают толстые стенки и толстое дно? Кружка может и сужаться книзу. Возможно, это сделано для того, чтобы кружка казалась увесистой, но как это создает иллюзию, что в нее налито пива больше, чем на самом деле?

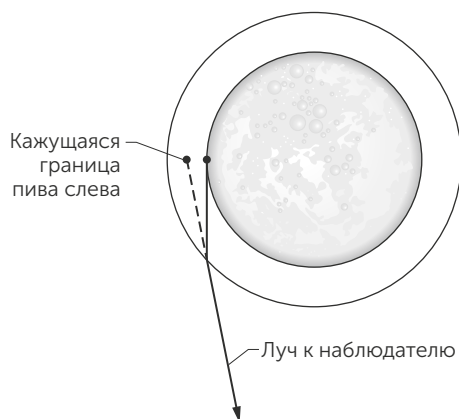


Рис. 6.48 / Задача 6.136. Вид сверху на пивную кружку, создающую иллюзию «лишнего» пива.

**ОТВЕТ** • Толстые стенки кружки создают такое впечатление благодаря преломлению луча света, идущего из пива через стекло, а затем по воздуху. Например, самый левый луч от пива вблизи стенки кружки отклоняется в том направлении, где вы видите центр кружки (рис. 6.48). Вы видите этот луч и, мысленно продолжив его по прямой обратно к кружке, делаете вывод, что он исходит от точки, расположенной левее, чем на самом деле. В результате

кажется, что пива в кружке больше, чем на самом деле. Толщина и кривизна стекла могут менять и кажущуюся глубину пива. Можно добиться того, что реальное содержание кружки будет в два раза меньше кажущегося.

### 6.137 • «БЕЛЕЕ БЕЛОГО»

В одном популярном ролике утверждалось, что после стирки в рекламируемом стиральном порошке белое белье становится «белее белого». Что означают эти слова?

**ОТВЕТ** • После стирки в таком порошке на белье остается светящийся оптический отбеливатель, превращающий часть ультрафиолетовых лучей солнечного света в синие, что увеличивает интенсивность видимого света, исходящего от белья. Белье становится «белее белого» в том смысле, что испускает больше света видимого спектра.

Отбеливатель нужен, поскольку после стирки в обычном порошке на белье остается желтоватый краситель, поглощающий синий свет. Без отбеливателя после одной стирки белое белье становится желтоватым. До того, как в порошок стали добавлять отбеливатель, в него кроме желтого красителя добавляли еще и синий («синьку»). Благодаря наличию обоих красителей при стирке белое белье, хотя практически не окрашивалось, но приобретало нежелательный сероватый оттенок.

### 6.138 • ИСЧЕЗАЮЩАЯ МОНЕТА

Поместим монету в банку с водой и подберем угол зрения так, чтобы монета была видна, когда смотришь на нее через воду сверху (рис. 6.49). Если положить руку на дальнюю стенку банки, монета видна по-прежнему. Однако, если рука будет мокрой, монета исчезнет. Почему влага убирает изображение?

**ОТВЕТ** • Изначально монета видна благодаря тому, что часть идущего от нее света отражается от внутренней поверхности дальней стенки банки. Если туда, где происходит отражение, положить сухую руку, изображение практически не изменится по двум причинам. Во-первых, ваша рука не слишком плотно прилегает к банке, и во-вторых, слишком мало света проходит через стекло в кожу. Однако если рука мокрая, ее контакт с банкой гораздо лучше. Более того, после того как контакт установлен, свет легко проходит из стекла в воду, поскольку оптические свойства этих материалов близки. Поэтому свет, который до того в основном отражался от дальней стенки банки, теперь уходит в воду на руке и монета становится не видна.

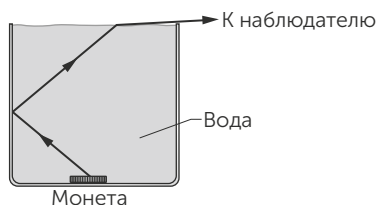


Рис. 6.49 / Задача 6.138. Монета, которую видно через поверхность воды в банке.

### 6.139 • СОЛНЦЕЗАЩИТНЫЕ ОЧКИ И СМОГ

Если на фоне ясного неба смотреть через поляризационные очки на окутанную смогом гору, наклоняя голову, а с ней и очки, можно добиться того, что гора будет то появляться, то исчезать. Многие детали горы могут тоже то появляться, то исчезать. Почему так происходит?

**ОТВЕТ •** Когда смотришь на окутанную смогом гору на фоне чистого неба, глаза воспринимают свет, идущий от трех источников. Во-первых, это рассеянный молекулами воздуха свет чистого неба, этот свет частично поляризован. Во-вторых, свет, рассеянный частицами, образующими смог. Если диаметр таких частиц находится в интервале от 0,5 до 5 микрон, рассеянный ими свет частично поляризован в том же направлении, что и свет чистого неба. И в-третьих, свет, отраженный от различных поверхностей, определяющих рельеф горы. Такой свет слабо поляризован в несметном числе направлений. В какой пропорции свет от каждого из этих источников достигает глаз, зависит от ориентации поляризационных очков.

Предположим, что диаметр частиц смога попадет в указанный интервал. Если наклонять голову и очки влево или вправо, до тех пор пока яркость неба не станет максимальной, поляризационные очки пропускают свет от всех трех источников. Однако очки пропускают не весь рассеянный частицами смога частично поляризованный свет. Вы видите туманное очертание горы на фоне яркого неба. Контраст между горой и фоном позволяет различить гору, но слабый, рассеянный частицами смога свет еще достаточно ярок, чтобы замаскировать детали ландшафта горы.

Если теперь, двигая головой (слева направо или справа налево, как вам удобнее), постепенно наклонять ее больше, чем на  $90^\circ$ , солнечные очки перестанут пропускать весь свет, идущий от неба, и большую часть света, рассеянного на частицах смога. Тогда вы сможете разглядеть детали поверхности, ориентированные так, что отраженный ими свет имеет поляризацию, которую пропускают очки.

### 6.140 • ЯРКОСТЬ ОКЕАНА

Предположим, что в безоблачный день вы плывете на лодке по океану. Пусть волнение слабое. Где вода ярче: прямо под вами, когда вы смотрите вниз на нее, или вдаль у горизонта? Где преимущественно видны отражения прямого солнечного света или неба? Где вы сможете увидеть предметы под водой?

**ОТВЕТ •** Следует сравнить три источника света: блеск солнечного света, отраженного от поверхности воды; свет неба, отраженный от поверхности воды; и свет, идущий из-под поверхности воды. Океан всегда самый яркий вблизи горизонта, поскольку здесь угол скольжения идущих от неба лучей настолько мал, что только небольшая часть света неба поглощается водой. Если вы перемещаете взгляд по направлению к лодке, такие лучи падают более отвесно и большая их часть уходит в воду.

Положение следующей по степени яркости области определяется положением солнца на небе. На рассвете блестящее пятно начинает двигаться к вашей лодке от линии горизонта на востоке; когда солнце в зените, оно находится практически под лодкой; и на закате оно сдвигается на запад к горизонту.

Вдали от места, где отражается солнечный свет, и недалеко от лодки свет, идущий из-под поверхности воды, может оказаться самым ярким. Здесь удастся разглядеть то, что находится под водой.

### 6.141 • СИНЯЯ ЛЕНТА НА МОРСКОМ ГОРИЗОНТЕ

Часто море прямо под линией горизонта кажется либо более насыщенно-синим, либо более темно-серым, чем остальная поверхность моря или область неба непосредственно над горизонтом. В ясный день этот участок моря напоминает яркую синюю ленту. Синяя лента исчезает, если вы лежите на пляже или вскарабкались куда-то на возвышенность. Почему появляется эта синяя лента?

**ОТВЕТ •** Если смотреть на поверхность воды непосредственно под линией горизонта, то там обычно можно увидеть отражение неба на угловой высоте порядка  $30^\circ$  (см. задачу 6.150). Когда небо чистое, эта часть неба ярче, чем небо на горизонте, где оно обычно белое. Контраст между белым горизонтом и голубым отражением неба делает цвет неба насыщенно-синим. Если этот участок неба, отражающийся в воде, серый, лента тоже будет серой, но она по-прежнему будет контрастировать с белым горизонтом рядом. Синяя или серая



лента исчезают, если вы лежите на пляже, поскольку набегающие волны не дают рассмотреть море в непосредственной близости к линии горизонта. Почему эти ленты исчезают, когда вы поднимаетесь достаточно высоко над пляжем, я тоже не совсем понимаю.

#### 6.142 • НОЧНАЯ ТЬМА ОПУСКАЕТСЯ СТРЕМИТЕЛЬНО

Почему в тропиках на закате солнце опускается за горизонт быстрее, чем в высоких широтах?

**ОТВЕТ** • Продолжительность сумерек\* — время между началом заката и моментом, когда центр солнечного диска находится под определенным углом за горизонтом. Для гражданских сумерек этот угол равен  $6^\circ$ , навигационным сумеркам соответствуют углы от  $6^\circ$  до  $12^\circ$ , а астрономическим — от  $12^\circ$  до  $18^\circ$ . Как быстро центр солнечного диска проходит расстояние внутри данного угла, зависит от наклона наблюдаемой траектории движения солнца по небу относительно горизонта. В тропических широтах эта траектория почти вертикальна, так что солнце быстро проходит расстояние между двумя заданными положениями, что соответствует коротким сумеркам. В высоких широтах траектория солнца пересекается с горизонтом под малым углом. Поэтому между двумя заданными положениями солнце движется по наклонной траектории, и сумерки становятся длиннее.

#### 6.143 • ЦВЕТНОЙ КОНДЕНСАЦИОННЫЙ СЛЕД САМОЛЕТА

Обычно конденсационный след, то есть след из конденсированного водяного пара за летящим самолетом, белый. Почему иногда он бывает разноцветным? Как может окрашенная часть конденсационного следа двигаться прямо позади самолета, притом что капли, из которых состоит конденсационный след, двигаются не так быстро?

\*Различают гражданские, навигационные и астрономические сумерки. В интервале гражданских сумерек можно наблюдать только наиболее яркие небесные светила (например, Венеру). Считается, что в это время можно выполнять любые работы без искусственного освещения. Во время навигационных сумерек хорошо видны навигационные звезды, но еще различима линия горизонта. Астрономические сумерки — время, когда обычному наблюдателю небо кажется совсем темным, а астрономы могут наблюдать небесные светила (например, звезды), но не туманности и галактики, которые видны только во время астрономической ночи. Прим. пер.

**ОТВЕТ** • Когда образуются капли воды, растущие за счет поглощения воды из воздуха, в процессе роста они достигают определенного размера, при котором в результате дифракции (одного из типов рассеяния) на них происходит разложение солнечного света на цвета. Разложения на цвета не происходит, когда капли становятся слишком большими. Таким образом, на каком-то расстоянии позади самолета может быть такое место, где растущие капли обеспечивают появление разноцветного конденсационного следа. Ближе к самолету капли слишком маленькие, дальше от самолета — слишком большие.

#### 6.144 • ПЕРЛАМУТРОВЫЕ ОБЛАКА

Полярные стратосферные облака, их еще называют перламутровые облака, красиво окрашены в нежные цвета. Это редкое явление можно увидеть только в высоких широтах и только в сумеречные часы после захода солнца или перед рассветом. Время появления этих облаков указывает на то, что они формируются на большой высоте, где солнце все еще освещает их, тогда как снизу на земле уже темно. Обычно более низкие облака бывают цветными только по краям или оказавшись напротив солнца или луны. Но перламутровые облака светятся разными цветами, даже находясь на расстоянии  $40^\circ$  от солнца.

Почему перламутровые облака разноцветные? Если разложение на цвета происходит на каплях жидкой воды, то как капли могут существовать, когда на высоте этих облаков очень холодно (примерно  $-80^\circ\text{C}$ )?

**ОТВЕТ** • Цвет перламутровых облаков объясняется рассеянием солнечного света крошечными капельками воды и сернокислотного аэрозоля в облаках. Крошечные капельки воды остаются жидкими вплоть до температуры  $-40^\circ\text{C}$ . Но в присутствии триоксида серы они могут оставаться жидкими до более низких температур, которые бывают на высоте от 18 до 22 км, где формируются перламутровые облака. В перламутровом облаке капелька, постоянно поглощая воду, растет. Рано или поздно она замерзнет и перестанет разлагать солнечный свет на цвета. Считается, что такие замерзшие капли формируют белый хвост, отходящий от перламутрового облака.

#### 6.145 • СУМЕРЕЧНЫЙ ФИОЛЕТОВЫЙ СВЕТ

Почему иногда через 15–40 минут после заката солнца, когда все краски вечернего неба уже угасли, на короткое время на западе, над тем местом, куда село солнце, появляется сумеречный фиолетовый свет? Тот же механизм



лежит в основе еще одного красно-фиолетового свечения, которое можно увидеть еще позже, даже через два часа после заката. Как может солнце освещать небо на западе, когда прошло уже столько времени после его захода?

**ОТВЕТ** • Сумеречный фиолетовый свет представляет собой комбинацию красного света, рассеянного в нижних слоях атмосферы, и синего света, рассеянного в верхних слоях атмосферы. Красная составляющая — это солнечный свет, огибающий искривленную поверхность Земли и рассеивающийся в плотных нижних слоях воздуха. Почти вся его синяя составляющая теряется из-за рассеяния на молекулах воздуха, и когда такой свет наконец рассеивается в направлении наблюдателя, он преимущественно красный. Синяя составляющая — это солнечный свет, проделавший долгий путь в верхних слоях атмосферы, в том числе в озоновом слое. На этом пути красная составляющая солнечного света почти полностью поглощается молекулами озона, и когда такой свет рассеивается в направлении наблюдателя, в нем доминирует синий свет. Таким образом, когда вы смотрите на небо над тем местом, где зашло солнце, комбинация красного и синего света воспринимается как фиолетовый цвет. В некоторых местах после захода солнца такой свет освещает вершины гор. Это называют отблеском солнца на вершинах гор, а метеорологи используют термин *свечение Альп*.

Второе, более позднее фиолетовое свечение в сумерках появляется редко. Его природа до сих пор не понятна. Возможно, оно объясняется рассеянием света на все еще освещаемых солнцем частицах в верхних слоях атмосферы. Такой разреженный слой частиц, образовавшихся из обломков комет и астероидов, захваченных Землей, имеется на высоте около 85 км.

#### 6.146 • РЯБЬ НА НЕБЕ

Несколько раз появлялись сообщения о наблюдении на облаках чередующихся темных и светлых полосок. В некоторых случаях такая рябь выглядела случайной, а иногда напоминала волны. Во время Второй мировой войны, ведя бои в районе Западного вала\*, американские военные замечали темные тени, плывущие поверх белых перистых облаков. Эти тени напоминали арки с центром в расположении немцев.

С чем могли быть связаны эти явления?

\* Западный вал, известный также как линия Зигфрида, — система немецких долговременных укреплений на западе Германии.

**ОТВЕТ** • Пока непонятно, как объяснить появление ряби. Считается, что она связана со звуковыми волнами, проходящими через кристаллики льда в облаках. Поскольку звука американские военные не слышали, вероятно, его источник находился далеко. Это могли быть удары тяжелой артиллерии или массированная бомбардировка за линией обороны противника. Звуковая волна ненадолго переориентирует кристаллики, изменяя яркость отраженного от них света. Согласно другой теории, звуковая волна очень быстро меняет степень конденсации в облаке, изменяя тем самым яркость облака вдоль движущегося возмущения.

#### 6.147 • ЛИНИЯ НА ФОНЕ ДОЖДЯ ВДАЛЕКЕ

Если при ярком солнце посмотреть на идущий вдалеке дождь, можно заметить горизонтальную линию, отделяющую более высокую и яркую область от более низкой и темной. С чем связано появление такой линии?

**ОТВЕТ** • Обычно температура воздуха уменьшается с высотой, а горизонтальная линия отмечает высоту, на которой падающие кристаллики льда начинают плавиться и превращаются в дождевые капли. Поскольку кристаллики отражают больше света, чем капли воды, область над линией выглядит ярче, чем под ней.

#### 6.148 • ЯСНАЯ НОЧЬ

Если место, где вы живете, не освещает ночью рассеянный посторонний свет, вы можете заметить, что ночи бывают необычайно ясными, даже когда на небе нет луны. Иногда такие ночи связывают со звездопадом — метеорными потоками\*\*, полагая, что падающие осколки комет и астероидов освещают небо. Но сгорание метеора в небе происходит слишком быстро и не может служить дополнительным источником света. Есть ли еще какие-то причины, по которым безлунные ночи могут быть такими светлыми?

**ОТВЕТ** • Когда метеор проходит через атмосферу на высоте примерно 90 км, он разогревает воздух на своем пути. На разогретых участках образуется окись азота, которая затем, взаимодействуя с кислородом, образует двуокись азота. При этой реакции происходит испускание света в диапазоне длин волн, соответствующих зеленому, желтому и красному цветам. Привыкшие к темноте глаза

\*\* И метеоры, и метеориты — это осколки падающих на землю космических тел. Однако метеориты падают на землю, а метеоры сгорают в атмосфере. *Прим. пер.*

чувствительны к такому свету. То есть поток метеоров может придать небу дополнительное свечение.

#### 6.149 • ЗОДИАКАЛЬНЫЙ СВЕТ, ПРОТИВОСИЯНИЕ И ДРУГИЕ НОЧНЫЕ ОГНИ

Темной безлунной ночью вдали от городских огней на небе можно увидеть два необычных светлых пятна. *Зодиакальный свет* — это треугольник молочного цвета. Его можно видеть на западе в течение нескольких часов после захода солнца или на востоке до рассвета. Вечером такой свет лучше всего виден во время весеннего равноденствия, а утром — во время осеннего равноденствия. Вытянутый треугольник зодиакального света в плоскости обращения Земли вокруг Солнца почти сравним по яркости с Млечным Путем.

*Противосияние* — слабый свет, который некоторые люди могут разглядеть на небе вблизи *точки солнечного противостояния* (точки, расположенной строго напротив солнца). Этот свет настолько слабый, что заметить его можно, только если очень темно и глаза адаптировались к почти полной темноте. Но, возможно, и тогда увидеть его можно будет только боковым зрением, не глядя на него прямо, а поводя глазами по небу из стороны в сторону. В Северном полушарии наблюдать противосияние, вероятно, лучше всего в октябре, когда звезды не такие яркие.

Бывает, что в ночном небе можно увидеть большие движущиеся светящиеся области, никак не связанные с зарей. Почему же появляются эти ночные огни?

**ОТВЕТ** • Зодиакальный свет и противосияние — результат рассеяния света на межпланетной пыли, источником которой, по всей видимости, являются кометы. Свет наиболее яркий при рассеянии вперед, менее яркий при рассеянии назад, а при других углах яркость света еще меньше. Пыль, ответственная за появление зодиакального света, находится внутри орбиты Земли. Рассеянный межпланетной пылью свет можно видеть, когда он все еще попадает в поле вашего зрения сразу после заката или до рассвета. В обоих случаях вы в основном видите свет, рассеянный вперед.

В середине ночи вам, может быть, удастся увидеть солнечный свет, рассеянный назад частицами пыли вне орбиты Земли. Это и есть противосияние. Считается, что движущиеся светящиеся узоры — это свечение атмосфер, вероятно, связанное с проходящими через эти области неба волнами плотности, давления и температуры. При этом происходит возбуждение гидроксильных радикалов ОН и их свечение.

#### 6.150 • ОТРАЖЕНИЯ НА ЛИНИИ МОРСКОГО ГОРИЗОНТА

Стоя на берегу моря при сравнительно сильном волнении, обратите внимание на отражения от поверхности моря непосредственно под линией горизонта. Если бы море было спокойным, оно отражало бы небо как большое горизонтальное зеркало. Однако поскольку поверхности волн наклонные, они отражают разные участки неба. Относительно горизонтали угол наклона участка неба, отраженного каждой из волн, равен удвоенному наклону поверхности волны.

Довольно странно, но отражения, которые видны вблизи горизонта, обычно соответствуют участку неба, находящемуся под углом  $30^\circ$  над горизонтом. Это означает, что в среднем наклон поверхности волн составляет около  $15^\circ$ . Однако измерения показывают, что часто волны бывают круче. Почему же обычно отражается именно этот участок неба?

**ОТВЕТ** • Рассмотрим волны на поверхности моря очень близко к горизонту. Небольшие, не слишком крутые волны отражают участок неба вблизи горизонта. И хотя таких волн огромное количество, их вклад в отражение, которое видит наблюдатель, мал, поскольку каждая из этих волн имеет небольшую площадь поверхности (они напоминают маленькие зеркала). Средние волны с промежуточным наклоном поверхности отражают более высокие участки неба. Хотя таких волн меньше, чем небольших волн, их вклад в отражение, которое видит наблюдатель, больше, поскольку площадь поверхности каждой из таких волн больше. Совсем больших волн так мало, что, хотя площадь отражающей поверхности у них большая, они практически не влияют на отражение, которое мы видим. Окончательный результат таков: максимальный вклад в отражение, которое видит наблюдатель, дают волны с промежуточным наклоном поверхности, равным  $15^\circ$ , а значит, отражается участок неба, расположенный под углом  $30^\circ$  над горизонтом.

#### 6.151 • КАК ИСПОЛЬЗОВАТЬ СПЛОШНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ШАР ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ СВЕТА

В 1818 году Огюстен Жан Френель представил на рассмотрение Французской академии свою волновую теорию света. Симеон Дени Пуассон, резко выступивший против этой теории, попытался доказать ее несостоятельность с помощью следующего мысленного

эксперимента. Предположим, что на непрозрачный предмет с круговым поперечным сечением (таким как монета или шар) падает луч света. Согласно теории Френеля, в центре области тени на экране позади этого предмета должно появиться яркое пятно.

Несмотря на абсурдность подобного предположения, другой член академии Доминик Франсуа Жан Араго решил поставить эксперимент. Ко всеобщему удивлению, яркое пятно в центре тени он обнаружил. По странной прихоти истории это пятно называют пятном Пуассона (реже Араго — Пуассона), хотя ни Араго, ни Пуассон в его существование не верили.

Со времен этого открытия некоторые ученые использовали непрозрачные предметы, такие как маленькие шарики из подшипников, в качестве линз для создания изображений. Так же как с помощью фотоаппарата, они позволяют получить изображение на фотопленке. Как образуется пятно Араго — Пуассона и как непрозрачный шарик способен фокусировать свет для создания изображения?

**ОТВЕТ •** Предположим, что с помощью непрозрачного шарика надо создать изображение расположенного на расстоянии от него яркого точечного источника света. Достигнув шара, световые волны дифрагируют у его краев, расходясь по радиусам как вовне, так и внутрь области тени шарика. Если за шариком на достаточно большом расстоянии от него поместить экран, образуется небольшая дифракционная картина, состоящая из ярких и темных концентрических колец с яркой точкой в центре. Это связано с тем, что волны, пришедшие сюда с одной стороны шарика, проходят точно такое же расстояние до центра тени, как и волны, пришедшие с противоположной стороны. Следовательно, такие волны имеют одинаковую фазу и происходит их конструктивная интерференция.

Первое темное кольцо — результат деструктивной интерференции. Рассмотрим верхнюю точку кольца. Волны, распространяющиеся от нижней точки шарика, проходят более длинный путь, чем волны, идущие от его верхней точки. Лишнее расстояние равно половине длины волны, и поэтому интерференция таких волн на экране деструктивная.

Остальная дифракционная картина — тоже результат конструктивной или деструктивной интерференции волн. В некоторых местах экрана волны, идущие от противоположных сторон шарика, проходят путь, длина которого пропорциональна целому числу длин

волн. Такие волны доходят до экрана в фазе, и их интерференция конструктивная. В других местах разница пройденных расстояний равна нечетному числу половин длины волны. Такие волны доходят до экрана в противофазе, и их интерференция деструктивная.

Когда с помощью шарика получают изображение предмета, каждая его точка может рассматриваться как точечный источник света. Такой источник создает свою дифракционную картину с яркой точкой в центре. Совокупность этих ярких точек приближенно передает форму предмета, и таким образом получается его изображение.

### 6.152 • КРУТОЙ ПОВОРОТ В КРИВОМ ЗЕРКАЛЕ

Сверните лист блестящей алюминиевой фольги или алюминированной пленки так, чтобы получилась часть боковой поверхности цилиндра. Не выпуская пленку из рук, поверните это кривое зеркало так, чтобы длинная ось цилиндра заняла горизонтальное положение, и посмотрите внутрь цилиндра. Подберите кривизну зеркала и расстояние от глаз до его поверхности так, чтобы ваше изображение оказалось перевернутым (тогда вы будете находиться дальше от зеркала, чем его фокальная точка). Поверните цилиндр на  $90^\circ$  так, чтобы его ось заняла вертикальное положение. Теперь ваше изображение будет прямым, а не перевернутым, и оно как будто повернулось на  $180^\circ$ . Почему угол поворота изображения в два раза больше угла поворота цилиндра?

**ОТВЕТ •** Цилиндрическое зеркало производит преобразование изображения только в одной плоскости, а именно в той, в которой оно изогнуто (так называемая цилиндрическая оптика, в отличие от обычной, сферической). В другой плоскости оно действует просто как обычное плоское зеркало. Когда вы поворачиваете цилиндрическое зеркало на  $90^\circ$ , «инвертируемой» становится та ваша ось, которая ранее не инвертировалась вообще, и при этом она инвертируется, то есть визуально поворачивается на  $180^\circ$ .

### 6.153 • ЦВЕТ ДЫМА СИГАРЕТЫ

Почему дым, поднимающийся от горящего конца сигареты, имеет голубоватый оттенок, а курильщик выдыхает белый дым?

**ОТВЕТ •** Поднимающиеся от горящего конца сигареты частицы дыма имеют достаточно малый размер, и поэтому в направлении наблюдателя они интенсивнее рассеивают голубые лучи света в комнате. Когда

курильщик вдыхает дым, размер этих частиц увеличивается за счет конденсации на них воды. Следовательно, частицы в дыме, который выдыхает курильщик, рассеивают лучи всех цветов видимого спектра, и поэтому дым становится белым. Впрочем, с точки зрения содержания всякой гадости это не имеет большого значения.

#### 6.154 • ЧТО БЫ МЫ УВИДЕЛИ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ СВЕТЕ

Предел зрения человека — синий конец видимого спектра. В какой-то мере это связано с тем, что световые волны с более короткими длинами лучше поглощаются роговицей и хрусталиком глаза. Если человеку удалили катаракту и вставили искусственный хрусталик, возможно, он сможет воспринимать свет с более короткими длинами волн из ультрафиолетового диапазона. Предположим, что вы видите только в ультрафиолетовом диапазоне. Изменится ли мир вокруг вас?

**ОТВЕТ •** Поскольку оконные стекла и стекла уличных фонарей поглощают ультрафиолет, свет от этих привычных источников вы не увидите, и города будут казаться темными даже при включенном освещении. По тем же причинам, надев очки для коррекции зрения, вы увидите мир таким, как в обычных темных солнцезащитных очках: тени станут нечеткими, и, поскольку молекулы воздуха рассеивают ультрафиолетовый свет лучше, чем видимый, даже ясным днем вдаль вы будете видеть плохо. Поэтому отдаленные предметы вы увидите как бы в тумане, а из-за рассеяния света в атмосфере заметить тень вам будет трудно. С другой стороны, вы увидите другую, более яркую и разнообразную окраску некоторых видов птиц и различия в цвете красок, которые вне ультрафиолета казались вам одинаковыми.

#### 6.155 • ДИФРАКЦИЯ НА БУКВАХ

Пусть луч лазера направлен на маленькое отверстие в форме буквы. Вы сможете предсказать, как будет выглядеть дифракционная картина? Или если вам покажут фотографию этой дифракционной картины, можете ли вы сказать, в форме какой буквы было отверстие? Если есть лазер, можно попробовать написать шифрованную записку, заменив буквы на дифракционные картинки. Удастся ли ее прочесть?

**ОТВЕТ •** Часто на дифракционной картинке удается разгадать букву, определяя направления распространения дифрагированного света. При дифракции на краю отверстия свет расходится в направлении, перпендикулярном краю. Например, свет, дифрагировавший на отверстии в форме буквы О, расходится во всех направлениях, поскольку края отверстия напоминают круг. А вот от отверстия в форме буквы Z свет расходится вверх и вниз, а также перпендикулярно центральной линии, соединяющей верхний и нижний участок. Прочесть такую записку можно двумя способами — либо имея образцы изображений букв, либо решив соответствующие уравнения.

#### 6.156 • ИГРА С ОТРАЖЕНИЕМ

Возьмите два небольших прямоугольных зеркала, соедините их сзади скотчем так, чтобы их можно было разворачивать на разные углы, а затем поместите это «устройство» над каким-либо рисунком. Композиция из исходного рисунка и его отражений может выглядеть невероятно.

Предположим, что нарисован только один или два отрезка прямых линий, целиком помещающиеся в пространство между зеркалами и расположенные так, что они сами и их отражения соединены. Если подобрать положение зеркал и угол между ними, можно получать правильные геометрические фигуры.

Сохраняя угол между зеркалами меньше  $180^\circ$ , определите минимальное число отрезков прямых линий, необходимое, чтобы получился квадрат, восьмиугольник, шестиконечная звезда. Можно ли получить две трехконечные звезды, одну в другой, причем их вершины могут быть либо ориентированы одинаково, либо смотреть в разные стороны? А каково минимальное число прямых отрезков, необходимое, чтобы получился квадрат, в каждом из углов которого расположено по маленькому квадратику?

**ОТВЕТ •** Для получения квадрата, восьмиугольника и вообще любого правильного  $n$ -угольника достаточно одного отрезка, для шестиконечной звезды — три отрезка, для двух трехконечных звезд — два и три отрезка, для квадрата с квадратиками — три отрезка.

## Глава 7

# Физика зрения

## Танец броненосцев на фоне распухшей Луны

### 7.1 • ЛУННАЯ ИЛЛЮЗИЯ

Одна из самых поразительных иллюзий в природе — кажущееся увеличение Луны при ее приближении к горизонту (рис. 7.1). Из-за чего увеличивается Луна: из-за рефракции, то есть преломления световых лучей атмосферой, изменения расстояния до спутника Земли или вообще это чисто психологический эффект, то есть ошибка восприятия?

**ОТВЕТ •** Когда Луна опускается почти до горизонта, она кажется нам примерно на 50% больше, чем когда висит над головой, но это чистая иллюзия. На самом деле угловой размер Луны всегда равен примерно  $0,5^\circ$  независимо от того, высоко она находится над горизонтом или низко. Если бы рефракция света в атмосфере была достаточно большой, кажущийся вертикальный размер Луны уменьшился бы, а не увеличился. Расстояние между Землей и Луной в течение нескольких часов, пока Луна поднимается или опускается, тоже сильно не меняется.

Иллюзия, из-за которой Луна кажется нам больше, чем она есть на самом деле, возникает по нескольким причинам, действующим одновременно. Судя по всему, основная причина лунной иллюзии состоит в том, что вы сопоставляете низкую Луну с объектами ландшафта перед вами, и на фоне этих маленьких объектов Луна кажется больше. Вы можете легко избавиться от этой иллюзии: повернитесь на  $180^\circ$ , наклонитесь и посмотрите на Луну через просвет между ногами. Тогда вы увидите, что Луна приняла нормальные размеры. Вероятно, это происходит потому, что земная поверхность и предметы на ней, переместившиеся теперь в верхнюю часть вашего поля зрения, больше не используются вашим сознанием для масштабирования.



Рис. 7.1 / Задача 7.1

### 7.2 • ФОРМА НЕБА

Кажется ли вам, что небо имеет вид полусферы? Большинству людей небо по форме напоминает перевернутую суповую тарелку, и та его часть, которая находится над головой, кажется ближе тех, что лежат над горизонтом. Попробуйте провести следующие наблюдения. Когда на дневном небе появится месяц, мысленно проведите линию, делящую его пополам. Поскольку месяц виден только потому, что освещается солнечным светом, продолжение этой линии должно упираться прямо в солнце. Однако этого не происходит, поскольку ваше ощущение приплюснутости неба искажает линию, которую вы мысленно проводите по небу. Лучи прожектора прямые, но, когда вы смотрите на них сбоку, они кажутся изогнутыми из-за искаженного представления о форме неба. Почему небесный свод кажется нам приплюснутым?

**ОТВЕТ •** Мы воспринимаем форму неба в искаженном виде по многим причинам. Вот одна из них. Поскольку мы видим широкий открытый горизонт и между ним и нами много разных предметов, расстояние до неба над горизонтом нам кажется большим. А над нашей головой нет ничего, наши глаза находятся



в естественном, расслабленном состоянии, и нам кажется, что это расстояние меньше.

Иллюзия приплюснутости небесного свода может быть такой сильной, что лучи прожектора кажутся изогнутыми в соответствии с кривизной неба, а мысленно проведенная от луны линия не утыкается в солнце. И то и другое — оптические иллюзии.

### 7.3 • КАК «ОБЕЗГЛАВИТЬ» ЧЕЛОВЕКА С ПОМОЩЬЮ СЛЕПОГО ПЯТНА

В каждом глазу есть *слепое пятно*, в котором он ничего не видит. В нашем поле зрения оно занимает участок, смещенный на  $15^\circ$  от центра в сторону виска. Вы сами можете его обнаружить, водя перед собой вытянутой рукой с зажатым в ней маленьким предметом (скажем, ластиком на карандаше). Если вы будете смотреть вперед, не отводя взгляда, то, когда в поле зрения ластик пересечет слепое пятно, он «исчезнет».

Когда известному физиологу и психологу Карлу Лешли приходилось принимать у себя за обедом докучливого гостя, он развлекался тем, что наводил свое слепое пятно на лицо гостя, аккуратно «лишая» того головы. Существует старинная легенда (скорее всего, выдуманная) про английского короля Карла II Стюарта, тоже якобы любившего развлекаться, визуальное обезглавливая своих гостей. Ирония в том, что его собственный отец был обезглавлен по-настоящему, а не визуально.

Какие размеры имеет это пятно и почему оно слепое? Почему это слепое пятно мы обычно не замечаем?

**ОТВЕТ •** Сетчатка сплошь покрыта *фоторецепторами* — палочками и колбочками, кроме того участка, где нервные волокна выходят из сетчатки и направляются в мозг. Это пятно не содержит рецепторов и потому «слепое». Как правило, слепое пятно не ощущается по нескольким причинам. Обычно оба глаза открыты, так что, когда изображение объекта попадает в слепое пятно одного глаза, его видит другой глаз. Кроме того, вы концентрируетесь на объектах, находящихся в центральной части поля зрения, а эта область проецируется на центральную ямку на сетчатке (*фовеа*), дно которой выстлано колбочками максимально плотно, а не на слепое пятно. Некоторые детали изображения, попадающие на слепое пятно, восстанавливаются за счет постоянных самопроизвольных синхронных микродвижений глазных яблок (саккад), при которых глаз поворачивается примерно на градус. Наконец, мы

не всегда фиксируем глаз, и когда он сдвигается, изображение, сначала попавшее на слепое пятно, затем смещается на какое-то другое место сетчатки. Даже если бы все эти движения глаз отсутствовали, слепое пятно все равно было бы заполнено, поскольку мозг способен замещать недостающую часть изображения, «сшивая» картинки по обеим сторонам от слепого пятна.

### 7.4 • СЕРАЯ СЕТКА ПО УТРАМ, ЛЕТАЮЩИЕ ТОЧКИ ДНЕМ

Если вы утром откроете глаза в залитой солнцем комнате, ваше поле зрения будет покрыто серой сеткой. Эта сетка быстро исчезает, но ее можно искусственно воссоздать с помощью маленького фонарика или освещенного маленького отверстия — пинхола (не забывайте беречь глаза от яркого света). В темной комнате обведите фонариком по периметру поля зрения, и появятся фрагменты сетки. Что это за сетка и почему она так быстро тает?

Похожий эффект можно наблюдать в солнечный день. Когда я смотрю на голубое небо, в поле моего зрения проплывает множество пятнышек (которые мы обсудим в следующей задаче). Кроме того, перед глазами летают яркие точки с темными хвостами, и частота их появлений совпадает с частотой моего пульса. Они быстрее двигаются в систолической (при расширении сердца) и медленнее в диастолической (при сокращении сердца) фазе. Голубой свет их усиливает. Они видны везде за исключением линии зрения (эта линия упирается в центральную ямку на сетчатке). Что это за точки? Почему лучше всего они видны на голубом фоне? И почему их нет на линии, идущей из центральной ямки?

**ОТВЕТ •** Сетка образуется тенью, отбрасываемыми кровеносными сосудами на сетчатку, когда сосуды перекрывают свет и он не попадает на фоторецепторы, расположенные под ними на большей глубине внутри сетчатки. Точки — это белые кровяные тельца, движущиеся по кровеносным сосудам. Голубой цвет дает лучший контраст, поскольку красные клетки крови (эритроциты) поглощают свет на длине волны примерно 415 нм (голубой свет), а белые клетки крови его не поглощают. Поэтому движение белых кровяных телец на голубом фоне становится более заметным. Ни сетка, ни точки не появляются в области центральной ямки сетчатки, потому что там нет кровеносных сосудов.

Поскольку контраст любого изображения, появляющегося на сетчатке, в течение нескольких секунд

ослабевает, сетка быстро исчезает. При движении через поле зрения небольшого источника света тени, отбрасываемые кровеносными сосудами, постоянно смещаются, и сетка остается видимой.

Когда выяснилось происхождение сетки, образующейся на сетчатке при освещении поля зрения светом, выходящим из крошечного отверстия, ученые смогли объяснить и загадочные наблюдения Венеры, сделанные астрономом Персивалем Лоуэллом, который постоянно видел некие «каналы» на поверхности планеты. Более того, эти каналы всегда находились в одном и том же месте, из чего следовало, что Венера всегда повернута к Земле одной и той же стороной, что выглядело весьма странным. Так вот, «спицы», которые наблюдал Лоуэлл, были, по-видимому, тенью кровеносных сосудов на сетчатке глаза Лоуэлла. Он наблюдал Венеру через маленький окуляр, что было эквивалентно наблюдению через крошечное отверстие: Лоуэлл мог видеть Венеру, но на ее изображение накладывалась сетка на сетчатке его глаз.

## 7.5 • МУШКИ И ДРУГИЕ ПЯТНА В ГЛАЗУ

Когда я смотрю на безоблачное небо или какой-нибудь другой яркий ровный фон, в моем поле зрения появляется всякий мусор — маленькие пятнышки и летающие точки. Точки рассматривались в предыдущей задаче, а в этой мы рассмотрим маленькие плавающие пятнышки, каждое из которых образовано концентрическими кругами. Но иногда я вижу и большие вытянутые структуры, например, одна такая структура в моем правом глазу часто мешает мне читать этим глазом.

Мушки, как их называют, более заметны, если глаз освещается небольшим источником света. Например, я в качестве такого источника обычно использую крошечное отверстие, проделанное в непрозрачном картоне. Однако можно использовать любые маленькие источники света, например хорошо отражающую скрепку для бумаги. (Кстати, я всегда осторожен, поднося любые предметы близко к глазу.)

Когда я использую для наблюдений крошечное отверстие, то замечаю еще несколько любопытных особенностей: появляются яркие крапинки, в которых нет концентрических кругов, как в обычных мушках. Иногда я вижу темные крапинки и неподвижный узор из линий, разбегающихся от центра поля зрения. Сразу после того, как глаз моргнет, я вижу яркие пятна и узор из светлых и темных горизонтальных линий. Иногда я вижу еще и стационарные яркие пятна или

плавающие «обрывки» неправильной формы. Открывая глаза утром, я могу увидеть одно или несколько пятен, гораздо более темных или (что реже) более светлых, чем остальное поле зрения.

Откуда берутся все эти зрительные помехи?

**ОТВЕТ** • Появление мушек обычно связано с неоднородностью стекловидного тела глаза (прозрачного вещества, заполняющего почти весь объем глазного яблока). Вы не можете увидеть сами нарушения однородной структуры и даже их тень на сетчатке, но можете различить дифракционную картину, вызываемую ими на сетчатке. Дифракция — тип интерференции, которой световые волны подвергаются при прохождении через маленькое отверстие или при огибании маленького препятствия. Когда свет из отверстия падает на неоднородный участок стекловидного тела, он дифрагирует, в результате на сетчатке появляется интерференционная картина, которая состоит из концентрических полос в тех местах, где световые волны усиливают друг друга, и темных полос в тех местах, где они гасят друг друга.

Если участок другой плотности почти круглый, получаются интерференционные кольца с центральным пятном. Если же он удлиненный, он дает интерференционную картину в виде вытянутых фигур. Мушки, которые мы обычно видим, — это размытая дифракционная картина. Если смотреть через маленькое отверстие, интерференционная картина будет более четкой, и темные и светлые полосы становятся различимыми. Мушки перемещаются через линию зрения потому, что стекловидное тело — не жесткая структура и неоднородности могут сдвигаться.

Некоторые мушки могут возникнуть из-за того, что кусочки стекловидного тела оторвались и плавают в жидкости напротив центральной ямки на сетчатке, в которую упирается линия зрения (*фовеа*). Они могут также появляться из-за микрокровоизлияний в жидкий слой, но тогда поле зрения должно слегка окраситься в красный цвет. Все видят мушки, и это не обязательно связано с медицинскими проблемами. С возрастом человек обычно видит больше мушек.

Яркие точки и узоры из светлых и темных полос, возникающие после того, как глаз моргнет, объясняются тем, что на роговице остается жидкая (слезная) пленка, а на неоднородностях этой пленки световые лучи могут слегка сфокусироваться, и на роговице появятся более яркие области. Линии, расходящиеся

от центра поля зрения, могут быть вызваны радиальной структурой хрусталика. Темные точки могут возникать из-за небольших непрозрачных включений в хрусталике. Происхождение темных и светлых пятен, которые люди порой видят, как только открывают глаза утром, неизвестно.

### 7.6 • ОРЕОЛЫ ВОКРУГ УЛИЧНЫХ ФОНАРЕЙ, ГОРЯЩИХ СВЕЧЕЙ И ЗВЕЗД

Если ночью смотреть прямо на источник яркого света, вокруг него можно увидеть кольца (гало). Если смотреть на него сквозь окно, на котором выступил конденсат, появится другая система колец. Диаметры первых пяти колец (если измерять в градусах дуги) в поле вашего зрения могут быть равны, например,  $2,5^\circ$ ,  $4,5^\circ$ ,  $5,5^\circ$ ,  $6,0^\circ$  и  $9,0^\circ$ . Кольца имеют больший размер в красном свете, чем в голубом. Так что если источник испускает белый свет, кольца могут быть окрашены в красный с наружной стороны и голубой с внутренней. Почему появляются кольца?

На некоторых картинах Винсента Ван Гога вокруг источников света изображены кольца: такие кольца вокруг солнца можно увидеть на картине «Красные виноградники в Арле», а вокруг звезд — на картине «Звездная ночь». Одна из причин, почему художник изобразил на картине кольца, — желание создать у зрителя впечатление светящихся объектов. Однако говорят, что художник действительно видел эти кольца, поскольку его зрение было нарушено приемом дигиталиса в небезопасных дозах.

Почему вокруг пламени свечи, если смотреть на него в темной комнате, виден светящийся ореол? Известно, что звезды мерцают из-за турбулентности атмосферы, но почему когда мы смотрим на них, то обычно видим, как от них по радиусам расходятся яркие лучи?

**ОТВЕТ •** Кольца вокруг источников яркого света, образующиеся при дифракции света на маленьких неоднородностях внутри глаза, называются *эптопическим гало*. Дифракция возникает, когда световые волны на пути к сетчатке обходят маленькое препятствие и складываются в картину, состоящую из ярких и темных концентрических колец вокруг яркого центрального пятна. Светлые области — там, где световые волны усиливают друг друга, а темные — там, где гасят друг друга. Центральное световое пятно неразлично, поскольку оно накладывается на гораздо более яркое

изображение самого источника света. Но первое светлое кольцо увидеть можно, его угловой размер зависит от структуры неоднородности, на которой свет дифрагировал, и от расстояния от этой неоднородности до сетчатки: чем меньше неоднородность и чем больше расстояние до сетчатки, тем больше радиус кольца.

Если видно несколько колец, значит, дифракция возникла на нескольких неоднородностях с разными размерами и разными расстояниями до сетчатки. Никто точно не знает, какая именно неоднородность привела к дифракции. Это могли быть клетки эпителия роговицы (их размеры лежат в диапазоне 10–40 микрон), клетки эндотелия роговицы, царапины на роговице или волокна хрусталика.

Дифракция света внутри глаза ответственна и за появление слабого светящегося ореола вокруг пламени свечи, и за яркие, расходящиеся от звезды или другого маленького, яркого, очень далекого объекта лучи. Эти дифракционные картины, возможно, появляются из-за нерегулярностей в швах, соединяющих волокна, на передней поверхности хрусталика.

### 7.7 • ФОСФЕНЫ — ПСИХОДЕЛИЧЕСКИЕ КАРТИНКИ

Иногда заключенных в темных камерах посещают яркие световые видения — красочные или испещренные цветными пятнами картины, называемые *фосфенами*. Водители-дальнобойщики тоже, случается, видят такие картины, если перед тем они долго смотрели на заснеженное полотно дороги. На самом деле, когда в поле зрения долго не попадают никакие объекты, всегда возникают фосфены.

Головные боли (мигрени) и некоторые галлюциногенные препараты также могут вызывать фосфены. Подобные картины могут возникать, если человек (точнее, его голова) ускоренно движется. Об этом рассказывают пилоты и космонавты. Фосфены можно при желании вызвать, слегка надавив на закрытое веко. (Не давите сильно, чтобы не повредить глаза, и никогда не надавливайте на веки, если носите контактные линзы!)

Фосфены могут появляться, когда человек смотрит на мигающий свет, например от стробоскопа на рок-концерте или в танцевальном клубе. Когда я смотрю на стробированный свет, мерцающий с частотой от 10 до 30 раз в секунду, перед глазами начинают мелькать живописно раскрашенные геометрические узоры. (Ради безопасности я закрываю глаза, когда смотрю на стробоскоп: свет такой яркий, что он проходит и через веки.) Иногда я вижу узор в виде шахматной

доски с квадратами, иногда — в виде шестиугольников или треугольников. При медленных миганиях фосфены имеют вид завитков. Они исчезают, если частота миганий увеличивается. Чтобы увидеть сложные геометрические картины, должны освещаться оба глаза. Если освещается только один глаз, возникают простые картины, составленные из линий и завитков.

Согласно некоторым литературным источникам, фосфены могут возникать, если через голову пропустить слабый электрический ток. Я никогда не пробовал проводить этот опасный эксперимент, и вы не должны этого делать. В XVIII веке фосфеновые вечеринки были в большой моде (однажды на такую вечеринку зашел даже Бенджамин Франклин). Люди становились в круг и брались за руки, после чего к крайним в цепочке прикладывалось высокое напряжение от электростатического генератора, который мог генерировать лишь весьма слабый ток. Каждый раз, когда цепь замыкалась и через них шел ток, они видели фосфены.

Еще более экстравагантными и весьма опасными были опыты психолога Йоханнеса Пуркинье, проведенные им над самим собой в 1819 году. Один электрод он прикладывал ко лбу, а другой вставлял в рот и периодически разрывал соединение, так что через его голову проходили импульсы тока, вызывавшие фосфеновые картины. (Никогда не повторяйте подобные эксперименты: при разрыве цепи даже низковольтного источника может генерироваться высокое напряжение, если нагрузка индуктивная; для этого эффекта в электротехнике есть даже специальное название — «экстратоки размыкания».)

Как образуются фосфены?

**ОТВЕТ** • Когда вы надавливаете на закрытое веко, стекловидное тело, заполняющее глазное яблоко, давит на сетчатку или нервные окончания, посылая в мозг сигналы, как при попадании в глаз света. Таким образом, человек может воспринимать свет, даже когда свет в его глаз не попадает.

Фосфены появляются и когда вы смотрите на мерцающий свет. Более сложные геометрические узоры возникают, когда свет падает на оба глаза. Значит, эти картины рождаются в результате обработки мозгом сигналов, полученных от обоих глаз. Геометрические узоры возникают из-за того, что нервные сигналы активируют в головном мозге участки, отвечающие за восприятие линий и форм. Цветные фосфены возникают, когда активируются участки мозга, отвечающие

за цвета. Таким образом, цвет воспринимается не только когда свет, идущий от цветных предметов, воздействует непосредственно на колбочки-фоторецепторы, расположенные на сетчатке. Не исключено, что прерывистый свет каким-то образом соответствует кодировке, отвечающей в головном мозге за цвета. Если это так, то прерывистый белый свет может возбудить цветные картины. Но все-таки вероятнее, что цветные фосфены появляются из-за взаимодействия нервных волокон в сетчатке и нервных волокон, идущих к мозгу.

Фосфены, возникающие при пропускании тока, могут быть следствием прямого воздействия на мозг. Некоторые незрячие люди могли бы обрести зрение, если в оправу очков вмонтировать миниатюрную видеокамеру, посылающую сигналы в микропроцессор, который обрабатывал бы изображение и посылал слабые сигналы прямо в мозг. Например, если бы камера обнаружила объект в левой половине поля зрения, мозг следовало бы простимулировать так, чтобы фосфен воспринимался в левой части поля зрения. Таким образом, окружающая действительность передавалась бы с помощью фосфенов, и незрячий человек смог бы в определенном смысле «прозреть».

Не исключено, что в наскальных рисунках времен палеолита, обнаруженных в пещерах и на стоянках доисторических людей, нашли свое отражение фосфены, рожденные под влиянием галлюциногенов. Они могли быть частью чьих-то видений (возможно, шамана, впавшего в транс) и воспринимались как проявление высших сил, которые, как полагали древние, правят миром.

## 7.8 • ЖУЖЖАНИЕ И СТРОБОСКОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Если пожужжать на определенной частоте, можно «остановить» вращение пропеллера самолета или лопастей вентилятора. Эта иллюзия вызвана стробоскопическим эффектом. Если жужжать на частоте чуть более низкой, чем частота вращающегося объекта, стробоскопическая картина будет медленно вращаться в том же направлении, а если на чуть более высокой — в противоположном направлении.

Если пожужжать, глядя в то же время на телевизионный экран с достаточно большого расстояния, можно получить тот же эффект остановки движения. Жужжание приводит к появлению линий на экране — стационарных при одной частоте жужжания и движущихся вверх или вниз при слегка измененных частотах. Этот эффект имеет место только при образовании



изображения из отдельных строк, как это делалось при использовании в телевизорах вакуумных кинескопов. С современным телевизором, имеющим плазменный или жидкокристаллический экран, это не получится — у них изображение формируется иначе.

Чтобы понять, как жужжание влияет на зрение, я сделал бумажный шаблон и поместил его на диск проигрывателя для виниловых пластинок. Шаблон состоял из чередующихся белых и черных секторов, расширяющихся от центра к периферии, угол каждого сектора составлял  $1^\circ$ . Я осветил шаблон солнечным светом (освещение люминесцентной лампой не годится — она светит мигающим светом), включил проигрыватель, и он стал вращаться, делая 33,3 оборота в минуту (частота вращения проигрывателя для виниловых пластинок). Поскольку я не мог все время жужжать на определенной фиксированной частоте, я прижал подбородок к маленькому динамику, который колебался с частотой 100 Гц (он питался от звукового генератора). И когда я включил звуковой генератор, вместо вращающегося на поворотном столике шаблона застыло размытое тусклое его изображение — эту иллюзию остановки движения вызвал стробоскопический эффект. Почему в этом и других примерах колебания (динамика, подключенного к звуковому генератору, или голоса при жужжании) «останавливают» вращение?

**ОТВЕТ •** Жужжание или дрожание головы, прижатой к работающему динамику, — все это вызывает периодические движения глаз в вертикальном направлении. Если эти колебания происходят на правильной частоте, изображение на сетчатке предмета, движущегося через поле зрения, остается в одном и том же положении в течение большей части колебательного цикла движения глаза.

Допустим, я смотрю на опускающуюся в поле моего зрения секцию шаблона, стоящего на поворотном столике. В это время мой глаз тоже опускается при колебаниях динамика, так что секция продолжает проецироваться на ту же самую часть сетчатки моего глаза и потому кажется неподвижной. Когда глаз начинает двигаться вверх, изображение секции сдвигается по сетчатке, но только на короткое время. Очень быстро исходное изображение черно-белого шаблона опять возвращается на прежнее место на сетчатке. Моя зрительная система усредняет яркость изображения за период колебаний. Участки сетчатки, на которых в течение большей части периода колебаний

проецируются освещенные участки шаблона, воспринимаются как яркие. Те места, на которых большую часть периода попадают изображения темных частей шаблона, воспринимаются (по контрасту с яркими) как темные. Таким образом, черно-белый шаблон кажется неподвижным.

Изображение на экране телевизора создается горизонтальной разверткой: электронный луч пробегает строку за строкой от верхнего края экрана к нижнему. Обычно затухание яркости каждой строки незаметно из-за большой скорости развертки и инерционности зрения. Когда я начинаю жужжать на соответствующей частоте, движения моего глаза за счет стробоскопического эффекта останавливают развертку. В течение всего периода колебаний на моей сетчатке отпечатывается темная горизонтальная линия — это образ линии на экране, когда старое изображение уже исчезло, а новое еще не появилось. Поэтому на экране я постоянно вижу темную линию.

## 7.9 • КАК УСЛЕДИТЬ ЗА ЛЕТАЩИМ БЕЙСБОЛЬНЫМ МЯЧОМ

Знаменитый Тед Вилльямс, один из лучших бэттеров (отбивающих) в истории бейсбола, утверждал, что может разглядеть, как брошенный питчером мяч ударится о его биты. Другие бейсболисты утверждали, что видят швы на мяче и его вращение в тот момент, когда он летит на них. Правда ли, что игроки успевают разглядеть эти детали? Следит ли игрок взглядом за мячом, начиная с момента удара по нему питчером и до момента, когда он либо пролетит за пластину «дома», либо по нему ударят битой?

Обязательно ли у игрока должны быть два нормально видящих глаза, чтобы играть в бейсбол? Кажется бы, да. Как же тогда игроки, у которых работает только один глаз, могли определять траекторию мяча и расстояние до него? И как человек, у которого видит только один глаз, может чувствовать глубину поля зрения при вождении автомобиля или управлении самолетом? Например, для посадки самолета, безусловно, требуется объемное зрение, хотя знаменитый пилот Вилли Пост видел только одним глазом.

**ОТВЕТ •** Предположим, профессиональный бэттер, стоя у «дома», должен отбить мяч битой, держа ее в правой руке. Чтобы следить за летящим к «дому» мячом, он должен быстро поворачивать свою линию зрения в правую сторону от питчера. Большинство игроков



могут делать это до тех пор, пока мяч не окажется на расстоянии примерно 1,7 м от пластины «дома», после чего скорость требуемого поворота уже должна быть слишком большой для обычного игрока. Однако он все же сможет увидеть, как бита ударяет по мячу, если правильно рассчитает, где произойдет их встреча, и скачком переведет линию зрения в эту точку. Тед Вильямс, видимо, умел это делать.

Есть еще один фактор, помогающий проследить за полетом мяча. Очевидно, система зрения способна определять направление движения объекта, даже если не может определить его положение. Эта способность является важным фактором выживания: обычно можно определить, движется ли объект к вам, даже если нельзя сказать точно, где в каждый данный момент он находится. Движущийся предмет воспринимается и в том случае, если видит только один глаз. Люди, у которых функционирует единственный глаз, могут играть в спортивные игры и пилотировать самолеты, но, если видят оба глаза, мозг может сравнить относительные движения, воспринимаемые каждым глазом. Например, если правый глаз видит, что движущийся объект смещается влево, а левый — что вправо, это значит, что объект движется прямо на вас.

### 7.10 • ИМПРЕССИОНИЗМ

Для стиля импрессионизма в живописи характерна определенная техника: краска накладывается отдельными мазками так, что объекты и фон теряют четкость очертаний. Импрессионисты часто работали на пленэре. Основатель этого направления Клод Моне знаменит своими пейзажами и сценами под открытым небом. Со временем в его картинах начали преобладать теплые, красные и желтые, цвета, а холодные цвета противоположного края спектра постепенно исчезали. Хотя импрессионизм, безусловно, является ярким художественным течением, мог ли он возникнуть в силу каких-то физических или физиологических причин? Чем объясняется смена цветовой гаммы на картинах Моне?

**ОТВЕТ •** Многие представители этого направления имели дефекты зрения. Некоторые из них страдали близорукостью, то есть изображаемые объекты они видели расплывчатыми. Именно такими — размытыми и туманными — и предстают перед нами образы на полотнах импрессионистов. Известно, что по крайней мере один художник-импрессионист, работая, ставил холст на расстоянии вытянутой руки, чтобы он

тоже был не в фокусе. У других, например Моне, была катаракта (помутнение хрусталика), которая мешала видеть дальше нескольких метров. Вероятнее всего, это была ядерная катаракта, которая поглощает цвета, относящиеся к синему концу спектра, и пропускает желто-красный свет, что объясняет преобладание желто-красного цвета в его более поздних работах. После хирургической операции по удалению катаракты Моне, взглянув на свои прежние желто-красные картины, пришел в ужас и грозился уничтожить или переписать их.

### 7.11 • ПУАНТИЛИСТИЧЕСКИЙ СТИЛЬ В ЖИВОПИСИ

Пуантилистические картины, такие как полотно Жоржа Сёра «Воскресный день на острове Гранд-Жатт», написаны не обычными мазками, а маленькими разноцветными точками. Если вы подойдете к картине вплотную, то сможете разглядеть точки, но по мере того, как вы будете отходить от нее все дальше, точки постепенно сольются, и в какой-то момент их уже невозможно будет различить. Более того, цвет, который вы видите в любом месте картины, может измениться, когда вы отойдете от полотна. Что вызывает это изменение цвета?

**ОТВЕТ •** Когда свет проходит через круглый зрачок, он дифрагирует, то есть лучи отклоняются от прямолинейного направления, и образуется интерференционная картина. Если смотреть на точечный источник света, из-за дифракции на сетчатке образуется круглое изображение этого источника. Если вы рассматриваете два соседних источника света, каждый из них пытается сформировать собственное круглое изображение, но, если источники расположены слишком близко, изображения перекроются, и вы сможете увидеть только изображение слившихся источников. Таким образом, расстояние между источниками, при котором начинают перекрываться их изображения, — это ваш предел разрешения двух источников света как отдельных точек.

Две соседние цветные точки в пуантилистической картине служат двумя источниками света. Предположим, что это точки разного цвета. Если вы стоите прямо перед картиной, точки расположены достаточно далеко друг от друга, на сетчатке формируются отдельные их изображения, и вы видите истинные цвета точек. Когда вы отодвигаетесь от картины, изображения точек в какой-то момент начинают перекрываться, и вы уже не можете их различить. Цвет, который мозг

создает в сознании, является результатом *аддитивно-го* сложения цвета точек, когда складываются потоки излучения, идущие от отдельных точек. Предположим, что пурпурная (смесь синего с красным) точка расположена рядом с желтой точкой. Комбинация этих двух цветов (пурпурного и желтого) воспринимается как розовая. Таким образом, художник-пуантилист использует нашу зрительную систему для создания цветовой гаммы своей картины.

Традиционная картина маслом обычно более темная, чем та, что написана точками, потому что ее цвет зависит от смеси красок в масляном слое, причем каждая краска поглощает часть излучения (*субтрактивное* сложение цветов). Свет должен пройти сквозь этот слой, отразиться, а затем пройти через слой обратно, чтобы попасть в глаза. Когда в слой краски добавляется больше красителя, свет, выходящий из картины, становится менее ярким. Поскольку в пуантилистической картине цвета смешиваются в вашем мозге, а не на холсте, свет при отражении от такой картины меньше теряет в яркости.

Многие цветные поверхности (например мозаика, окрашенные ткани, цветная печать на бумаге и экраны цветных мониторов) — это массив разноцветных точек. В традиционной теории цвета все возможные цвета получаются смешением трех основных цветов (красного, синего и зеленого). Поэтому цветной монитор содержит точки этих трех цветов. Различные цвета получаются из этих трех цветов с помощью управления яркостью каждой точки.

### 7.12 • МУАРОВЫЕ УЗОРЫ

Когда сетка с мелкими ячейками накладывается на структуру с похожим периодическим рисунком, можно увидеть более крупный узор, называемый *муаровым узором*. Я наблюдаю муаровые узоры, когда кусок шелковой ткани накладывается на другой кусок шелка или когда один забор из штакетника стоит за параллельным ему забором из штакетника. Я вижу их и в узорах, образованных круглыми отверстиями. Когда один из таких узоров сдвинут вперед на несколько сантиметров относительно другого такого же узора, в этой системе возникает круговой муаровый узор. Откуда возникают муаровые узоры?

**ОТВЕТ •** Муаровые узоры возникают из-за периодичности наложенных друг на друга структур. Рассмотрим, например, два параллельных забора из штакетника,

стоящих на некотором расстоянии друг от друга. Свет падает на них сзади. В некоторых точках просветы между планками совпадут в вашем поле зрения, и вы будете видеть освещенные просветы. В других точках планки будут перекрывать свет, и вы будете видеть темные области. Там, где перекрытие будет неполным, просветы будут узкими. Система этих ярких и темных участков и есть муаровый узор, который мы видим на заборах — повторяющееся чередование светлых и темных полос по длине забора. Если один из заборов слегка сдвинуть, меньше чем на расстояние между двумя соседними планками, сдвиг муарового узора будет заметным, что усилит ощущение от фактического сдвига забора.

Лучшее объяснение того, почему муаровые узоры производят подобное впечатление, состоит в том, что наша зрительная система особенно чувствительна к пересечению линий и фиксирует взгляд на этих пересечениях. Из-за этой чувствительности становятся заметными даже малые смещения пространственно-периодических структур, образующих муаровые узоры.

Кроме того, широкие темные и светлые полосы муарового узора более заметны, нежели исходные периодические структуры, а перемещение этих муаровых полос оказывается значительно более быстрым, нежели движение исходных структур. Поднесите расческу к зеркалу и убедитесь в этом сами.

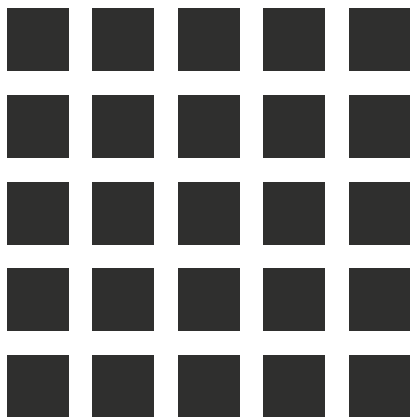
### 7.13 • ОП-АРТ

Когда вы рассматриваете картину, выполненную в технике *оп-арта* (сокращение, введенное в 1964 году для обозначения «оптического искусства», которое использует оптические иллюзии), статическое изображение линий или пятен создает иллюзию их движения, как будто части композиции качаются, крутятся или периодически вспыхивают и гаснут. Картины *оп-арта* могут также создать иллюзию перетекания краски от одного участка картины к другому. Как возникают эти иллюзии?

**ОТВЕТ •** Никто не может как следует объяснить причину этих иллюзий. Их до сих пор пытаются понять, каталогизировать и сравнить. Для художника — это доказательство того, что новые открытия могут породить новые формы искусства. Для физиолога — это возможность понять то, как работает зрительная система и мозг.

Зрительная система может сохранить образ увиденного в форме *остаточного изображения* (*послеобраза*). Глаз совершает небольшие прыжки, *саккады*,

при которых видимая картина слегка меняется. Когда вы смотрите на картину в технике оп-арта, на которой изображены геометрические объекты, остаточные изображения от последовательных саккад могут в сознании наложиться друг на друга. Но поскольку остаточные изображения слегка отличаются, начинает казаться, что они движутся. Иллюзия эта трудноуловимая, и вы можете не осознавать, что это иллюзия, вы просто чувствуете, что картины оп-арта отличаются от статических изображений геометрических фигур.



**Рис. 7.2 / Задача 7.13.** Решетка с появляющимися и исчезающими темными пятнами на пересечениях белых линий.

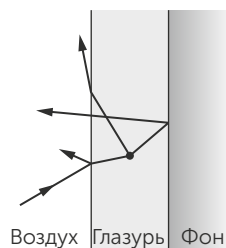
Некоторые геометрические узоры создают иллюзию присутствия светлых и темных пятен в местах, где этих пятен нет. Например, на решетке, изображенной на рис. 7.2, можно заметить появляющиеся и исчезающие темные пятна на пересечениях светлых линий. Это так называемые *индуцированные пятна*. Причина появления этих пятен не совсем понятна, но, возможно, она связана с тем, что фоторецепторы одной части глаза взаимодействуют с фоторецепторами соседней части глаза. Позже мы проиллюстрируем этот эффект на примере полос Маха. В некоторых цветовых узорах могут появиться индуцированные цветные полосы или пятна (*неоновый эффект*), указывая на то, что взаимодействие включает передачу сообщений о цвете от глаз к мозгу.

#### 7.14 • ЭФФЕКТ ГЛУБИНЫ НА КАРТИНАХ, НАПИСАННЫХ МАСЛОМ

Художники фламандской школы живописи XV века достигли исключительного мастерства в создании иллюзии глубины в масляной живописи с помощью *глазури* — нанесения на полотно тонких прозрачных слоев краски. Почему некоторые детали картин кажутся нам

ближе, чем другие, и почему краска кажется нанесенной не на поверхность картины, а внедренной во внутренние слои картины?

**ОТВЕТ •** Часть света, попадающего на такой фрагмент картины, отражается от внешней поверхности глазури, а остальная его часть проходит сквозь все слои краски (рис. 7.3). Красители, растворенные в глазури, рассеивают свет наружу и внутрь. Любой свет, прямой или рассеянный, который достигает задней поверхности, отражается от белого (непрозрачного) холста. Когда свет снова проходит через глазури в обратном направлении, он снова может рассеяться на красителях. Когда к вам приходит отраженный свет от картины, вы воспринимаете и ту его часть, которая отражается от внешней поверхности глазури, и часть, отраженную от красителя в глазури. Цветовые пятна кажутся лежащими за этой внешней поверхностью, особенно когда вы смотрите на картину обоими глазами, так что их конвергенция на цветном пятне позволяет увидеть пятно в глубине картины.



**Рис. 7.3 / Задача 7.14.** Картина маслом с глазурью. Свет рассеивается на передней и задней поверхностях, а также на красителе, входящем в состав глазури.

Художник может варьировать насыщенность цвета (или блеск), накладывая более одного слоя глазури с одинаковыми красителями. Каждый дополнительный слой делает цвет, создаваемый красителем, более насыщенным, потому что в этом слое возникает дополнительное рассеяние. Например, если краситель рассеивает свет с синей длиной волны больше, чем свет с другими длинами волн, то дополнительные слои, содержащие тот же краситель, усиливают синий цвет на картине.

Часто на полотно для защиты наносится слой лака. Этот слой не содержит красителей и не усиливает ощущение глубины изображения. Наоборот, частичное поглощение света в нем обычно ухудшает впечатление от картины, приглушая цвета и даже делая неразличимыми некоторые оттенки.

### 7.15 • ЧТЕНИЕ В ТЕМНОТЕ

Самое поразительное остаточное изображение (послеобраз), которое я видел, возникало после яркой вспышки в темной комнате. Я клал открытый журнал перед собой, а затем выключал свет. После того как мои глаза привыкали к темноте (около 10–15 минут), я устанавливал фотоаппарат со вспышкой рядом с головой и освещал пространство перед собой одиночной вспышкой. Вспышка была слишком яркой, чтобы я мог различить текст или рисунок в момент вспышки.

Если я не отводил взгляд в то время, пока слепящий свет гас, передо мной появлялось четкое изображение журнальной страницы, как будто она освещалась постоянным ярким светом. То, что я видел, — это, как говорят, *послеобраз-позитив*, поскольку светлые части журнальной страницы кажутся белыми, а темные — черными. Фотографии, рисунки и размер абзацев были легко различимы, я даже мог прочитать слова, хотя ничего из этого я не мог заметить во время вспышки. Примерно через 15 секунд послеобраз из позитивного превращался в *негативный*, в котором черное и белое менялись местами.

Если я включал вспышку дважды, я видел два наложенных послеобраза-позитива. Если я бросал монету во время вспышек, я видел два изображения монеты в разные моменты ее падения, как будто я рассматривал стробоскопическую фотографию. Иногда позитивный послеобраз может быть странным. Если я включал вспышку, когда моя рука находилась передо мной, а затем отводил руку за спину, я видел изображение моей руки в прежней позиции и при этом чувствовал ее присутствие за спиной. Если я включал вспышку, стоя и глядя в пол, а затем приседал на корточки, я видел далекое изображение пола, но по положению своего тела я знал, что пол должен быть ближе.

Однажды я увидел позитивный послеобраз на балетном спектакле. Во время перерыва я сидел с закрытыми глазами. Когда началось второе действие, я на мгновение открыл глаза и увидел поток яркого света. Как только я снова их закрыл, передо мной возникло изображение танцоров на сцене.

Я вижу похожие послеобразы, когда просыпаюсь в хорошо освещенной комнате. Когда я лежу с закрытыми глазами, я вижу только красный свет, пробивающийся сквозь мои веки. Я подношу руку к лицу, а затем на короткое время открываю глаза. Когда я их опять закрываю, я вижу послеобраз сначала в виде негатива, а затем — позитива. Если же я открою глаза

на несколько минут, чтобы они успели привыкнуть к свету в комнате, я уже не могу добиться этого эффекта.

Эти разные позитивные послеобразы появляются, если я не отвожу взгляд, но сразу же стираются, если я двигаю глазами относительно головы. Как образуются *послеобразы-позитивы* и как образуются *послеобразы-негативы*?

**ОТВЕТ •** Причина появления позитивного послеобраза не вполне понятна. Возможно, мозг просто не успевает за время вспышки (это около миллисекунды) обработать информацию. Но кратковременная мощная вспышка света инициирует все необходимые фотохимические процессы в фоторецепторах, а потом мозг «не спеша» обрабатывает все сигналы. Появление следующего за позитивным негативного послеобраза, вероятно, связано с усталостью зрительной системы. Сильнее устают те группы фоторецепторов, которые сильно возбуждались ярким освещением, и изображения в этих местах становятся более темными, чем в местах, которые слабо возбуждались.

### 7.16 • ЦВЕТНОЙ ПРИЗРАК СВЕЯЩЕЙСЯ ТОЧКИ

Наблюдая за движением маленькой светящейся точки в темной комнате, можно увидеть остаточное изображение, сходное с позитивным послеобразом из предыдущей задачи. Выключите свет, откройте глаза и после того, как через несколько минут ваши глаза адаптируются к темноте, покрутите перед глазами точечный источник света. Вы увидите, что за ним с небольшой задержкой движется другая светящаяся точка-призрак, за которой тянется слабый светящийся след-хвост.

Если реальная светящаяся точка темно-красного цвета, «хвостатый» призрак не появляется. Если основная светящаяся точка желтая или желто-красная, призрак (и, возможно, его след) могут быть бледно-голубого цвета. Однако если ваши глаза полностью адаптировались к темноте (адаптация происходит за 10–15 минут), призрак и его след всегда бесцветные, серые. Почему появляется хвостатый призрак и чем объясняется его цвет? Почему за темно-красной светящейся точкой призрак не следует?

**ОТВЕТ •** Призрачный источник света и его хвост являются, скорее всего, послеобразами, создаваемыми палочками-фоторецепторами, когда они освещаются реальным перемещающимся источником света. Для того чтобы палочки, глазные нервы и мозг опять смогли

начать реагировать на свет, требуется некоторое не-большое время, поэтому в вашем сознании призрак появляется с задержкой. Если бы призрак возникал из-за инерционности зрения, этой задержки не было бы. Его хвост — это последовательность медленно затухающих послеобразов. Источник темно-красного света не создает послеобразов, поскольку чувствительность фоторецепторов в этой части спектра мала.

Почему призрак цветной, не совсем понятно, и этот вопрос редко обсуждается. Можно предположить, что это происходит из-за того, что сигнал от палочек взаимодействует с информацией о цвете, посылаемой колбочками, лежащими вдоль освещенного пути на сетчатке. Хотя считается, что палочки не могут посылать в мозг информацию о цвете, создается впечатление, что они способны блокировать информацию о цвете, идущую от колбочек. Когда желтый или желто-красный свет попадает на сетчатку, подавление информации о нем палочками приводит к тому, что он воспринимается как голубой — цвет, дополнительный по отношению к желтому. Подавление информации исчезает, когда глаз полностью настраивается на темноту. Тогда призрак кажется серым.

## 7.17 • ОТРАЖАЮЩИЕ ГЛАЗА

Узкий луч вашего фонарика пронизывает густую тьму. Внезапно в его луче возникает пара ярких огоньков, вы пугаетесь, но ваш страх исчезает, как только вы слышите ласковое мяуканье.

Почему глаза кошки кажутся светящимися, когда прямо на них направляется луч фонарика, но перестают светиться, едва она слегка отводит глаза? Почему на фотоснимках у человека иногда красные глаза?

У морского гребешка глаза состоят из хрусталика, толстой сетчатки и вогнутого зеркала, расположенного за сетчаткой. Его хрусталик — настолько слабо-выпуклая линза, что она лишь слегка преломляет световые лучи и, следовательно, не может сформировать изображение. Кроме того, в отличие от нашего глаза, хрусталик моллюска расположен вплотную к сетчатке, так что преломленным лучам негде пересечься и сформировать изображение. Как же изображение образуется в глазах гребешка? Зеркало — отличный отражатель, но как биологическая система может иметь отражающую поверхность, которая по качеству соперничает с современными металлическими зеркалами?

**ОТВЕТ •** За фоторецепторами в сетчатке кошачьего глаза находится слой, отражающий свет, который

потом идет обратно через рецепторы, так что у них появляется второй шанс этот свет поглотить. Эта удвоенная эффективность очень помогает выживать ночным бродягам. Когда вы посветите фонариком в глаза кошке, а кошка в этот момент посмотрит на вас, вы увидите часть света, отраженного от задней поверхности сетчатки ее глаз.

В глазу человека задняя поверхность сетчатки отражает не так хорошо, и когда в темноте ему в глаза светят фонариком, они не сильно светятся. Однако отраженный свет все же можно заметить на фотографиях, сделанных фотоаппаратом со вспышкой, если человек смотрит прямо в объектив.

Формирование изображения в глазу человека происходит в результате преломления световых лучей в роговице и хрусталике. А в глазах гребешков изображение образуется благодаря отражению света от вогнутого зеркала, расположенного за сетчаткой. Попадая в глаз гребешка, лучи света проходят через хрусталик и сетчатку, отражаются от вогнутого зеркала, фокусируются и формируют изображение внутри сетчатки глаза.

Это зеркало отличается от зеркала, висящего у вас в ванной. Оно образовано не единичным слоем отражающего вещества, а состоит из перемежающихся слоев цитоплазмы (с маленьким коэффициентом преломления) и кристалликов гуанина (с большим коэффициентом преломления). Толщина каждого слоя примерно равна четверти длины волны света. Из-за такой толщины каждого слоя и чередования коэффициентов преломления в слоях отраженные световые волны интерferируют, в результате изображение, образованное этой многослойной структурой, получается намного более ярким, чем при отражении от зеркала с однослойным покрытием. Однако это происходит только в узкой части спектра, а обычное зеркало отражает весь видимый спектр (инфракрасное излучение вдобавок).

## 7.18 • КАК ВИДЯТ ПОД ВОДОЙ ЛЮДИ, ПИНГВИНЫ И КРОКОДИЛЫ

Почему мы почти полностью теряем способность фокусировать свой взгляд под водой? Почему близорукие люди под водой видят лучше других? Почему, если человек наденет маску, у него восстанавливается способность фокусировать взгляд? Почему некоторые люди (например, мокены, живущие в Мьянме и на западном побережье Таиланда) видят под водой прекрасно и без маски?

Пингвины живут на суше, но охотятся они под водой. Как они умудряются видеть и в воздухе, и под водой?



**ОТВЕТ** • На воздухе световые лучи в человеческом глазу фокусируются в основном за счет роговицы, а окончательная фокусировка происходит в глазном хрусталике, кривизной которого управляют мышцы. Когда вы погружаетесь под воду, фокусирующая способность роговицы теряется, поскольку оптические свойства материала глаза почти совпадают с оптическими свойствами воды, окружающей глаз. Поэтому, когда лучи проходят границу воды с глазом, они практически не преломляются. Преломление лучей в этом случае происходит лишь в хрусталике, но большинство из нас не может настолько сильно изменить кривизну хрусталика, чтобы он один сформировал четкое изображение на сетчатке. Однако мокены, которых называют морскими цыганами, натренировали свои глаза, чтобы видеть под водой. Они сужают зрачок, чтобы обрезать пучок лучей, попадающих в глаз, и как можно больше напрягают мышцы глаза, стараясь увеличить кривизну хрусталика. Оба эти действия позволяют получить достаточно четкое изображение на сетчатке. По мнению некоторых специалистов, любой человек может этому научиться.

У близоруких людей роговица и хрусталик слишком сильно преломляют световые лучи. В результате изображение формируется перед сетчаткой, и когда световые лучи от удаленного объекта добираются до сетчатки, они уже опять расходятся, и изображение становится размытым. Когда близорукий человек оказывается под водой, его роговица перестает преломлять свет и сфокусированное изображение приближается к сетчатке и, возможно, даже попадает на нее. Поэтому близорукий человек под водой может видеть лучше, чем человек с нормальным зрением.

Если дайвер наденет маску, перед глазами уже будет не вода, а воздух, поэтому преломление световых лучей на поверхности роговицы станет нормальным.

Роговица пингвина почти плоская. Поэтому, когда пингвин попадает из воздушной среды в водную, преломляющие свойства роговицы практически не изменяются. Зрение пингвина адаптировано к воде, поскольку там находится его пища: соответственно, его хрусталики имеют большую кривизну, благодаря чему световые лучи фокусируются на сетчатке. Находясь на суше, он может ослабить напряжение мышц, чтобы кривизна хрусталиков уменьшилась. Но они, вероятно, все еще слишком сильно преломляют лучи, и изображение на сетчатке остается размытым. Поэтому пингвин на суше, скорее всего, очень близорук. Однако он может уменьшить размытость изображения

на сетчатке, сузив зрачок, который превращается в маленькое отверстие. Маленькая апертура ограничивает расходимость лучей, идущих от освещенного объекта, и изображение объекта делается более четким.

Крокодилы хорошо видят на воздухе и плохо под водой. Как и люди, они не могут изменить кривизну хрусталика настолько, чтобы компенсировать уменьшение преломления роговицей. Но тем не менее крокодилы — искусные подводные охотники: кроме зрения, у них есть другие способы отслеживания добычи.

### 7.19 • ПОДВОДНОЕ ЗРЕНИЕ «ЧЕТЫРЕХГЛАЗЫХ» РЫБ

Странная рыба четырехглазка (*Anableps anableps*) плавает у самой поверхности воды, и ее глаза наполовину находятся под водой, а наполовину — над ней, так что она видит и под водой, и в воздухе. Как ее глаза могут фокусироваться одновременно и в воздушной, и в водной среде?

**ОТВЕТ** • Хрусталик этой рыбы имеет форму яйца, чтобы компенсировать маленький коэффициент преломления лучей, попадающих в глаз от подводных объектов. Свет, приходящий от надводных объектов, при попадании в глаз сильно преломляется роговицей, а потом еще немного преломляется выпуклой частью хрусталика, так что изображение надводных объектов оказывается в фокусе, когда оно попадает на нижнюю часть сетчатки глаза.

Свет, который приходит от подводных объектов, при попадании в глаз слабо преломляется на роговице, но очень большая кривизна этой части яйцевидного хрусталика приводит к тому, что лучи, идущие от подводных объектов, сильно преломляются и фокусируются на сетчатке в верхней части глаза. Фокусироваться им помогает и сравнительно большое расстояние между хрусталиком и верхней частью сетчатки.

### 7.20 • УЛЫБКА ЧЕШИРСКОГО КОТА

Установите зеркало так, чтобы одним глазом вы видели картину, которая у вас перед глазами, отраженной в зеркале, а другим глазом вы бы видели ее напрямую. Вы можете воспринять обе картины как единую, можете видеть либо одну, либо другую (то, что называется бинокулярным соперничеством) или большую часть времени видеть только какую-то одну из них. У некоторых людей получается такой эксперимент: если вы проведете рукой перед одним глазом (любым), перекрывая картину, и при этом не будете следить глазами

за рукой, вторая картина (не та, которую перекрывает рука) исчезнет полностью или частично, причем «стертая» часть второй картины относится к той области, которую перекрывала при своем движении рука. Если эта картина — лицо человека, вы можете таким образом стереть часть лица, например оставить только свободно парящий в пространстве рот. Это похоже на улыбку Чеширского Кота в книге Льюиса Кэрролла «Алиса в Стране чудес».

Почему возникает «стирание»?

**ОТВЕТ •** По-видимому, инстинкт выживания заставил организм выработать реакцию зрительной системы на каждое движение, которое замечает любой глаз, и сигнал об этом движении передается в мозг. Обычно движение фиксируется обоими глазами, и изображения в нормальном состоянии совмещаются. Но если с помощью зеркала один глаз видит сильно отличающуюся картину (ненормальное состояние), концентрация на картине, в которой происходит движение, мешает тому, чтобы вся вторая картина или ее часть достигли сознания. Если бы ваши глаза располагались по разные стороны головы (как у некоторых рыб) и поля зрения не перекрывались бы, эта иллюзия была бы более обычным делом.

#### 7.21 • РИНО-ОПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Закройте левый глаз, смотрите правым глазом прямо перед собой, отведите вытянутую левую руку с поднятым вверх большим пальцем влево. Теперь ведите эту руку назад вправо до тех пор, пока палец не окажется в поле зрения, после чего скосите правый глаз в сторону этого пальца. Палец, скорее всего, исчезнет. Он виден, когда вы смотрите прямо перед собой, но не виден, когда пытаетесь посмотреть прямо на него. Почему палец «исчезает»?

**ОТВЕТ •** Чтобы увидеть какой-то объект, хоть какая-то часть света от этого объекта должна пройти через зрачок. Если вы будете смотреть прямо перед собой и, как это описывалось выше, повернете руку так, что палец покажется в поле зрения, свет от него на пути к открытому правому глазу частично попадет в зрачок. Но когда вы скосите глаз в направлении пальца, открытая часть глаза попадет в тень от носа и свет от пальца не сможет попасть в глазное отверстие, поскольку на его пути возникнет препятствие в виде носа. Этот эффект прозвали *рино-оптическим*, поскольку греческое слово

«рино» в переводе означает нос. Этот эффект не смогут наблюдать обладатели маленького носа.

Нос, лоб и щеки всегда заслоняют глазу часть вида. Однако мозг собирает всю доступную информацию вокруг линии вашего прямого взгляда и подавляет отсутствующие части общей картины, находящиеся вне прямой видимости.

#### 7.22 • БЕГУЩИЕ ОБЛАКА И СИНИЕ ВРЕДНЮЧКИ

Торн Шипли из Медицинской школы Университета Майами описал новую оптическую иллюзию. Во время полета в самолете на большой высоте он заметил два слоя облаков. Один слой, казавшийся ему более удаленным, быстро двигался назад. Другой был как будто привязан к самолету и следовал точно за ним. Спустя некоторое время Шипли увидел далеко внизу океан, и сразу облачные слои поменялись местами и удаленный слой стал казаться ему неподвижным. Какое восприятие расстояния и движения относительно самолета было правильным?

В фильме «Желтая подводная лодка» (в основу которого положена одноименная песня группы «Битлз») персонаж фильма Синяя Вреднучка претерпевает значительные трансформации. Будучи далеко, она большая и свирепая, а по мере приближения — уменьшается и становится менее устрашающей. Что странного в этом преображении?

**ОТВЕТ •** Один слой облаков находился дальше и поэтому казался Шипли неподвижным, а тот, что был ближе, казался движущимся в его поле зрения из-за движения самолета относительно этого слоя. Поскольку сначала в поле зрения Шипли не было других подсказок относительно расстояния до облаков и характера их движения, неподвижность первого слоя была истолкована как свидетельство того, что он привязан к самолету и, следовательно, находится рядом. (Такое ощущение называется *визуальным захватом*, и его можно наблюдать из окна поезда, идущего мимо леса.) Другой слой казался совершенно независимым от самолета и поэтому удаленным. И только когда Шипли увидел поверхность океана, появилось достаточно указаний на реальные расстояния до облаков и их движение, и иллюзия исчезла. Аналогичный эффект может возникнуть, когда вы из окна поезда наблюдаете деревья на разных расстояниях.

Персонаж Синяя Вреднучка кажется странным, поскольку, когда она далеко, то в поле зрения она должна

иметь маленький угловой размер, а когда приближается — большой. Кроме того, по психологическим соображениям, более близкие объекты должны казаться более страшными, чем более далекие. А с нарисованной Синей Вреднучкой в фильме все происходит как раз наоборот.

### 7.23 • ЭФФЕКТ ПАЛФРИЧА

Установите маятник так, чтобы он качался поперек поля зрения, и закройте один глаз каким-нибудь темным фильтром (но не полностью непрозрачным, стекло от темных очков подойдет). Хотя маятник качается в вертикальной плоскости, вам покажется, что его конец движется по эллипсу. Кажущаяся глубина траектории движения еще возрастет, если в поле вашего зрения появится какой-либо подвешенный вертикально предмет (например, стержень или веревка) или если вы замените фильтр на более темный. Если фильтром закрыть левый глаз, кажется, что маятник вращается по часовой стрелке (при виде сверху), но направление вращения меняется, если фильтр переместить на правый глаз.

Если же вы подвешиваете два маятника рядом, их движение становится немного более запутанным. Кажется, что один из них вращается вокруг другого, так что веревки, на которых они висят, должны бы переплестись, но они, конечно, этого не делают.

Если вы закроете один глаз темным фильтром и поедете так в автомобиле, скорость, с которой окружающие предметы мелькают за окнами, будет казаться разной: объекты с одной стороны будут двигаться мимо вас слишком медленно, а с другой — слишком быстро. И расстояния до объектов окажутся измененными.

Почему с темным фильтром на одном глазу вы неправильно оцениваете реальную скорость и расстояние до объекта?

**ОТВЕТ •** Уменьшение светового потока в глазу, закрытом темным фильтром, замедляет прохождение сигнала, поступающего из глаза в мозг (эта задержка называется *визуальной латентностью*, или *торможением*). Таким образом, невооруженный глаз видит маятник в настоящем его положении, а глаз, прикрытый фильтром, видит маятник в его предыдущем положении. Ваш мозг объединяет два этих изображения, и вы видите маятник либо ближе, либо дальше, чем он есть на самом деле. Хотя в действительности конец маятника рисует прямую линию, ваш мозг делает это движение объемным, и вам кажется, что он очерчивает эллипс.

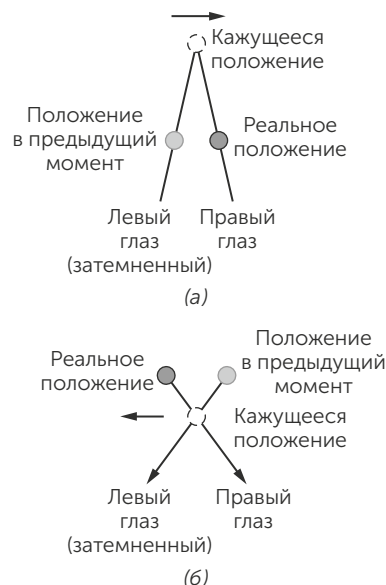


Рис. 7.4 / Задачи 7.23 и 7.30. Иллюзия Палфрича с маятником, качнувшимся вправо (а) и влево (б).

Например, представьте себе, что левый глаз прикрыт фильтром, а маятник движется вправо (рис. 7.4а). Тогда положение маятника, изображение которого получено с задержкой, будет лежать слева от реального положения маятника. А когда мозг совместит изображения от двух глаз, вам будет казаться, что маятник от вас дальше, чем на самом деле. Потом маятник движется влево, и положение маятника, полученное с задержкой, будет справа по отношению к реальному положению (рис. 7.4б). В этом случае будет казаться, что маятник ближе к вам, чем на самом деле.

Вид из движущейся машины тоже будет искаженным из-за визуальной латентности. Допустим, темный фильтр закрывает ваш левый глаз, а смотрите вы на объекты, расположенные по правому боку машины. Разница между истинным положением объекта, которое фиксирует правый глаз, и положением, которое он занимал чуть ранее (которое видит левый глаз), приводит к тому, что вам кажется, что объект дальше от машины, чем на самом деле. Поскольку время, за которое этот объект проносится у вас перед глазами, не меняется, вы заключаете, что кажущиеся более удаленными объекты движутся быстрее. С другой стороны машины из-за визуальной латентности предметы кажутся расположенными ближе, чем на самом деле, и, соответственно, кажутся движущимися медленнее.

Джерри Лернер рассказал мне о новом варианте наблюдения иллюзии Палфрича. Замените маятник

предметом, вращающимся в горизонтальной плоскости. Прикройте глаз фильтром и настройте степень его пропускания и скорость вращения так, чтобы кажущееся вращение происходило в обратную сторону и с удвоенной скоростью по сравнению с истинным вращением. И увидите, что волшебным образом предмет то расширяется, то сжимается.

Имейте в виду, что задержка в получении визуального изображения, которая возникает, когда вы надеваете темные солнцезащитные очки (или опускаете щиток от ветра), может увеличить расстояние, требуемое для остановки машины. Допустим, солнечные очки достаточно темные, так что задержка визуального изображения составляет 0,1 секунды (самая плохая ситуация). При скорости примерно 90 км/ч задержка добавляет к расстоянию, требуемому для остановки, примерно 2,5 м.

## 7.24 • ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ЗАЖИГАНИЕ УЛИЧНЫХ ФОНАРЕЙ

Когда в сумерках вдоль улицы включаются одновременно уличные фонари, может показаться, что те фонари, что стоят ближе, включаются раньше. Создается иллюзия того, что уличные фонари, установленные вдоль улицы, включаются поочередно, начиная от вас и дальше по цепочке. Кроме того, может показаться, что уличные фонари на перекрестках включаются немного раньше, чем фонари на широких улицах. Почему возникают такие иллюзии? Задержка не может объясняться тем, что току требуется некоторое время, чтобы добраться от одного уличного фонаря к другому, поскольку эта скорость слишком велика. Кроме того, вам кажется, что волна включения фонарей всегда начинается от вас, а в реальности так быть не может.

**ОТВЕТ •** На самом деле фонари включаются одновременно, а кажущееся их последовательное включение вызвано визуальной латентностью, описанной в предыдущей задаче. Ближайшие огни ярче, чем удаленные, поэтому зрительная система быстрее на них реагирует. Постепенно увеличивающаяся задержка в получении изображения от более удаленных фонарей в сумерках вызывает иллюзию поочередного их включения. Это объяснение может быть неполным. Время получения визуального сигнала может зависеть еще и от того, в какое место сетчатки попадает свет от уличных фонарей.

## 7.25 • ПОЛОСЫ МАХА

Предположим, объект освещается только одним ярким источником света (например, солнцем) и отбрасывает тень. Казалось бы, край тени должен быть размыт: темная область тени должна постепенно сменяться светлой. Однако во многих случаях я замечал две загадочные полосы, идущие параллельно краю. Темная полоса лежит внутри тени у ее границы, а яркая полоса лежит за пределами тени близко к ее границе (рис. 7.5). Если я фотографирую тень и буду рассматривать ее край на фотографии, там я тоже увижу эти полосы. Их называют *полосами Маха* в честь Эрнеста Маха — австрийского физика и философа, первым исследовавшего это явление.

Полосы Маха почти всегда возникают вдоль краев тени, но обычно на них не обращают внимания. Однако художник-неоимпрессионист Поль Синьяк отчетливо изобразил эти полосы, окаймляющие тени, на своей картине «Завтрак», написанной в 1887 году. Вы можете наблюдать их на своей собственной тени в лучах солнца. Если тень близко, например на стене, она будет слишком резко очерченной, и полосы Маха не сформируются. Полосы более ярко выражены, когда ваша тень падает на тротуар, особенно если вы движетесь.

Откуда берутся полосы? Они вызываются оптическими эффектами, возникающими на краях предмета, отбрасывающего тень, или же создаются зрительной системой наблюдателя?

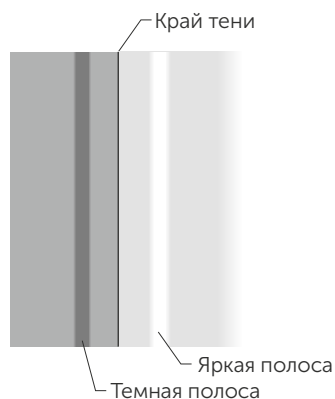
**ОТВЕТ •** Полосы Маха создаются зрительной системой, поэтому приборы для измерения интенсивности света их не выявляют. Причем визуальная система создает эти полосы как при рассмотрении реальной тени, так и ее фотографии. Никто в настоящее время не может дать полное объяснение, почему возникает этот эффект. Я тоже объясню это лишь частично.

Полосы обусловлены взаимодействием (так называемым *краевым контрастом*) между группами фоторецепторов в глазу, нервными волокнами, передающими сигналы от фоторецепторов в мозг, и отделами головного мозга. Группа рецепторов, которая активируется светом, уменьшает интенсивность сигналов, посылаемых в мозг соседними группами.

Рассмотрим группы фоторецепторов, расположенных близко к краю участка сетчатки, на который проецируется тень. Группы рецепторов, далекие от тени, сильно активированы, они подавляют друг друга и поэтому посылают сигнал умеренной интенсивности, который



ассоциируется сознанием с освещенной областью. Группы, находящиеся в тени, слабо активированы, поэтому слабо гасят друг друга и посылают в мозг слабый сигнал, который ассоциируется сознанием с темной областью.



**Рис. 7.5 / Задача 7.25.** Полосы Маха, расположенные вдоль края тени.

Интересующие нас полосы образуются промежуточными группами, которые расположены между двумя этими группами вдоль границы тени. Рассмотрим группу, у которой в качестве соседей с одной стороны находятся сильно освещенные, а с другой стороны — слабо освещенные рецепторы. Первый набор соседей блокирует нашу группу, но второй набор почти не делает этого. Поскольку рецепторы этой группы подвергаются умеренному блокированию, они посылают более сильный сигнал в мозг, чем рецепторы, удаленные от тени. Такие группы вблизи края тени образуют яркую полосу Маха.

Рассмотрим другую промежуточную группу, у которой с одной стороны соседями являются рецепторы, на которые проецируется тень, а с другой — слабо освещенные рецепторы на границе тени. Группа образует темную полосу Маха, потому что она больше подавляется (с одной стороны находятся освещенные, хотя и слабо, фоторецепторы).

Полосы Маха заметны, когда край тени (переходный участок между хорошо освещенными и плохо освещенными областями) занимает примерно  $0,2^\circ$  в вашем поле зрения. Они не появляются, если край тени более резкий.

### 7.26 • ПЕРЕВЕРНУТЫЙ МИР

Поскольку глаз работает как выпуклая линза, на сетчатке образуется действительное перевернутое изображение окружающей картины. (Например, земля оказывается вверх сетчатки, а небо внизу.) Почему же

мы воспринимаем мир в его нормальном виде? Если надеть специальные очки (в виде призм), которые переворачивают изображение, увидим ли мы мир перевернутым вверх тормашками?

**ОТВЕТ •** Когда мы смотрим вокруг, мозг правильно воспринимает перевернутое изображение мира исключительно исходя из опыта. Например, если мы поднимаем перед собой руку вверх, образ руки на сетчатке в действительности опускается вниз. Тем не менее мозг обрабатывает это изображение и интерпретирует его как движение руки вверх. Если с помощью специальных очков изображение будет перевернуто еще раз, мозгу потребуется несколько часов, а может быть и дней, чтобы интерпретация поменялась. До тех пор мир через очки будет выглядеть перевернутым, однако после адаптации мозг опять будет воспринимать мир в обычном виде. Если очки снять, мозгу опять понадобится время для адаптации, чтобы мир стал восприниматься в правильной ориентации. Такие эксперименты проделывались неоднократно, а также эксперименты, при которых менялось «левое» на «правое», — мозг через некоторое время приспособлялся и к этому.

### 7.27 • ПЕРЕВЕРНУТЫЕ ТЕНИ И БУГОР НА РОВНОМ МЕСТЕ

Проделайте маленькое отверстие в непрозрачном листке бумаги, поместите его в нескольких сантиметрах перед одним глазом, закройте другой глаз, а затем аккуратно поднесите к лицу любой тонкий стержень (например, пустой стержень от шариковой ручки), держа его параллельно поверхности лица так, чтобы он оказался между отверстием и открытым глазом. Вы увидите в круге света, выходящего из отверстия, тень этого стержня, но — перевернутую. Почему кажется, что тень находится за листом бумаги?

Посмотрите одним глазом на далекий источник света через щель, образованную большим и указательным пальцами, причем пусть указательный палец будет чуть дальше от вас, чем большой палец. Кажется, что внутри щели на указательном пальце образуется бугорок. Чем уже щель, тем более выраженным становится бугорок, и в конце концов он заполнит всю щель.

Этот эффект наблюдал капитан Джеймс Кук в 1769 году во время прохождения Венеры через солнечный диск. Когда Венера стала пересекать Солнце, на которое смотрел Кук, он увидел черное пятно, а когда она приблизилась к краю солнечного диска, между



черным пятном и краем диска появилась черная перемычка, как будто на пятне вырос горбик.

**ОТВЕТ •** Глаз работает как выпуклая линза, создавая перевернутое изображение на сетчатке. Предположим, что конец стержня расположен напротив значка, а сам стержень направлен вниз. Изображение стержня оказывается перевернутым и расположенным в верхней половине сетчатки. Ваш многоопытный мозг переворачивает изображение так, что вы воспринимаете стержень в его правильной ориентации.

Но стержень отбрасывает тень на сетчатку, поскольку перекрывает часть света, проходящего через маленькое отверстие. Так как он располагается в нижней части поля зрения, тень расположится на нижней части сетчатки. Но поскольку мозг переворачивает все, что отпечатывается на сетчатке, вы увидите тень в верхней части поля зрения. Поэтому вы увидите стержень в правильной ориентации, а тень — перевернутой.

Когда вы уменьшаете ширину щели между большим и указательным пальцами, большой палец начинает загораживать свет, проходящий под указательным пальцем. Это уменьшение освещенности приводит к появлению темной области на сетчатке непосредственно рядом с изображением указательного пальца, и кажется, что она разрастается в щели так, как будто на пальце образовался бугорок. Чем уже щель, тем больше света блокируется и тем большим кажется бугорок.

## 7.28 • СТРАННОЕ ОТРАЖЕНИЕ В ЕЛОЧНОМ ШАРИКЕ

На стенках блестящего елочного шара можно увидеть отражение почти всей комнаты. Предположим, вы помещаете небольшой источник света (например, освещенное маленькое отверстие) перед шариком, а затем рассматриваете отражение в нем с расстояния около 10 см. Если в комнате горит общий свет, источник (освещенное отверстие) будет отображаться в виде яркой точки. Если свет в комнате выключить, в некоторых случаях отраженное изображение постепенно вытянется и превратится в линию. Если освещение в комнате включить опять, изображение быстро свернется в точку. Почему в темной комнате мы видим искаженное отражение?

**ОТВЕТ •** Лучи света от точечного источника света отражаются от сферической поверхности шарика во многих направлениях. Если наш глаз находится достаточно

близко, в него попадут многие из этих расходящихся лучей, и они сфокусируются на сетчатке. То, что вы видите, есть изображение источника, который, как нам кажется, лежит за ближайшей к глазу поверхностью шара, — это так называемое мнимое изображение. Когда комната хорошо освещена, глазной зрачок сужен, и в него входит лишь небольшой пучок отраженных лучей. Тогда изображение источника — это небольшая точка. Когда комната темная, зрачок расширяется, позволяя более широкому пучку отраженных лучей попасть в глаз, и мы видим более вытянутое изображение источника, которое может образоваться за счет астигматизма (дефекта зрения) или незначительного отклонения формы шара от идеальной сферы.

## 7.29 • ВРАЩЕНИЕ УЗОРОВ ИЗ СЛУЧАЙНО НАНЕСЕННЫХ ТОЧЕК

Набрызгайте чернила или краску на лист бумаги, а затем сделайте фотокопию этой картины на прозрачной пленке. Поместите пленку поверх оригинала, чтобы соответствующие точки совпали. Прижмите пальцем пленку в одной точке и поворачивайте ее вокруг этой точки. При больших поворотах точки остаются расположенными случайным образом, но для небольших поворотов многие точки кажутся расположенными на невидимых окружностях.

При увеличении угла поворота эти окружности, на которых лежат упорядоченные точки, смещаются внутрь, к пальцу, до тех пор, пока не исчезнут. Можно получить и другие узоры, если изгибать пленку или как-то иначе ее перемещать. Если на ксероксе сделать слегка уменьшенную фотокопию и положить ее поверх оригинала, появляются спирали и другие узоры. Почему мы видим упорядоченные структуры при различных совмещениях рисунков со случайно разбросанными точками, которые названы общим термином *узоры Гласса* в честь Леона Гласса из Университета Макгилла, открывшего их в 1969 году? Упорядоченность исчезает, если копия делается в виде негатива оригинала на сером растровом фоне. Означает ли этот результат, что ощущение вращения в узоре зависит от контраста между точками и фоном в каждом из узоров?

**ОТВЕТ •** Почему возникает ощущение вращения при наложении картинок со случайно разбросанными точками, не совсем понятно. Каким-то образом зрительная система сканирует всю картину и находит пары точек, которые ранее были совмещены. Если вы посмотрите

только на небольшой участок картины, корреляцию найти не удастся и вы не увидите никакого узора. Корреляция, которую зрительная система находит в полной картине, может быть связана с тем, что в зрительной системе имеются группы, специально предназначенные для обнаружения линий и контуров. Такие специализированные группы действительно обнаружены.

Предположим, что каждая из таких многочисленных групп возбуждается парой точек, которые ранее были совмещены. Затем мозг сравнивает эти группы, понимает, что в каждой из них имеется пара коррелированных точек, лежащих на невидимой окружности, и создает в сознании ощущение вращения. Когда копия отворачивается слишком далеко от оригинала, точки, которые были сначала совмещены, возбуждают разные группы, и у вас уже не может возникнуть ощущения вращения.

Для того чтобы увидеть узоры Гласса, нужно не только повернуть картинки друг относительно друга на небольшой угол. Мозг еще требует, чтобы точки имели один и тот же контраст по отношению к фону. Поэтому если одна из картинок является негативом другой и фон на этом негативе представляет собой серый растр, никакого узора мы не увидим, даже если повернем негатив на малый угол.

### 7.30 • СНЕЖНЫЕ УЗОРЫ НА ТЕЛЕВИЗИОННОМ ЭКРАНЕ

Настройте телевизор на канал, где нет сигнала, и экран заполнится случайным шумом, так называемым снегом. Если вы наложите на экран круг, будет казаться, что снежинки движутся по границам круга. Если вы наложите на экран шаблон, состоящий из радиальных линий, будет казаться, что снежинки перемещаются перпендикулярно линиям и образуют завитки. А шаблон, состоящий из концентрических окружностей, заставит снежинки двигаться по радиусам от центра наружу. Почему движение снежинок кажется таким?

Если вы посмотрите на экран, на котором движутся снежинки, и закроете один глаз темным фильтром (но не полностью непрозрачным, стекло от солнцезащитных очков подойдет), вам покажется, что снежинки разбиваются на две группы и занимают две плоскости: одну перед экраном, а другую за ним.

Снежинки на одной плоскости будут равномерно двигаться влево, а на другой тоже равномерно, но вправо. Почему возникает ощущение такого разделения, чем определяется направление движения снежинок и откуда появляется объемность картинки?

**ОТВЕТ •** Кажущееся направленное движение снежинок, вызванное наложением шаблона с рисунком на экран, безусловно, иллюзия, поскольку снежинки появляются и исчезают случайным образом. Однако зрительная система постоянно воспринимает последовательность точек на одном направлении как одну движущуюся в этом направлении снежинку. Никто точно не знает, почему возникает выделенное направление видимого глазом движения. Однако очевидно, что это выделенное направление движения снежинок задается ориентацией линий в наложенной на экран решетке или шаблоне.

Когда один глаз прикрыт темным (но не полностью непрозрачным) фильтром, визуальный сигнал от этого глаза поступает с задержкой. Таким образом, в то время как открытый глаз видит на экране точку в текущий момент, прикрытый глаз видит точку на экране в том месте, где она была раньше. Как и в иллюзии Палфрича (см. задачу 7.23), мозг пытается свести эти два изображения в единую точку, и поэтому нам кажется, что она находится либо перед экраном, либо за ним (см. рис. 7.4). Таким образом, иллюзия трехмерности картины возникает из-за задержки визуального сигнала от прикрытого глаза.

Предположим, что в следующий момент вы увидите еще одну пару точек, расположенных чуть правее первой пары. Снова мозг соединяет два изображения и воспринимает их как одну точку и может принять эту новую точку за смещенную вправо первую точку. Дальнейшее совмещение точек и их интерпретация приводит к иллюзии того, что точка перемещается вправо по экрану. Остальные точки кажутся перемещающимися влево.

Объяснение может быть и несколько иным. Возможно, мозг сначала обнаруживает видимое движение точек, а уже затем определяет, на какой глубине они находятся. Но конечный результат не изменится: мозг создает в сознании иллюзию движущихся в противоположных направлениях точек на плоскостях, расположенных на разной глубине.

### 7.31 • УЛЫБКА МОНЫ ЛИЗЫ

Одна из самых завораживающих улыбок в мире — улыбка Моны Лизы на портрете кисти Леонардо да Винчи. Что делает эту улыбку такой пленительной?

**ОТВЕТ •** У искусствоведов по этому поводу свое мнение, а в качестве физической модели можно предложить такое рассуждение. Картина, которую вы видите перед собой, кажется совершенно стабильной, но на самом деле она постоянно меняется из-за небольшого

случайного шума, то есть флуктуаций, возникающих как в уровне сигнала, так и в процессе передачи и обработки этого сигнала на всем пути от сетчатки до мозговых центров. При возбуждении фоторецепторы и нейроны могут спонтанно срабатывать или не срабатывать, поглощение света в фоторецепторах тоже флуктуирует, следовательно, линии и формы не совсем точно воспроизводятся в сознании, вызывая альтернативные восприятия. Из-за этих и других небольших изменений светового сигнала, воспринимаемого нашим сознанием, углы губ Моны Лизы чуть-чуть опускаются и поднимаются случайным образом, и кажется, что настроение Моны Лизы все время меняется. Вы не подозреваете об этих флуктуациях, но попадаете в плен этой загадочной улыбки.

### 7.32 • ПРИЗРАКИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ЭКРАНА, ПЛАВАЮЩИЕ В ВОЗДУХЕ

Когда в темной комнате вы смотрите телевизор с кинескопом (электронно-лучевой трубкой) и там нет другого источника света, быстро переведите взгляд сначала к точке, находящейся примерно на метр слева от экрана, а затем к точке, находящейся примерно на метр справа от него. Когда вы будете переводить взгляд вправо от экрана, вы увидите одно или несколько ярких подробных призрачных изображений текущего телевизионного кадра, висящих в воздухе, причем каждое такое изображение перекошено вправо.

Как образуются эти изображения? Куда они перекосятся, если вы переведете ваш взгляд в противоположном направлении? Почему, если вы отодвинетесь от экрана подальше, изображения сильнее перекосятся, а расстояние между ними увеличится? Появятся ли подобные призрачные изображения, если вы будете переводить взгляд в вертикальном направлении? Могут ли образоваться похожие изображения, если в этот момент на экране будут мелькать кадры кинофильма?

**ОТВЕТ •** Изображение на экране телевизора создается лучом, быстро бегущим по экрану в горизонтальном направлении строка за строкой сверху вниз. Предположим, что ваш взгляд перемещается вправо по экрану, в то время как луч создает верхнюю линию. Линия остается видимой в течение короткого времени из-за инерции зрения. Поскольку ваш взгляд сдвигается вправо, сохранившееся изображение верхней строки оказывается смещенным вправо, в то время как луч на экране уже пробегает вторую строку. Фактически,

когда луч на экране пробегает следующую строку, предыдущие строки все еще можно видеть, но смещенными вправо из-за перемещения вашего взгляда. Сдвиг будет наибольшим для верхней строки и наименьшим для нижней строки. В совокупности эти линии дадут перекошенное изображение того, что видно на экране.

Если вы будете быстро переводить взгляд от экрана вниз, вы увидите приплюснутое изображение экрана, а если вверх — вытянутое изображение. Поскольку кинофильм проецируется на экран в виде последовательности целых кадров, призрачных изображений не получится.

### 7.33 • ЧТЕНИЕ ЧЕРЕЗ МАЛЕНЬКИЕ ОТВЕРСТИЯ (ПИНХОЛЫ)

Если читать через маленькие отверстия, расположенные перед глазами, будут ли глаза меньше утомляться? Сейчас часто можно встретить рекламу очков для чтения, в которые вместо стекол вставлены пластинки со множеством маленьких отверстий. Производители обещают уменьшение напряжения мышц глаз, облегчение чтения и даже лечебный эффект. Впрочем, на некоторых сайтах пишут, что, наоборот, увеличивая напряжение мышц, такие очки тренируют глаза. И даже что они отсекают ультрафиолетовое облучение! Справедливы ли эти утверждения?

Живущие в пустыне гекконы не читают сквозь дырочки, но пользуются ими, чтобы не ослепнуть от яркого света. Ночью две мембраны над зрачком глаза открываются, образуя вертикальную щель, через которую ящерица видит. Днем же эти мембраны смыкаются, оставляя четыре небольших отверстия за счет выемок в краях мембран. Как геккон использует эти четыре отверстия, чтобы видеть добычу? Не лучше ли было бы ему иметь одно отверстие?

**ОТВЕТ •** Утверждение о том, что читать легче через отверстие, сомнительное. Аккомодация связана с конвергенцией глаз, то есть небольшими их поворотами, с тем чтобы линии зрения двух глаз пересеклись на объекте. Когда вы читаете эту страницу на расстоянии около 25 см, ваши глаза должны повернуться на определенный угол, чтобы в вашем сознании изображения от двух глаз могли восприниматься как единое целое. Конвергенция автоматически заставляет каждый глаз аккомодироваться, даже если они смотрят через маленькие отверстия, следовательно, отверстия не помогают глазным мышцам расслабляться.

Правда, при рассматривании объекта через маленькое отверстие уменьшается «кружок рассеивания», который из-за погрешностей оптической системы создает любой точечный источник, и резкость изображения может возрасти, правда, ценой уменьшения его яркости. Однако какой-либо лечебный эффект от таких очков достоверно не обнаружен и ультрафиолет они, конечно, не подавляют.

Несколько отверстий в закрытом глазу геккона уменьшают глубину фокуса. Затем геккон может отрегулировать глаз так, что четыре отверстия создают единое четкое изображение добычи, в то время как любой другой объект геккон видит в виде четырех перекрывающихся изображений. Внимание геккона приковывается к резкому изображению, а не к другим, размытым изображениям.

### 7.34 • ЦВЕТНОЙ ОРЕОЛ ВОКРУГ ПАЛЬЦА

В затемненной комнате встаньте напротив светлого окна, закройте один глаз, вытяните руку и поднимите один палец вертикально. Сфокусируйте открытый глаз на окне (или даже чем-то более удаленном), а не на пальце. Вы увидите, что края пальца слегка окрашены в разные цвета: красный с одной стороны, синий с другой. Что вызывает окрашивание?

**ОТВЕТ** • Сначала рассмотрим один луч белого света, проходящий рядом с пальцем слева от него. Говорят, что свет белый, потому что он состоит из примерно равного количества цветов видимого спектра, и в данном случае это действительно так. Как только свет попадает в глаз, а затем проходит через него, в конечном итоге на небольшой части сетчатки происходит разделение цветов: с одной стороны собирается свет с синей длиной волны, с другой стороны — с красной, а промежуточные цвета распределяются между красным и синим цветами (хроматическая аберрация). Как правило, вы не можете видеть эти цвета из-за перекрытия лучей с разными длинами волн на сетчатке. А вот когда вы помещаете палец напротив ярко освещенного окна, он отбрасывает темную тень на сетчатку, которая закрывает перекрытые лучи разных цветов рядом с тенью. Поэтому вдоль этой тени вы сможете увидеть цветной ореол. В зависимости от угла, при котором свет падает на глаз, красная окраска появляется либо на одной стороне тени, либо на другой, а синяя, соответственно, появляется на противоположной.

### 7.35 • НАБЛЮДЕНИЕ ЗВЕЗД ДНЕМ ЧЕРЕЗ ТРУБУ

Со времен Аристотеля, выдвинувшего эту идею, люди верили, что звезды можно увидеть днем, если смотреть на них через длинную трубу, например высокий дымоход. Труба закрывает большую часть светящегося неба, в отверстии трубы остается лишь небольшой его кусочек. Меньшая освещенность к тому же помогает наблюдателю частично адаптировать глаза к темноте. Достаточно ли этого, чтобы можно было рассмотреть звезду на этом кусочке неба?

**ОТВЕТ** • Через длинную трубу звезду нельзя увидеть, потому что окружающий звезду кусочек неба, видимый в отверстии трубы, остается таким же ярким, как если бы вы смотрели на него без трубы. Если смотреть через трубу, общая засветка глаза уменьшается, но это не меняет контраста между звездой и фоном: он остается нулевым. Труба может даже ухудшить видимость звезды. Действительно, чтобы быть заметным, светлое пятно, окруженное темным пространством, должно быть ярче определенного (порогового) значения. Пороговое значение уменьшается, если окружающее пространство становится светлее.

### 7.36 • КАК ЗВЕЗДОЧЕТЫ СМОТРЯТ НА ЗВЕЗДЫ

Почему больше шансов увидеть тусклую звезду рядом с яркой, если посмотреть на звезды краем глаза? Почему в полутьме вы лучше видите источник слабого света, если не смотрите на него прямо? Аристотель использовал этот прием и обнаружил, что кометы — это не планеты с большими периодами обращения, поскольку, если скосить глаза к одной стороне кометы, можно различить ее хвост.

**ОТВЕТ** • При низкой освещенности, например когда вы смотрите на звезду в темную ночь, колбочки фоторецепторов не активируются, и только палочки могут обнаружить свет. Если вы смотрите прямо на звезду, ее изображение проецируется на центральную ямку сетчатки, которая содержит только колбочки, и поэтому звезду вы увидеть не можете. Если вы отведете взгляд от звезды в сторону, изображение будет проецироваться на другие части сетчатки, где есть палочки. Тогда вы сможете звезду увидеть.

Боковое зрение эффективнее и в некоторых других ситуациях. Например, боковым зрением можно иногда заметить мерцание люминесцентных ламп, когда «общим» зрением оно не замечается.



### 7.37 • ЗЕМНЫЕ ОБЪЕКТЫ, РАЗЛИЧИМЫЕ С ОРБИТЫ

Каковы наименьшие размеры объектов на поверхности Земли, которые могут различить с околоземной орбиты космонавты, не прибегая к приборам? Могут ли они увидеть крупные города или большие конструкции, например пирамиды? Первые полеты к Марсу принесли некоторое разочарование, потому что на фотографиях не оказалось никаких признаков разумной жизни. Какие признаки разумной жизни были бы видны на подобных фотографиях Земли, если бы пространственное разрешение фотоаппаратов позволяло снимать структуры размером около километра?

**ОТВЕТ** • Космонавт, вращающийся по орбите вокруг Земли, не увидит почти никаких признаков разумной жизни на ее поверхности, если будет смотреть на нее невооруженным глазом и в дневное время. Предел разрешения человеческого глаза ограничивается дифракцией света при прохождении через зрачок, он составляет 1–2 угловых минуты, то есть 0,02–0,03°.

Если смотреть с орбиты (скажем, с высоты 800 км от поверхности), дифракция размывает детали почти всего, что создано руками человека, поскольку структуры шириной около километра находятся недалеко от порога разрешения. Однако, когда космонавт смотрит на Землю ночью, несомненные доказательства разумной жизни появляются в изобилии, поскольку с орбиты хорошо видны освещенные большие города.

### 7.38 • МЕДОНОСНЫЕ ПЧЕЛЫ, ПУСТЫННЫЕ МУРАВЬИ И ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ

Луч света, пришедший к нам непосредственно от Солнца, *не поляризован*, потому что электрические поля отдельных квантов колеблются во всех возможных направлениях, перпендикулярных направлению луча. Однако если световой луч рассеивается на какой-либо молекуле воздуха, он окажется *поляризованным*, поскольку электрические поля колеблются вдоль одной оси, перпендикулярной лучу. Вы можете не заметить разницы, но некоторые животные, такие как медоносные пчелы и пустынные муравьи, ориентируются на местности, отслеживая распределение поляризованного света по небу. Например, когда пустынный муравей отправляется на поиски пищи, он отмечает углы между направлением своего тела и направлением поляризации солнечного света. Затем, когда он хочет вернуться к себе в муравейник, он вычисляет

направление на дом, сопоставляя информацию обо всех углах. Вычислительные способности у него выдающиеся, поскольку иногда его траектория настолько замысловатая, что ему приходится запоминать не сколько сот углов.

Как эти насекомые определяют направление поляризации света?

**ОТВЕТ** • Медоносная пчела и пустынный муравей имеют сложные глаза, состоящие из тысячи или более светочувствительных рецепторов, называемых *омматидиями*. В каждом рецепторе свет проходит через переднюю линзу, затем через конус, состоящий из прозрачного кристаллического материала, и наконец поступает в удлинённую структуру, называемую *рабдомом* (*зрительной палочкой*). Эта структура состоит из девяти секций, расположенных вокруг центральной оси, направленной по ее длине. Секции соединяются за счет перекрытия областей, в которых находится светочувствительный пигмент (родопсин). Омматидий работает следующим образом: он посылает свет вдоль центральной линии так, чтобы пигмент мог поглотить его и послать сигнал в мозг насекомого.

Одна из секций омматидия может определить поляризацию света. В некоторых омматидиях эта секция закручивается по часовой стрелке вокруг центральной оси, а в других — против часовой стрелки. Насекомое обнаруживает ориентацию и степень поляризации света, используя три сигнала. Два из них исходят из чувствительных к поляризации секций, по одному от двух направлений поворота. Третий сигнал поступает от ультрафиолетовых детекторов в омматидиях, которые определяют яркость ультрафиолетового излучения. На основе этих трех сигналов от группы омматидиев насекомое может отслеживать поляризацию неба.

До сих пор непонятно, как мозг насекомого использует эту информацию. Однако мы знаем, что пчелы обмениваются информацией между собой, исполняя особый *танец* — выписывая в воздухе петли, в которых зашифрована информация.

Способность определять поляризацию света может использоваться и для других целей, помимо навигации. Например, некоторые водяные жуки обнаруживают водоемы по поляризации света, отражающегося от воды, который сильно поляризован в горизонтальной плоскости. Люди надевают специальные поляризационные солнцезащитные очки, поглощающие горизонтально поляризованный свет, чтобы убрать блики



отраженного от воды света. Автомобилисту может мешать горизонтально поляризованный свет, отраженный от асфальта; эту помеху тоже легко устранить с помощью поляризационных очков. Иногда мухи ошибочно принимают поляризованный свет, отраженный от асфальта, за признак воды, начинают роиться на асфальте и откладывать там яйца, которые, естественно, быстро гибнут.

### 7.39 • ЩЕТКА ГАЙДИНГЕРА

Большинство людей способны определить поляризацию света на глаз. Посмотрите через поляризационный фильтр на яркий фон и сделайте так, чтобы в поле зрения не было никаких посторонних предметов (используйте одно стекло из поляризационных солнцезащитных очков). В течение нескольких секунд на линии зрения вы увидите на синем фоне маленькую, едва заметную желтую фигуру в форме песочных часов (рис. 7.6). Эта фигура называется щеткой Гайдингера в честь Вильгельма Карла фон Гайдингера, который открыл ее в 1844 году.

Чтобы щетка Гайдингера стала для вас заметнее, поверните фильтр вокруг линии видимости так, чтобы изменилось направление поляризации света, падающего в ваш глаз. Фигурка песочных часов тоже повернется (короткая ось желтой фигуры останется параллельной вектору поляризации света). Эта фигура увеличится, если в подсветке синий цвет будет преобладать над другими цветами. Голубое небо для этой цели вполне подойдет.

Не все могут увидеть щетку Гайдингера, и способность ее увидеть, похоже, падает с возрастом. Когда я был моложе, я мог увидеть фигуру и без фильтра, глядя на поляризованный свет, идущий от неба. Что именно в глазу отвечает за появление этой фигуры и за чувствительность глаза к поляризации света?

**ОТВЕТ** • Традиционно считается, что ответственна за то, что мы видим щетку Гайдингера, *macula lutea*, или *желтое пятно*. Это область, в центре которой находится фовеа, центральная ямка. Раньше полагали, что чувствительность к направлению поляризации света обусловлена расположением молекул пигмента, придающих этому участку желтый цвет. Эти молекулы поглощают синий свет определенной поляризации. Считалось, что они ориентированы вдоль радиальных линий, исходящих из общего центра. Более поздняя модель предполагает, что сами молекулы не должны

быть ориентированными. Вместо этого они, возможно, собираются в группы, ориентация которых друг относительно друга обеспечивает избирательное поглощение синего света с поляризацией в определенном направлении.

Чтобы понять, как работает любая из этих моделей, я предположу, что пигменты, покрывающие желтое пятно, расположены вдоль двух пересекающихся линий, одной горизонтальной и другой вертикальной. Если вертикально поляризованный синий свет попадает в глаз, пигменты, лежащие вдоль вертикальной линии, пропускают свет к лежащим под ними колбочкам, а пигменты, лежащие вдоль горизонтальной линии, поглощают свет, не позволяя ему достичь расположенных под ними колбочек. Если, наоборот, горизонтально поляризованный свет попадает в глаз, тогда пигменты на горизонтальной линии пропускают свет, а на вертикальной линии — нет.



Рис. 7.6 / Задача 7.39. Щетка Гайдингера, видимая в поляризованном свете.

Предположим, что вертикально поляризованный свет попадает в глаз и что этот свет почти белый, но в его составе больше синего цвета, чем других цветов. Тогда колбочки, расположенные под вертикальной линией, возбуждаются, и вы видите синюю вертикальную линию. А вот пигменты, расположенные вдоль горизонтальной линии, поглощают синий цвет, и колбочки за этой линией пропускают только падающий в глаз свет оставшихся цветов. Белый или почти белый свет, из которого вычтен синий цвет, воспринимается как желтый. Таким образом, вы видите горизонтальную линию желтого цвета, которая и является фигурой песочных часов. Вертикальная линия синего цвета воспринимается в виде синих областей по сторонам песочных часов.

Если бы это объяснение было полным, вы не увидели бы синие области, если бы рассматривали фигуру на фоне неба или какого-либо другого протяженного источника преимущественно голубого света, потому

что синий ореол нельзя было бы отличить от фона. Чтобы завершить объяснение, мы, по-видимому, должны предположить, что мозг добавляет *дополнительный* синий цвет в этот ореол. Предположительно, эта *субъективная окраска* ореола спровоцирована желтой окраской соседних с ним частей песочных часов.

#### 7.40 • ЦВЕТА ТЕНЕЙ

В 1810 году Иоганн Вольфганг фон Гёте, немецкий мыслитель, великий писатель и один из первых исследователей цветного зрения, описал следующий эксперимент: «В сумерках поставим короткую горящую свечу на лист белой бумаги. Перед ней и угасающим дневным светилom поставим вертикально карандаш, так чтобы отбрасываемая им тень в свете свечи освещалась, но не исчезала в слабом дневном свете. И тогда мы увидим, что эта тень чудесного голубого цвета».

Вы можете проделать похожий эксперимент. В темной комнате осветите экран лучами двух прожекторов. На пути одного луча поместите цветной фильтр, например кусок красного целлофана. Поставьте руку перед ним так, чтобы она отбрасывала небольшую тень на экран. За пределами тени экран розовый, потому что на него падает красный свет от первого прожектора и белый свет от второго прожектора. Внутри тени экран должен быть белым, потому что красный свет от первого прожектора заблокирован вашей рукой и экран освещен только вторым прожектором. Однако внутри тени экран сине-зеленый. Почему тень окрашивается?

**ОТВЕТ •** Я объясню эксперимент с прожекторами, а эксперимент великого Гёте попробуйте объяснить сами. Изображения экрана и тень вашей руки возбуждают три типа колбочек-фоторецепторов на сетчатке. Изображение розового экрана сильно возбуждает красные колбочки и гораздо меньше — зеленые и синие колбочки.

Изображение тени должно быть белым, поскольку область тени освещена только вторым прожектором без фильтра, поэтому это изображение должно возбуждать все виды колбочек. Однако красные колбочки, возбужденные розовым экраном, гасят (ингибируют) сигнал от красных колбочек, находящихся внутри изображения тени. Этот притушенный сигнал интерпретируется зрительной системой как сигнал сине-зеленого цвета, дополнительного к красному цвету. Как происходит гашение и почему воспринимается дополнительный цвет — пока нерешенные головоломки.

#### 7.41 • БЕЗОПАСНОСТЬ СОЛНЦЕЗАЩИТНЫХ ОЧКОВ

Солнцезащитные очки уменьшают интенсивность видимого и ультрафиолетового света, проникающего в глаз, поглощая часть света. Но, с другой стороны, при затемнении расширяется зрачок. Возможно ли, что из-за расширения увеличивается количество ультрафиолетового света, попадающего в глаз, и поэтому солнцезащитные очки не следует носить?

Почему коренные жители Канады и Аляски закрывают глаза кусками кости или дерева с узкими прорезями для глаз? Почему атлеты (особенно американские футболисты) наносят на скулы черную краску, если игра происходит при ярком солнечном свете?

**ОТВЕТ •** Современные солнцезащитные очки уменьшают общий поток ультрафиолетового света, проникающего в глаз, несмотря на расширение зрачка. Однако ранее выпускались солнцезащитные очки, не обладавшие этим свойством (пластмассовые и не содержащие красителей, поглощающих ультрафиолет). Поэтому в пособиях по альпинизму имелось предупреждение об опасности применения пластмассовых солнцезащитных очков.

Коренные жители Канады и Аляски стремились уменьшить отражения от ярко освещенных снежных и ледяных поверхностей, среди которых им приходилось жить. Прорези, через которые они смотрели, значительно уменьшали не только видимый свет и ультрафиолет, попадающий в глаза, но и инфракрасное излучение, вызывающее в глазах дискомфорт.

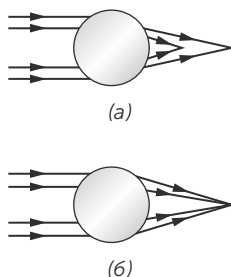
Черная краска на скулах американских футболистов уменьшает отражение света от щек в глаза, мешающее игроку видеть. Это отражение от щек особенно неприятно, если по щекам течет пот, а матч проводится либо днем под высоким солнцем, либо при ярком свете прожекторов в ночное время.

#### 7.42 • ХРУСТАЛИКИ РЫБ

Наша способность видеть связана с тем, что глаз изгибает (преломляет) световые лучи так, что они образуют четкое изображение на сетчатке. Около двух третей этого преломления происходит на изогнутой поверхности роговицы, остальное — при прохождении лучей через хрусталик, который расположен на некотором расстоянии позади роговицы. Рыба отличается тем, что ее глаз находится в воде, а вода имеет примерно те же оптические свойства, что и глаз, свет в роговице

уже не преломляется и световые лучи могут преломляться только в хрусталике. Более того, поскольку хрусталик рыбы должен сильно изгибать лучи, чтобы они сфокусировались сразу за ним, он должен быть почти сферическим. Однако сферическая линза страдает от *сферических aberrаций*, поскольку лучи, проходящие близко к ее краям, входят под таким большим углом к поверхности линзы, что преломляются сильно, а лучи, распространяющиеся вдоль центральной оси линзы, входят под меньшими углами и, следовательно, изгибаются намного меньше. В результате лучи фокусируются в широком пятне позади линзы и, таким образом, не создают четкого изображения (рис. 7.7а). Фактически сферический хрусталик рыбы должен был бы сделать рыбу почти слепой. Как же тогда рыбам удается видеть?

**ОТВЕТ** • Степень преломления лучей при вхождении их в хрусталик и на выходе из него зависит от разницы в показателях преломления материалов. Если луч попадает из водно-белковой среды, заполняющей глазное яблоко, в хрусталик с большим показателем преломления, лучи сильно изогнутся. Если у хрусталика меньший показатель преломления, лучи изогнутся меньше. Хрусталик в рыбьем глазу имеет не постоянный показатель преломления: он больше вдоль центральной оси и меньше ближе к краям. В результате лучи, идущие вдоль центральной оси, и лучи, падающие ближе к периферии, создают изображение в одной относительно небольшой области за хрусталиком (рис. 7.7б).



**Рис. 7.7 / Задача 7.42.** Фокусировка световых лучей сферической линзой с постоянным показателем преломления (а) и градиентным показателем преломления (б).

Таким образом, рыба получает возможность видеть. Изменение показателя преломления, или *градиент показателя преломления*, возникает благодаря изменению свойств водно-белковой среды в глазу. Вы можете обнаружить эти меняющиеся свойства среды,

рассмотрев глаз сырой или приготовленной рыбы: его текстура тверже вблизи центральной оси.

Хрусталик человека тоже имеет градиентный показатель преломления (его значения варьируют от больших до меньших в направлении от центра к периферии). Однако, поскольку мы живем в воздушной среде, а не в водной, человеческий глаз исправляет сферическую aberrацию главным образом на поверхности роговицы: поверхность роговицы не сферическая, а имеет специальную форму, чтобы компенсировать сферическую aberrацию.

Мечехвост *Limulus* также использует градиентный показатель преломления, но совершенно иначе. Его сложный глаз состоит из множества прозрачных фасеток, каждая из которых имеет гладкую плоскую поверхность. Свет проходит через фасетку, достигая зрительной системы в конце канала. Отсутствие кривизны должно было бы помешать формированию изображения, но, тем не менее, в каждой фасетке оно формируется. Вдоль центральной линии канала (идущего спереди назад) показатель преломления выше, чем по направлению к боковым стенкам канала. Таким образом, лучи света, проходящие вблизи центра фасетки, изгибаются больше, чем лучи, проходящие вблизи стенок. Разное искривление лучей заставляет их пересекаться друг с другом, образуя изображение после прохождения канала.

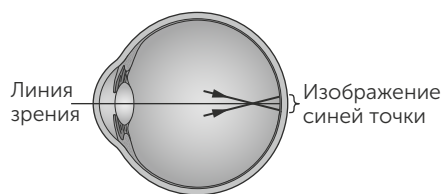
#### 7.43 • ОЩУЩЕНИЕ ОБЪЕМА НА КРАСНО-СИНИХ ПЛАКАТАХ

При ярком освещении кажется, что красные участки красно-синего плаката расположены перед соседними синими участками. А при более тусклом свете, наоборот, синие участки кажутся ближе, чем красные. Почему возникает ощущение глубины и почему в тусклом свете близкие и далекие поверхности меняются местами?

**ОТВЕТ** • Сначала разберемся, как мы видим три объекта, расположенные перед нами на разных расстояниях. Если мы сфокусируемся на среднем объекте, в каждом глазу возникает четкое изображение на пересечении его линии зрения и сетчатки. Более далекий объект образует размытое изображение на сетчатке, расположенное чуть ближе к носу по сравнению с резким изображением среднего объекта. А более близкий объект образует размытое изображение на сетчатке, чуть смещенное к виску по сравнению с резким изображением среднего объекта. Мозг сравнивает положения этих

изображений и приписывает правильные расстояния от глаза до соответствующих реальных объектов.

Подобное сравнение происходит и когда мы смотрим на красно-синие плакаты, что и объясняет ощущение глубины. Допустим, вы смотрите на две соседние точки при ярком освещении: одну красную, а другую синюю. Световые лучи от этих точек попадают в глаз, преломляются в нем и формируют изображение на сетчатке. Однако лучи с синей длиной волны преломляются сильнее, чем с красной, так что обе точки не могут оказаться одновременно в фокусе. Допустим, вы смотрите прямо перед собой и фокусируете глаза на красной точке, при этом в каждом глазу изображение красной точки формируется на пересечении линии зрения и сетчатки. А синяя точка образует на сетчатке размытое изображение большего радиуса (рис. 7.8).



**Рис. 7.8 / Задача 7.43.** Если красная точка образует на сетчатке глаза четкое изображение, изображение синей точки будет находиться перед сетчаткой.

Глубина, которая приписывается этим двум изображениям, зависит от того, в каком месте сетчатки относительно линии зрения они формируются. Обычно линия зрения не проходит через центр зрачка. При ярком освещении она смещается от центра зрачка к носу. При такой геометрии центр размытого изображения синей точки слегка смещается от линии зрения к носу. Из опыта восприятия объемных картин мозг определяет, что это изображение создается объектом (синей точкой), более удаленным, чем тот, который образует резкое изображение на линии зрения (красная точка). Таким образом, вы воспринимаете синюю точку как более удаленную, чем красная.

В тусклом свете зрачок расширяется, и линия зрения сдвигается от центра зрачка к виску. Это сдвигает размытое изображение синей точки по сетчатке до тех пор, пока его центр не окажется сдвинутым к виску относительно линии зрения. Мозг это новое положение изображения синей точки интерпретирует так, как будто реальная синяя точка теперь находится ближе, чем красная.

Объемность можно увидеть и на картах, раскрашенных красным и синим цветом, если карты рассматривать с помощью большой выпуклой линзы, например под сильной лупой. Здесь разделение цветов происходит потому, что синий свет преломляется больше, чем красный (хроматические аберрации).

#### 7.44 • СИНИЕ ДУГИ ПУРКИНЬЕ

Оказавшись однажды ночью на улице, физиолог Йоханнес Пуркинье, живший в XIX веке, заметил, что над небольшим светящимся угольком в его поле зрения возникали две синие дуги. Хотя они быстро исчезали, он мог воссоздать их, быстро перемещая уголек.

Чтобы увидеть нечто похожее, выполните следующие действия: выключите свет в комнате примерно на две минуты. Закройте один глаз и включите небольшой красный фонарь. Лучше всего подойдет узкий красный фонарь прямоугольной формы, который в вашем поле зрения занимает не более  $0,25^\circ$ . Открытым глазом в течение секунды вы будете видеть слабую синюю дугу или луч. Форма дуги зависит от того, в каком месте вашего поля зрения находится источник красного света. Чтобы увидеть дугу еще раз, включите свет в комнате примерно на две минуты, а затем повторите все действия сначала.

Сразу после полного отключения стимулирующего освещения также можно увидеть тусклые дуги. Но в любом случае, когда глаз полностью адаптируется к темноте, дуги будут серыми (бесцветными).

Почему появляется дуга или луч и почему форма синей области зависит от положения источника стимулирующего освещения? Как небольшой источник стимулирующего освещения может создать изображение дуги, которая проходит через довольно широкую область поля зрения? Почему дуги синие, когда глаз частично адаптирован к свету, но серые, когда он полностью приспособился к темноте?

**ОТВЕТ •** Везде, где изображение красных объектов попадает на сетчатку, свет активирует колбочки, ответственные за обнаружение красного света. Нервные пути, ведущие от этих колбочек, лежат рядом с путями, связанными с палочками, расположенными в другом месте сетчатки. По-видимому, возбуждение путей от колбочек стимулирует пути, ведущие к мозгу от палочек, и мозг вводится в заблуждение, думая, что палочки тоже освещены. Поскольку эти палочки



располагаются на сетчатке по дуге, мозг воспринимает их возбуждение как светящуюся дугу.

Мы видим дуги синего цвета, если часть колбочек все еще посылает в мозг сигналы желтого цвета, оставшиеся от предыдущего воздействия, когда свет в комнате не был выключен. Восприятие синего цвета развивается следующим образом: красный свет попадает на колбочки на сетчатке и активирует их. Нервные пути от этих колбочек активируют нервные пути, связанные с палочками в дуге, которую вы видите. Эти активированные пути от палочек подавляют желтый сигнал от колбочек, расположенных вдоль этой дуги.

Желтый и синий — это пара так называемых *оппозитных цветов*, потому что, когда передача желтого подавляется, мозг воспринимает синий цвет. Таким образом, когда нервные пути палочек подавляют передачу желтого цвета от колбочек, расположенных вдоль дуги, мозг воспринимает дуги как синие. Позже, когда эти колбочки становятся неактивными (глаза адаптируются к темноте), палочкам уже нечего подавлять, и дуга воспринимается как серая.

#### 7.45 • ПЯТНО МАКСВЕЛЛА

Посмотрите через желтый фильтр на белый лист бумаги. Затем быстро замените этот фильтр на синий. Вы сразу увидите пятно Максвелла — маленькое темное или желтое пятно, лежащее на линии зрения. Вы сможете увидеть это пятно, используя и другие пары цветных фильтров, но обязательно второй фильтр из этой пары должен пропускать больше синего света, чем первый. Почему возникает пятно Максвелла?

**ОТВЕТ** • Возможное объяснение происхождения пятна Максвелла заключается в том, что фоторецепторы-палочки влияют на информацию о цвете, отправляемую в мозг фоторецепторами-колбочками. Когда вы первый раз смотрите на белую бумагу через желтый фильтр, желтый свет, входящий в глаз, активирует колбочки и всю остальную зрительную систему, которая отвечает за восприятие желтого света.

Сразу после того как вы заменяете желтый фильтр на синий, эти колбочки все еще остаются активными. И уже когда синий свет попадет в глаза, другие колбочки начинают посылать сигналы о синем цвете в мозг. Но и палочки также реагируют на синий свет, причем больше, чем на желтый. Хотя они не могут отправить в мозг сигналы о цвете (они посылают только сигналы о яркости), их активация может подавлять желтый

сигнал от колбочек, которые все еще активированы предыдущей засветкой желтым светом.

Желтый и синий называются *оппозитными цветами*, потому что, когда передача желтого подавлена, мозг воспринимает синий цвет. Таким образом, когда палочки препятствуют передаче сигнала о желтом цвете из колбочек, мозг «видит» синий цвет. Так как он еще получает сигнал о синем цвете и от других колбочек, которые активируются синим светом, теперь глазу синий свет кажется ярче, чем он есть на самом деле.

Поскольку в центральной глазной ямке (участке сетчатки, в который упирается линия зрения) нет палочек, добавочный синий цвет ею не воспринимается. По контрасту с остальной сетчаткой центральная ямка воспринимается желтой из-за того, что желтый — оппозитный цвет к синему. Эта кажущаяся окраска и есть пятно Максвелла.

#### 7.46 • ВИЗУАЛЬНЫЕ ОЩУЩЕНИЯ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ

Находясь в космосе, космонавты сообщали о том, что, когда глаза адаптировались к темноте, они видели вспышки света в виде точек, звезд или двойных звезд, а иногда вспышки заполняли большую часть поля зрения. Эти картины порождались космическими лучами, проходящими через глаза космонавтов. Космические лучи — это частицы, в основном протоны, образующиеся в космическом пространстве и обычно летящие с огромными скоростями.

Подобные картины наблюдались и в исследовательских лабораториях, когда быстрые частицы направлялись в глаз испытуемого. Как образуются эти вспышки? Сталкиваются ли эти частицы непосредственно с фоторецепторами сетчатки, заставляя их передавать сигналы в мозг, или они создают свет внутри глаза, который затем улавливается фоторецепторами? Могут ли подобные вспышки увидеть альпинисты в высоких горах или пассажиры самолетов?

**ОТВЕТ** • Вспышки, наблюдаемые космонавтами, могут быть вызваны светом, испускаемым при пролете чрезвычайно быстрых частиц через стекловидное тело (прозрачная среда, заполняющая глазное яблоко) и сетчатку. Скорости частиц превышают скорость распространения света в глазу (она меньше скорости распространения света в вакууме в  $n$  раз, где  $n$  — показатель преломления), в результате в стекловидном теле может возникнуть так называемое *черенковское излучение*, которое и регистрируется фоторецепторами



на сетчатке. В 1958 году Павел Черенков, Игорь Тамм и Илья Франк были удостоены Нобелевской премии по физике с формулировкой: «За открытие и истолкование эффекта Черенкова».

Такие вспышки света наблюдались в экспериментах, когда высокоскоростные *мюоны* (частицы, похожие на электроны, но в 207 раз более тяжелые) направлялись в глаз испытуемого. Кроме того, частицы, даже медленные, могут создавать вспышки, если они сталкиваются непосредственно с фоторецепторами на сетчатке. Но никто не рассказывал о том, что видел вспышки света во время полетов в самолете, даже на полярных маршрутах на большой высоте, где из-за большой ширины облучение выше.

#### 7.47 • КРАСНЫЙ СВЕТ НА ПАНЕЛЯХ УПРАВЛЕНИЯ

Почему ночью панель управления на капитанском мостике корабля обычно подсвечивается темно-красным светом, то есть светом с длиной волны на красном краю видимого спектра?

**ОТВЕТ** • Несмотря на то что фоторецепторы-колбочки плохо функционируют в условиях слабой освещенности, фоторецепторы-палочки такой свет уловить могут. Однако, чтобы видеть при очень слабом свете, нужно дать возможность палочкам адаптироваться к темноте, то есть выключить свет не меньше чем на 10 минут, и тогда они станут максимально чувствительными к источникам слабого света. Поскольку палочки не активируются светом на красном краю видимого спектра, ночью панели управления обычно подсвечиваются именно красным светом. Когда капитан смотрит на панель управления, колбочки могут активироваться, а палочки нет. Таким образом, палочки готовы к тому, чтобы капитан в любой момент в темноте мог разглядеть опасность.

#### 7.48 • РЕНТГЕНОВСКОЕ ЗРЕНИЕ СУПЕРМЕНА

Герой комиксов Супермен с помощью испускаемых из глаз рентгеновских лучей может видеть то, что происходит за сплошной стеной. Здесь мы не будем обсуждать, могут ли глаза испускать рентгеновские лучи, а сосредоточимся на более легком вопросе: можно ли обнаружить что-то или кого-то, находящегося за стеной, с помощью рентгеновских лучей?

**ОТВЕТ** • Чтобы Супермен смог уловить лучи, идущие обратно к нему, скажем, от преступника, находящегося по ту сторону стены, преступнику нужно отражать

лучи. Но это означает, что стена тоже будет отражать лучи. Вы можете сказать, что любой материал может частично пропускать, а частично отражать лучи. Тогда часть лучей пройдет через стену, часть прошедших лучей отразится от преступника, и после того как немногие сохранившиеся лучи пройдут обратно через стену, они наконец достигнут Супермена. Беда в том, что оставшихся лучей будет так мало, что они будут маскироваться множеством лучей, отраженных стеной и всеми объектами, окружающими преступника со всех сторон. Даже если Супермен сможет каким-то чудом мысленно обработать все лучи и на фоне всех шумов выделить изображение преступника, все еще останется существенная проблема: как глаза Супермена смогут поглотить лучи, если их так легко отразить и пропустить? Наконец, рентгеновское излучение вообще не отражается от материалов, разве что при почти скользящем падении... Я, конечно, понимаю, что комиксы лучше читать, а не анализировать.

#### 7.49 • ИЛЛЮЗИЯ ФЕЙЕРВЕРКОВ

Если в безветренную темную ночь выстрелить петардой строго вверх, горящие обломки при взрыве должны разлететься равномерно по всем направлениям в горизонтальной плоскости. Почему тогда кажется, что все обломки летят к вам?

**ОТВЕТ** • Детали этой иллюзии пока не объяснены. Однако можно предположить, что жизненный опыт создает предпосылки для нее: когда вы смотрите практически на любой трехмерный объект, вы всегда можете разглядеть детали на ближайшей его стороне, но редко — на дальней стороне. Таким образом, в темную ночь множество разлетающихся горящих обломков без каких-либо подсказок о расстоянии до них, например в виде фона из облаков, будет восприниматься как детали ближайшей стороны расширяющегося невидимого объекта.

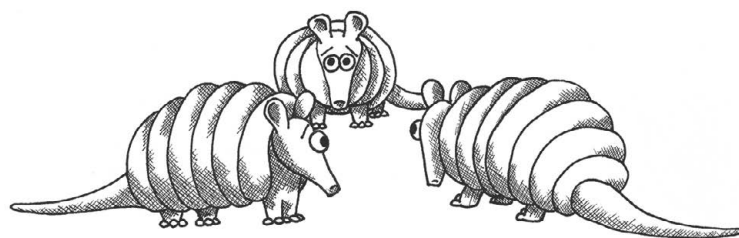
#### 7.50 • ВЗГЛЯД НА ПОТОЛОК

Лягте на спину в центре комнаты, в которой есть дверной проем, а на потолке висит светильник. Если посмотреть на потолок в сторону ног, потолочный светильник и дверной проем выглядят нормально. Но если вы закинете голову назад и посмотрите на потолок в противоположном направлении, у вас возникнет странное ощущение, что вы смотрите на потолок сверху вниз, как будто можете пройти по нему. Кажется,

что потолочный светильник растёт снизу вверх, а дверной проём как будто образует препятствие, через которое вам придётся перешагнуть. Что порождает эту иллюзию? Увидите ли вы то же самое, если посмотрите на потолок, стоя на голове?

**ОТВЕТ** • В опубликованных исследованиях этой иллюзии говорится, что когда вы лежите на спине, для вас верх и низ меняются местами, потому что у вас уже нет обычных подсказок относительно направления вверх и вниз со стороны силы тяжести. Обычно все,

что вы видите в нижней половине вашего поля зрения, находится внизу, а все, что в верхней половине поля зрения, —верху. Если вы, лежа на спине, мысленно поменяете верх с низом, потолок, который находится со стороны ваших ног, будет в нижней половине вашего поля зрения, но будет восприниматься как «верх», а другая сторона потолка, находясь в верхней половине вашего поля зрения, будет восприниматься как «низ». Если вы встанете на голову, иллюзия не возникнет, вероятно, потому, что у вас в этом случае будут сильные подсказки со стороны силы тяжести о том, где верх, а где низ.



# Алфавитный указатель

## А

Авианосец, взлет самолета, 1.17  
Австралийская гуделка, звуки, 3.81  
Автомобили, 1.2–1.9, 1.12, 1.14, 1.15, 1.87, 1.150–1.152, 1.174, 1.175, 2.1, 2.2, 4.84, 5.3, 5.9, 6.73, 6.74  
    удар током, 5.9  
    укачивание и инфразвук, 3.74  
Айкидо, 1.55  
Айсберг, зеленый, 6.53  
Айсберговая газировка, 3.70  
Аквапланирование, 1.8  
Акустические тени, 3.19  
Александритовый эффект, 6.96  
Алмазы, 6.94  
Алюминиевая фольга и зуб, 5.27  
Американские горки, 1.19  
Американский футбол, 1.111  
Анаморфоз в искусстве, 6.77  
Андерсон, Пол, поднятие тяжестей, 1.41  
Анды, свечение, 5.21  
Антенны колебания, 1.182  
Антипузырьки, 2.124  
Аптечная резинка, нагрев и охлаждение, 4.86  
Арки, образование при течении сыпучих материалов, 2.105, 2.125  
Археология, намагничивание, 5.39  
Атлатль, 1.27  
Аэрозольный баллончик, горение, 5.12

## Б

Бабочек расцветка, 6.115  
Бадгир (ветролов), 4.83  
Балет, 1.35, 1.99  
Банджи-джампинг, 1.52  
Банка с лимонадом, устойчивость, 1.148  
«Бар в Фоли-Бержер», 6.75  
Барабаны, звуки, 3.73  
Бараны толсторогие, 1.10, 1.61  
Барханы, 2.111  
Бархат, оптические свойства, 6.131, 6.132  
Баскетбол, 1.33–1.35, 1.43  
Беарнез, соус, 5.37  
Бедуины, черная одежда, 4.59  
Бейсбол, 1.21–1.23, 1.43, 2.16  
    слежка за мячом, 7.9

Белая мгла, 6.55  
Белл, Александр Грейам, 5.41  
Белого медведя шерсть, 4.58  
Белье, сохнет на веревке, 4.55  
Бильярд, удары, 1.74  
Бимон, Боб, 1.38  
«Битлы» и Синяя Вреднючка, 7.22  
Блесны метание, 1.134  
Бобовый стебель, 1.136  
Бобслей, 1.154  
Боевые искусства, 1.111  
Бокалы для вина  
    пение, 3.43  
    разрушение с помощью голоса, 3.44  
Боковой разряд, молния, 5.2  
Бокс, 1.46  
Боласы, 1.30  
Большая Берта, пушка, 1.135  
Бомба из мертвого кота, 4.31  
Бор, приливная волна, 2.32  
Борозды от валунов, 4.30  
Боулинг, 1.73  
Бразильского ореха эффект, 2.108  
Бритье, 1.193  
Бронежилет, 1.129  
Бронтиды, 3.57  
Бумажные шарики, 1.144  
Бумеранг, 2.9  
Бусинки на жидкой нити, 2.81  
Бутерброд, падение, 1.98  
Бутылка, раскручивание, 1.109  
Бухта жидкого каната, 2.62

## В

Вазелин в ультрафиолетовом свете, 6.134  
Ван Гог, Винсент, 6.47, 7.6  
Ванная комната, электризация, 5.13  
Велосипеды, 1.20  
Венера и визуальный эффект блистера, 7.27  
Венера, наблюдение «каналов», 7.4  
Венец, 6.44  
Вены, оптика, 6.123  
Верн, Жюль, 6.93  
Верховой пожар, 4.81  
Ветер, вой, 3.1  
Ветро-холодовой индекс, 4.56  
Ветровое стекло, оптика, 6.106

Вечная мерзлота, звуки, 3.79  
Взлет самолета, иллюзия, 1.17  
Визуальная латентность, 7.23  
Викинги, 6.30, 6.127  
Вино, «слезы» крепкого, 2.88  
Винтергриновые пастилки, 5.19  
Висящие ложки, 1.57  
Вихри, 2.23–2.25, 2.36–2.40  
    в ванной, 2.23  
    круговые, 2.40  
    пыльные (пылевые дьяволы), 2.39  
Включение уличных фонарей, иллюзия, 7.24  
Вода  
    в колодце, 4.92  
    замораживание небом, 4.13  
    перегретая, 4.48  
    переохлажденная, 4.10  
Водные насекомые, 2.80, 6.126, 7.38  
    водомерки, 2.80  
Водопады, 2.118, 3.17  
Водопроводные трубы, урчание, 3.47  
Воды замерзание, рев, 4.16  
Водяные колокола, 2.101  
Водяные пленки, 2.101  
Водяные смерчи, 2.38  
Возвращающие отражатели  
    акустические, 3.25, 3.64  
    светоотражатели, 6.70, 6.71  
Воздушная ударная волна, 3.58  
Воздушный шар  
    надувание, 4.70  
    подъем, 2.56  
Волны  
    вблизи берега, 2.65  
    внутренние, 2.35  
    гигантские, 2.64  
    дождь успокаивает, 2.133  
    на струйке воды, 2.100  
    на футбольном стадионе, 1.128  
Волны-убийцы, 2.64  
Волосы, мокрые, 2.95  
Волчки, 1.103, 1.105, 1.106  
Восходящий стример, 5.1, 5.7  
Вращающийся барабан, парк развлечений, 1.19  
Вращение книги, 1.95  
Время зависания в баскетболе, 1.35

Всемирный торговый центр, обрушение, 1.48  
 Вспышка при пожаре, 4.79  
 Вулкан Сент-Хеленс, звуковые волны, 3.18  
 Вулкан, электрические разряды, 5.30  
 Вулканическая пыль и окно кабины пилота, 6.105  
 Высоковольтные линии передачи, 5.22  
 Выход в космос, 4.5  
 Вязкоупругая деформация, 1.141  
**Г**  
 Гавани парадокс, 2.67  
 Газированные напитки, замерзание, 4.24  
 Гайдингера щетка, 7.39  
 Галереи шепотов, 3.62, 3.63  
 Галерея, обрушение, 1.47  
 Гало  
   в атмосфере, 6.34, 6.35  
   вокруг источника света, 7.6  
 Гарфилд, президент, пуля, 5.41  
 Гастролиты, 2.49  
 Гейзеры, 4.51  
 Гекконы  
   зрение, 7.33  
   «прилипание», 5.35  
 Геомагнитно-индуцированный ток (ГИТ), 5.47  
 Гигантов мостовая, 1.142  
 Гидравлический осциллятор, 2.142  
 Гидравлический скачок, 2.29  
 «Гинденбург», дирижабль, пожар, 5.15  
 Гитара, электрическая, 5.44, 5.45  
 Гитарные струны, 3.33  
 Глаза  
   отражение от, 7.17  
   цвет, 6.122  
 Глаза насекомых, бугорки на, 6.117  
 Глиняная посуда, охлаждение воды, 4.61  
 Глицерин, движение масляных капель в, 2.143  
 Глория, 6.46  
 Глотание шпаги, 6.87  
 Глубоководное погружение, 2.52, 2.54  
 Голова без тела, 6.62  
 Голубая кожа, 6.115, 6.123  
 Голубая сойка, расцветка, 6.115  
 Голубые горы, 6.6  
 Гольф, 1.36, 1.75, 2.15  
 Гоночные автомобили, 1.15, 1.150, 2.1, 2.2, 5.9  
 Горизонт, расстояние, 6.18  
 Горловое пение, 3.6  
 Город, дымка, туман, огни, 6.16, 6.17  
 Горы  
   тень от, 6.36  
   цвет, 6.6  
 Горячего шоколада эффект, 3.40

Готовить в печке или на открытом огне, 4.45, 4.46  
 Гофрированные трубки, звуки, 3.39  
 Гравитационной пращи эффект, 1.190  
 Гражданская война в США, коммуникация с помощью звуковых сигналов, 3.19  
 Грампластинка, оптика, 6.107  
 Гранул разбрызгивание, 2.147  
 Гребень Рейнольдса, 2.148  
 Гремучая змея, 4.1  
 Грибовидные облака, 4.76  
 Грибы, стреляющие спорами, 2.99  
 Гром, 3.56, 4.74  
 Грязь растрескавшаяся, 4.68  
 Гусеницы коконопряды, расцветка, 6.115  
**Д**  
 Да Винчи, Леонардо, 7.31  
 Давление  
   внутри самолета, 4.69  
   клапан, 1.171  
   отрицательное, 2.136  
 Дайвинг, 2.52, 2.54  
 Дверь душевой кабины, оптика, 6.88  
 Декомпрессия, 2.52  
 Дельфины  
   катание на волне, 2.70  
   круговые вихри, 2.40  
 Деревья  
   колебания, 1.131  
   падение, 1.69  
   подъем воды по стволу, 2.136  
 Дзюдо, 1.55, 1.110  
 Дьябло, 1.107  
 Диамантики, 5.48  
 Диджериду, 3.37  
 Динозавры, 2.47–2.49, 3.9, 3.59  
   зауроподы, 2.48  
   звуки, 3.9  
   кровенное давление, 2.47  
   щелчок хвостом, 3.59  
 Диоксид кислорода, озеро Ниос, 2.55  
 Диска метание, 2.126  
 Дождь, идти или бежать, 1.1  
 Домены магнитные, 5.49  
 Домино, падение костяшек, 1.68  
 Домино, стопка костяшек, 1.66  
 Допплера эффект, 3.23, 3.24  
 Дороги, 1.184  
 Драг-рейсинг (гонки на максимальное ускорение), 1.150  
 Древние сооружения, 1.62–1.64, 3.65, 3.66, 6.23  
 Дружеская вечеринка, эффект, 3.27  
 Дым костра, цвет, 6.112  
 Дым сигарет, цвет, 6.153  
 Дымка, цвет, 6.16  
 Дымовые сигналы, 4.76  
 Дыхания звуки, 3.32

Дюны  
   песчаные, 2.111  
   продольные, 2.111  
 Дятлы, 1.10  
**Ж**  
 Жабы, 1.27  
 Жарка, 2.96  
 Железная дорога, 1.13, 1.72, 1.181, 2.3  
 Железнодорожной цистерны разрушение, 4.54  
 Железнодорожные тоннели, звуки, 3.55  
 Жемчуг, оптика, 6.116  
 Жидкий азот, использование, 4.6, 4.31  
 Жидкий мостик, 2.86, 2.112  
 Жидкий мрамор, 2.94  
 Жидкости неньютоновские, 2.58  
 Жидкость дилатантная, 2.58  
 Жидкость тиксотропная, 2.58  
 Жидкость, взбирающаяся по стержню, 2.61  
 Жираф, кровяное давление, 2.47  
 Жонглирование, 1.25  
 Жужжание, стробоскопический эффект, 7.8  
 Жук-вертячка, цвет, 6.115  
 Жук-скакун, оптика, 6.115  
 Жук-щелкун, 1.40  
 Жуки  
   кувыркание, 1.40  
   оптика, 6.115  
   ощущающие пожар вдалеке, 4.2  
   сбор тумана, 4.67  
 Журчащие ручейки, 3.45  
**З**  
 Завывание ветра, 3.1  
 Зажигательное зеркало, 6.81, 6.82  
 Закат, цвет неба, 6.5, 6.8  
 Закрепление на дефекте, 2.84, 2.91  
 Залив Фанди, 2.34  
 Занавес душевой кабинки, 2.21  
 Засыпанные лавиной, слышимость под снегом, 3.71  
 Затмение лунное, 6.26  
 Зацепления и срыва эффект, 3.42, 3.43  
 Звездные «лучи», 7.6  
 Звездочеты, способ наблюдения звезд, 7.36  
 Звездчатый сапфир, 6.97  
 Звезды, мерцание, 6.32  
 Звезды, наблюдение через трубу, 7.35  
 Звуки  
   из ушей, 3.28  
   при пережевывании пищи, 3.52  
   распространение на большие расстояния, 3.18  
 Звуковой удар, 3.54–3.59  
 Здания

аэродинамика, 2.5  
колебания, 1.133  
Землетрясение, разрушение при, 2.103  
Землетрясений огни, 5.20  
Земной подушки эффект, 2.1  
Земной ток, 5.2  
Зеркала  
    боковые, 6.74  
    заднего вида, 6.73  
    многократные отражения, 6.64–6.66, 6.68  
    односторонние, 6.72  
Зеркальные лабиринты, 6.66  
Змеи воздушные, 2.6  
Змея  
    кровеное давление, 2.47  
    летающая, 2.12  
Зодиакальный свет, 6.149  
Зонтик, оптика, 6.104  
Зоны тишины вблизи места взрыва, 3.18  
Зрение подводное, 6.85, 7.18, 7.19  
Зубная пломба, электрический эффект, 5.27

## И

Иглу, 4.36  
Извивающиеся тонкие струйки, 2.149  
Излучение и визуальные ощущения, 7.46  
Изображения Солнца при солнечном затмении, 6.103  
Изображения солнца через маленькое отверстие, 6.103  
Импрессионизм, 7.10  
Инверсия при отражении, 6.60  
Иней, 4.19  
Инфразвук, 3.10, 3.56, 3.74  
Искаженное отражение, 6.68, 7.28  
    отражения от елочных шаров, 6.68  
Искрение, 5.8–5.11, 5.17, 5.29, 5.30  
Искусство (изобразительное), 6.8, 6.47, 6.75–6.77, 6.88, 6.132, 7.6, 7.10, 7.11, 7.13, 7.14, 7.25, 7.31  
    эпохи Возрождения, 6.76  
Испытание на центрифуге, 1.87  
Истуканы острова Пасхи, 1.62

## Й

Йо-йо, 1.84, 1.85

## К

Кабелей и проводов аэродинамика, 2.129  
Кабина лифта, 1.53, 1.54  
Кадило, раскачивание, 1.113  
Калейдоскопы, 6.65  
Камера пинспек, 6.102  
Камера пинхол, 6.102  
Камины, 4.77  
Камнепады, 2.116, 3.58  
Камни

    движение при промерзании почвы, 4.29  
    перемещение в пустыне, 1.58  
Канал, уровень воды в, 2.30  
Канальчики в кубиках льда, 4.21  
Канатоходцы, 1.90  
Капание, 2.121  
Капли на горячей сковороде, 4.6  
Капли парящие, 2.74  
Карандаш, 1.69, 1.70, 6.99  
Карате, 1.45  
Картины маслом, глубина, 7.14  
Картины перекашивание, 1.146  
Картофельные колючки, 4.64  
Карты в облаках, 6.20  
Карты, бросание, 2.10  
Карусель, 1.19  
Кастрюля, цвет во время приготовления еды, 6.114  
Катание на скимборде, 2.130  
Катапульта, 1.31, 2.99  
Каустики, 6.98  
Кашель, звуки, 3.60  
Каяк, перевернутый, 1.88  
«Кельтские камни», игрушка, 1.108  
Керлинг, 1.89  
Кильватерный след, в воде, 2.68  
Кипение воды  
    звуки, 3.51  
    процесс, 4.43  
Кипящая вода, испытание, 4.88  
Кисти для рисования, 2.95  
Китайский волчок, 1.105  
Киты  
    и пузырьки, 2.79  
    щелчки, 3.16  
Кларк, Артур Чарльз, 6.82  
Классная доска, скрип, 3.42  
Клетки крови, наблюдение движения, 7.4  
Кнут, щелчки, 3.59  
Кожа, мягкость, оптика, 6.133  
Коллоидная суспензия, 5.37  
Колокол, на соборе, 1.120  
Колонны автомобилей, движение, 1.2  
Кольца на зеркале, цветные, 6.110  
Кольца света, 6.40  
Кольцо Бишопы, 6.9  
Конденсационный след  
    образование, 2.20  
    цвет, 6.143  
Конденсация  
    на зеркалах, 2.92, 4.65  
    на очках, 4.66  
«Конкорд», изменение длины самолета, 4.53  
Контрастная облачная дуга, 6.10  
Концертный зал, акустика, 3.61  
Коньки, катание, 4.34

Копье, метание, 2.127  
Корабельная сирена, 3.21  
Коровий магнит, 5.43  
Корона  
    в атмосфере, 6.47  
    на заиндевевших стеклах, 6.48  
    электрический пробой, 5.21  
Коронная вспышка, 6.27  
Короткова тоны, 3.49  
Кофе, 2.24, 2.87, 2.90, 3.40, 4.42, 4.51, 4.60  
    пятна, 2.91  
Кошачьи глаза, отражение, 7.17  
Кошка, падение, 1.51, 1.96  
Краевой тон, 3.3  
Краевые волны, 2.71  
Кракатау, извержение вулкана  
    распространение звука, 3.74  
    цвет неба, 6.8, 6.9  
Крахмала раствор, 2.58  
Креветки-щелкуны, издаваемые звуки, 3.50  
Креветоломинесценция, 3.50  
Крикет, подача при игре, 2.17  
Кровяное давление, тоны, 3.49  
Крокодилы  
    зрение, 7.18  
    плаучесть, 2.49  
Кук Джеймс, 7.27  
Кулики, кормление, 2.83  
«Курс», подводная лодка, 1.125

## Л

Лабиринты, зеркальные, 6.66  
Лавинный шар, 2.109  
Лавины снежные, 2.114  
Лак, оптика, 6.131  
Ламоте Генри, прыжки в воду, 1.49  
Лангусты, звуки, 3.12  
Лассо, 1.83  
Левитация над магнитом, 5.48  
«Лего», конструктор, 1.66  
Лед  
    линза из льда, 6.93  
    образование, 4.10, 4.11  
    цвет, 6.53, 6.57  
    яркость, 6.56  
Ледяной затор, 4.18  
Ледяные диски в реках, 4.20  
Ледяные отблески, 6.20  
Ледяные шипы, 4.20  
Лезвие бритвы, отражение, 6.99  
Лезвие бритвы, плавающее, 2.85, 6.99  
Лепестки цветов, насыщенный цвет, 6.120  
Лесные пожары  
    полосы, 2.138  
    распространение, 4.81  
Летучие мыши, слух, 3.24, 3.25  
Ликер «Тиа Мария», узоры, 2.89



Лимонная батарея, 5.27  
 Линия на фоне идущего вдалеке дожда, 6.147  
 Липкая лента, разматывание, 1.153  
 Листья осины, цвет, 6.121  
 Лихтенберга фигуры, 5.2, 5.18  
 Ловля рыбы, 1.134, 1.158  
 Лодка на камфаре, 2.150  
 Лодки, 2.30, 2.43, 2.128  
 Ложе факира, 1.56  
 Лоуэлл, Персиваль, 7.4  
 Луговые собачки, 2.22  
 Луна  
   видимая сторона, 1.185  
   иллюзия, 7.1  
   темная часть, 6.43  
   цвет, 6.26, 6.50  
 Луч смерти Архимеда, 6.81  
 Лучи на небе, 6.15  
 Лыжи, 1.101, 1.163, 2.8, 4.33, 5.14  
 Лыжи, электризация и свечение, 5.14  
 Лыжные очки, 6.56  
 Льюис и Кларк, 3.57  
 Люди — пушечные ядра, 1.32  
 Лягушка-бык, кваканье, 3.11  
 Лягушки  
   звуки из дупла, 3.13  
   левитирование над магнитом, 5.48  
   охлаждающие мозг глазами, 4.61

## М

Магнетит, 5.38  
 Магнито-резонансная томография (МРТ), 5.40  
 Максвелла пятно, 7.45  
 Маленький принц, 1.156  
 Мане, Эдуард, 6.75  
 Масло  
   гающее волны, 2.73  
   потoki в нагретом, 2.90  
 Масляные пятна на дороге, 2.151  
 Масляные пятна, цвет, 6.114  
 Маха полосы, 7.25  
 Машины, нагрев закрытых, 4.84  
 Маятник, 1.115–1.121, 1.149, 1.179  
   перевернутый, 1.115  
 Медицинская каталка, воспламеняющаяся, 5.16  
 Медоносные пчелы, навигация, 7.38  
 Меренговый торт, 5.36  
 Мерзлотные полигоны в Арктике, 4.28  
 Мертвая вода, 2.35  
 Мертвые зоны в концертном зале, 3.61  
 Мерцание, оптическое, 6.32  
 Мерцающие звезды, 6.32  
 Метеорит  
   звуки при сгорании, 3.80  
   падение, 1.37  
 Микроволновка, 4.48  
 Мини-гольф, 1.75

Мираж, 6.28–6.30  
 Мнимые ДТП, 1.3  
 Мокрое темнее сухого, 6.52  
 Молнии  
   и автомобили, 5.3  
   и деревья, 5.4  
   и железная руда, 5.38  
   и животные, 5.2  
   и люди, 5.2  
   молниеотводы, 5.7  
   причина возникновения, 5.1  
   шаровые и четочные, 5.5  
 Молоко, оптические свойства, 6.61, 6.111, 6.124  
 Молота бросание, 1.161  
 Молоток, использование, 1.170  
 Моне, Клод, 7.10  
 Монеты, раскачивание, 1.109  
 Моны Лизы улыбка, 7.31  
 Мороженое домашнее, 4.41  
 Морозные узоры, 6.129  
 Морская раковина, звуки, 3.36  
 Морская свинья, движение на волне, 2.70  
 Морской узел, 1.59  
 Морщинка на текущей воде, 2.148  
 Мост через Такома-Нэрроуз, обрушение, 2.4  
 Мосты, 1.71, 1.123, 1.180, 2.4  
 Мотоциклы, 1.79–1.80  
 МРТ (магнито-резонансная томография), 5.40  
 Муаровые узоры, 7.12  
 Муравейник, терморегулирование, 4.83  
 Муравьи  
   и электрические цепи, 5.33  
   ориентация, 6.128, 7.38  
 Мурлыканье, животные, 3.8  
 Мухи, прилипание, 5.35  
 Мушки, в поле зрения, 7.5  
 Мыльные пленки, разложение на цвета, 6.114  
 Мыльные пузыри, 2.77, 2.122, 4.70  
 Мяса цвет, 4.45, 6.135

## Н

Наледь, 4.19  
 Наскальные рисунки, эхо поблизости, 3.66  
 Небо  
   поляризация, 6.127, 6.128, 7.38  
   форма, 7.2  
   цвет, 6.5, 6.8, 6.11–6.14, 6.19  
   яркость, 6.4  
 Неньютоновская жидкость, 2.58  
 Неоновый эффект, 7.13  
 «Нести», растворимый чай, поведение порошка, 2.106  
 Ногти ломающиеся, 1.143  
 Нос, ограничение поля зрения, 7.21

Ночь, ясная, 6.148  
 Ношение тяжестей, 1.116, 1.117  
 Ньюгрейндж, мегалитическая гробница, 3.66, 6.23

## О

Обезьяна мандрил, расцветка, 6.115  
 Обертонное пение, 3.6  
 Обжаривание во фритюре, 2.96  
 Облака, светящиеся ночью, 6.59  
 Облаков улицы, 2.138  
 Облачные карты, 6.20  
 Обморожение, 4.56  
 Огненный смерч, 4.82  
 Огнехождение, 4.8, 4.9  
 Огни кладбищенские, 6.83  
 Огни Святого Эльма, 5.21  
 Одноколенный велосипед, езда, 1.115  
 Одностороннее зеркало, 6.72  
 Ожоги от искры, 5.8–5.11, 5.15, 5.16  
 Озеро Ниос, 2.55  
 Озеро старичное, 2.26  
 Океана  
   цвет, 6.38  
   яркость, 6.140  
 Окна в пунктах управления полетом, 6.63, 6.79  
   многократные отражения в, 6.79  
 Окно, течение стекла, 2.57  
 Оконная сетка, оптика, 6.104  
 Оливка в мартини, 2.25  
 Оп-арт, 7.13  
 Опалы, 6.95  
 Опасно балансирующие камни, 1.125  
 Оползни длинного выхода, 2.115  
 Оппозиционный эффект, увеличение яркости, 6.44  
 Оптико-переменные изображения, 6.109  
 Оптический отбеливатель, 6.137  
 Опыление, электризация, 5.32  
 Оранжевые, тепло, 4.84  
 Оркестровая яма, акустика, 3.61  
 Осадные орудия, 1.31  
 Осины, цвет листьев, 6.121  
 Остановка для заправки автомобиля, 5.9  
 Остаточное изображение (послеоб-раз), 7.15, 7.16  
 Оствальдовское созревание, 4.70  
 Отоакустическая эмиссия, 3.28  
 Отражения в форме петель, 6.40  
 Отражения от волн в океане, 6.150  
 Отраженные тоны, 3.17  
 Отрицательная подъемная сила, 2.1  
 Отрицательное давление, 2.136

## П

Падающая Пизанская башня, 1.67  
 Падение с высоты, рекорды, 1.49, 1.51  
 Палфрича эффект, 7.23

- Пальто теплое, 4.56  
 Паника в толпе, спасение при, 2.105  
 Папоротники, светящиеся, 6.118  
 Парашютирование, 1.50, 1.55  
 Парк аттракционов, 1.19  
 «Паровая лодочка», игрушка, 4.52  
 Пастис, ликер, 6.113  
 Пауки, 1.122, 2.81  
 Паутина, оптические эффекты, 6.105  
 Пена, бесцветная, 6.130  
 Пение, 3.4, 3.6, 3.67  
 Пение в душе, 3.67  
 Перебои с электричеством, влияние солнечной активности, 5.47  
 Пережевывание пищи, звуки, 3.52  
 Перетягивание каната, 1.172  
 Перколяторы, 4.51  
 Перламутровые облака, 6.144  
 Персиковая кожа, 6.133  
 Перья  
   несмачиваемые, 2.97  
   оптика, 6.115  
 Песка куча, 2.106  
   давление под, 2.140  
 Песок  
   дюны, 2.111  
   зыбучий, 2.102, 2.104  
   искрение, 5.29  
   на пляже, влажность, 2.102  
   поющий и скрипящий, 3.69  
   рябь, 2.110  
   слипание, 2.86  
 Песочные часы, течение песчинок, 2.107  
 Песчаные замки, 2.86  
 Песчаными отмелями отражение, 2.132  
 Печенье, макать, 2.95  
 Пива пузырьки, 2.76, 2.77  
 Пивная кружка, оптика, 6.136  
 Пингвины  
   зов, 3.15  
   зрение, 7.18  
   скучивание, 4.4  
   частота биения в призывах, 3.15  
 Пинго, 4.27  
 Пирамиды египетские, 1.64  
 Пирог в горах, 4.71  
 Пирожные «Твинки» в ультрафиолетовом свете, 6.134  
 Пицца  
   едим горячей, 4.42  
   приготовление, 4.47  
 Пищевая пленка, электризация, 5.34  
 Плавание, 2.19  
 Плавать, 2.43–2.45, 2.48  
 Пламя свечи, 4.78  
   ореол, 7.6  
 Пластик, растяжение, 1.141  
 Пластиковая пищевая пленка, электризация, 5.34  
 Пластинчатоусые жуки (жук-геркулес), цвет, 6.115  
 Пломба в зубе, 4.53, 5.27  
 Пляжевые фестоны, 2.72  
 Повышение температуры вокруг растений, 4.57  
 Подача при игре в крикет, 2.17  
 Подводное зрение, 6.85, 7.18, 7.19  
 Подводное плавание, 2.53  
 Подводные звуковые каналы, 3.20  
 Подделки, борьба с, оптика, 6.109, 6.119  
 Подков метание, 1.82  
 Подлодки  
   бегство из сломанной, 2.54  
   затонувшие, 1.125  
   прослушивание, 3.20  
 Поднятие тяжестей, 1.41  
 Подъемная сила при повороте, 2.131  
 Поезда, 1.13, 1.72, 1.181, 2.3, 3.55  
 Пожар от искры, 5.9, 5.11  
 Полив растений на солнце, 6.92  
 Полотенце, хлопок, 3.59  
 Поля зерновых, колебания, 1.131, 6.45  
 Поляризация солнцезащитные очки, 6.126  
 Поляризация света и зрение, 7.38, 7.39  
 Помидор, пятнышки на, 6.124  
 Попкорн, 4.49  
 Порошки  
   бесцветные, 6.130  
   колебания, 2.108  
   узоры из, 2.141  
   электризация, 5.11, 5.12, 5.18  
 Потеря основных частот, эффект, 3.29  
 Потеря слуха, спровоцированная шумом, 3.30  
 Поток вторичный, 2.25, 2.26  
 Поток пешеходов, 2.105  
 Поющие пески, 3.69  
 Пояс Венеры, 6.14  
 Праща, 1.28  
 Прецессия, 1.104  
 Призрак Пеппера, 6.62  
 Призрак светящейся точки, послеоб-раз, 7.16  
 Приливная волна бор, 2.146  
 Приливы, 2.32–2.34  
 Притягивающий холм, 1.139  
 Пробки, движение транспорта, 1.2  
 Пробои электрические, 5.22  
 Провода, колебания, 2.129, 3.2  
 Прожектора лучи, 6.3, 6.22, 6.80  
 Прозрачные животные, 6.90  
 Противосияние, 6.149  
 Противотуманные фары, 6.51  
 Прохождение света  
   через дверь душевой кабины, 6.88  
   через конверт, 6.86  
 Пружины, фокус, 1.147  
 Прыгающие бобы, 1.39  
 Прыжки  
   в высоту, 1.38  
   в длину, 1.38  
   с трамплина на лыжах, 2.7  
   с шестом, 1.26  
 Прыжки в воду с трамплина, 1.96, 1.133  
 Прыжок через дом, 2.56  
 Птиц полет, 2.18  
 Птицы  
   вертящиеся, 2.27  
   высоковольтные линии, 5.22  
 Птичьи экскременты, 2.98, 5.22  
 Пуантилизм, 7.11  
 Пузырьки  
   в пиве и шампанском, 2.76, 2.77, 4.72, 6.130  
   и антипузырьки, 2.124  
   и киты, 2.79  
   лопающиеся, 2.78  
   мыльные, 2.77  
   траектория, 2.123  
 Пуля, 1.111, 1.145, 1.173  
 Пуркиные синие дуги, 7.44  
 Пустынные муравьи, 6.128, 7.38  
 Пучение при замерзании, 4.27–4.29  
 Пчелы  
   атака на шершней, 4.3  
   навигация, 7.38  
   электростатические эффекты, 5.32  
 Пыльная буря  
   искрение, 5.29  
   образование, 2.39  
 Пьющие птички, игрушки, 4.62, 4.63  
 Пятна на ветровом стекле в поляризованном свете, 6.129  
 Пятно Араго — Пуассона, 6.151  
**Р**  
 Радиометр игрушечный, 4.91  
 Радуги, 6.1–6.3  
 Радужные цвета в биологии, 6.115  
 Разбрызгивание, 2.75, 2.147  
 Разбухание, эффект Баруса, 2.58  
 Развеваяющиеся флаги, 2.117  
 Развеваяющиеся фонтаны, 2.118  
 Размыв берегов рек, 1.193  
 Ракеты, 1.167, 1.168  
 Ракеты V-1 и V-2, звуки, 3.54  
 Раки, 6.113  
 Расплескивание, 2.67  
 Растения  
   выработка тепла, 4.57  
   колебания, 1.131  
   переливчатость, 6.118  
   светящиеся, 6.118  
 Растительное масло горящее, 4.80

Регби, 1.24  
 Резиновая лента, издаваемые звуки, 3.33  
 Резонанс в бутылке, 3.41  
 Реки извилистые (меандрические), 2.26  
 Речь, 3.4, 3.5  
 Рино-оптический эффект, 7.21  
 Рис на палочке, 2.125  
 Родео на быке, 1.91  
 Русалки и водяные, 6.30  
 Рыба  
   зрение, 7.19, 7.42  
   какой ее видит рыбак, 6.84  
 Рыбак, каким его видит рыба, 6.85  
 Рычание, 3.8, 3.10

## С

Самбука, 6.113  
 Самолет, 1.18, 2.20, 2.46  
   воздействие вулкана на, 6.105  
 Самолет-невидимка, 6.117  
 Сапфир звездчатый, 6.97  
 Сбор влаги, ящерица, 2.82  
 Сбор тумана жуками, 4.67  
 Сбритые волосы в воде, 2.150  
 Сварка, горбики и бусинки, 2.81  
 Сверчки, звуки, 3.12, 3.13  
 Свет, сумеречный фиолетовый, 6.145  
 Свечение Альп, 6.145  
 Свечение зеленое, 6.24  
 Свист, 3.3  
   в водопроводных трубах, 3.77  
   слинки, 3.78  
 Сворачивание лентой, жидкость, 2.62  
 Северное сияние (аврора)  
   звуки, 3.80  
   образование, 5.46  
 Сейши, 2.67  
 Сельдь, окраска, 6.115  
 Семена, вращающиеся, 2.11  
 Серая сетка на сетчатке, 7.4  
 Сёра, Жорж, 7.11  
 Сила тяги, 2.2  
 Силосные башни  
   поток зерен, 2.107  
   тряска и гудение, 2.107, 3.38  
 Синие Вредючки, визуальные эффекты, 7.22  
 Синие дуги, поле зрения, 7.44  
 Синьяк, Поль, 7.25  
 Синяя лента на морском горизонте, 6.141  
 Синяя луна, 6.50  
 Сиракузы, защита Архимеда, 6.81  
 Сияние, солнечный и лунный свет, 6.37, 6.39, 6.140  
 Скалолазание, 1.60, 1.61  
 Скачкообразное движение, 2.110  
 Скачущие камни, 1.94  
 Скейтборд, 1.82  
 Скорость остывания  
   горячей и теплой воды, 4.12

кофе, 4.60  
 Скорпион песчаный, 1.126  
 Скотч, свечение, 5.17  
 Скрипка  
   игра, 3.34  
   мерцающее звучание, 3.35  
 Скучивание животных, 4.4  
 «Слезы» крепкого вина, 2.88  
 Слепое пятно, 6.74  
   поле зрения, 7.3  
 Слинки (игрушка-пружинка), 1.65  
 Слоны, 2.53  
   звуки, 3.10  
 Слышимость под водой, 3.26  
 Смачивание, 2.84, 2.93, 2.98  
 Снег  
   волны, 1.128  
   защитные сооружения от, 2.113  
   издаваемые звуки, 3.72  
   искрение, 5.29  
   лавины, 2.114, 4.38  
   цвет, 6.53, 6.54  
 «Снег» на телеэкране, иллюзия 7.30  
 Снежинки, образование, 4.32  
 Снежки, игра, 4.34  
 Снежная слепота, 6.55  
 Снежные рулоны, 4.37  
 Солевой фонтан, 2.135  
 Солевые пальцы, 2.135  
 Солитоны, 2.31  
 Солнечное затмение, цвет неба во время, 6.11  
 Солнечные башни, 4.83  
 Солнечные лучи, 6.15  
 Солнечные собаки, 6.34  
 Солнце, изменение формы, 6.25  
 Солнцезащитные очки и ультрафиолетовый свет, 7.41  
 Солнцезащитные очки, поляризационные, 6.126  
 Соль на тротуарах и дорогах, 4.40  
 Соль при приготовлении домашнего мороженого, 4.41  
 Соляной маятник, 2.134  
 Сопрано, пение, 3.4  
 Сосновых иголок шелест, 3.2  
 Сосульки, 4.17–4.19  
 Соударения в цепочке предметов, 1.42–1.44  
 Соус беарнез, 5.37  
 Спагетти, эффект, 1.121  
 Спрайты, 5.6  
 Спринт, дорожки, 1.16  
 Спутники, 1.136, 1.186, 1.187  
 Сталактиты, 2.84  
 Стекло зеленое, цвет, 6.132  
 Стекло текстурированное, оптика, 6.88  
 Стекло, течение, 2.57  
 Стеклянная гармоника, 3.43

Стетоскопы, 3.32  
 «Столбы» из насекомых, 4.93  
 Стоунхендж, 1.63  
 Стрельба из лука, 1.31  
 Стробоскопический эффект при жужжании, 7.8  
 Струйка жидкости скачущая, 2.60  
 Структурная окраска, в биологии, 6.115  
 Струя дыма, 4.75  
 Ступенчатый лидер, молния, 5.1  
 Ступеньки, эхо, 3.65  
 Сумеречный фиолетовый свет, 6.145  
 Сумерки, продолжительность, 6.142  
 Суп, вращающийся в обратную сторону, 2.59  
 Супермен, рентгеновское зрение, 7.48  
 Суставов хруст, 3.48  
 Сухие завтраки, намагничивание, 5.43

## Т

Татуировка, магнитные свойства, 5.40, 5.42  
 Телеграфные линии, магнитные эффекты, 5.47  
 Телефонные провода, звуки, 3.2  
 Темный треугольник, иллюзия, 6.39  
 Температурное расширение и сжатие, 4.53  
 Теневые полосы, 6.33  
 Тени, 6.99, 6.102, 7.25, 7.40  
   на воде, 6.41  
   на снегу, 6.42  
 Теннис, 1.78, 2.13  
 Теория катастроф, 6.98  
 Тепла острова, 4.85  
 Тепловые трубки, 4.64  
 Термоостаточный магнетизм (ТОМ), 5.39  
 Течение в Гибралтарском проливе, 2.146  
 Течение в Мессинском проливе, 2.146  
 Течение в Сицилийском (или Тунисском) проливе, 2.146  
 Тигры, рычание, 3.10  
 Тля, 2.94  
 Ток, воздействие на людей, 5.23  
 Токи наведенные 5.50  
 Толкание ядра, 1.162  
 Толсторогие (снежные) бараны, 1.10, 1.61  
 Томагавки, 1.29  
 Тонкая пленка, оптика, 6.114  
 Тоннели через центр Земли, 1.141  
 Тоннели, эффекты, связанные с давлением, 3.55, 4.72  
 Тоннель под Темзой, 4.72  
 Торможение автомобиля, 1.4–1.9, 1.152  
 Тормозной след, 1.8–1.9  
 Торнадо

зеленое небо, 6.12  
искрение, 5.29  
образование, 2.36, 2.37  
Травма шейных позвонков, 1.14  
Травяные пожары, 4.81  
Транспорт, движение, 1.2, 1.3  
Трещины во льду, синусоида, 4.20  
Трещины на грязи, 4.68  
Трещины, образование, 1.143  
Трибоэлектричество, 5.8  
Трубы, лопающиеся из-за льда, 4.25  
Трубы, падение, 1.69  
Туалетная бумага, отрыв, 1.92  
Туалеты, 2.41  
Туманная радуга, 6.127  
Туманные вихри, 2.39

**У**  
Ударные волны  
акустические, 1.87, 3.54–3.60  
«волны трафика», 1.3  
оптика, 6.100, 6.101  
Удары в американском бильярде, 1.74  
Узлы на веревке, 1.59  
Узоры Гласа, зрительные иллюзии, 7.29  
Узоры из случайных точек, 7.29, 7.30  
Узоры из тающего снега, 4.39  
Узоры на земле при замерзании, 4.29  
Узоры, индуцированные стробоскопом, 7.7  
Уличные фонари, освещение, 6.78  
Ультрафиолетовый свет, 6.154  
Уменьшение смачивающей способности, 2.84  
Усилители электрогитары, 5.45  
Ускорения, рекорды, 1.11  
Утки, гидрофобное оперение, 2.97

**Ф**  
Фата-моргана, 6.30  
Фейерверки, иллюзия, 7.49  
Фён, 4.87  
Фигурист, лед, 1.94  
Фигуры внутри кубиков льда, 4.22  
образование, 4.20, 4.21  
Фигуры дыхания, 2.92  
Фигуры Тиндаля, 4.22  
Фигуры Хладни, 2.141  
Фирновое зеркало, 6.54  
Флаги развевающиеся, 2.117  
Флай (высокий мяч), поймать, 1.21  
Флеттнера корабль, 2.145  
Фокусировка френелевская, на шаре, 6.151  
Фолклендские острова, битва, 1.135  
Фонтаны  
пульсирующие, 2.119  
развевающиеся, 2.118  
«Фосбери», прыжок, 1.38  
Фосфены, 7.7

Франклин, Бенджамин, 2.73, 3.43, 5.2, 7.7  
Фридайвинг, 2.54  
Фруктового сада полив, предотвращение замерзания, 4.15  
Фульгуриты, 5.4  
Футбол, 1.77, 1.128, 2.14

**Х**  
Хендрикс, Джими, 5.44, 5.45  
Хирургия, электрические эффекты, 5.8, 5.16, 5.25, 5.26, 5.31  
Холодная труба, лизание, 4.26  
Храп, 3.7  
Хруст суставов, 3.48  
Хула-хуп, 1.83

**Ц**  
Царапины на окне, оптика, 6.105, 6.106  
Царапины, оптика, 6.105  
Цвет кожи, изменение на холоде, 6.123  
Цвет мяса, 4.45, 6.135  
Цвета при свете люминесцентной лампы, 6.125  
Цветные кольца на зеркале, 6.110  
Цветы, обнаружение летучими мышами, 3.25  
Цепочка предметов, соударения, 1.42–1.44  
Цикады, звуки, 3.14  
Цирк, 1.20, 1.32, 1.97  
Циркуляция лэнгмюровская, 2.111, 2.137

**Ч**  
Чаинки, 2.25  
Чай, узоры в виде завитков, 2.90  
Человек-невидимка, 6.90  
Чемодан с маховиком, 1.104  
Черная одежда в пустыне, 4.59  
Черный бархат, оптика, 6.131  
Чертовое колесо, 1.19  
Четочная молния, 5.5  
Чеширского кота улыбка, 7.20  
«Чириос» эффект, 2.85  
Чирлидер, мегафон, 3.21  
Чихание, 3.60  
Чтение в темноте, 7.15  
Чтение через маленькие отверстия (пинхолы), 7.33

**Ш**  
Шампанское, 2.76, 4.72  
Шампунь отскакивающий, 2.60  
Шар в струе, 2.144  
Шаровая молния, 5.5  
Шелест на пшеничных полях, 3.75  
Шенди, 2.76  
Шепот, 3.22  
Шершень, смерть от пчел, 4.3  
Шинук, 4.87

Шины  
балансировка, 1.176  
визг, 3.42  
электропроводность, 5.9

Шум, потеря слуха, 3.30  
Шум, усиление звука, 3.31  
Шумные соседи, 3.68

**Э**  
Эдвард Мунк, 6.8  
Эзофагоскопия, 6.87  
Электризация, 5.5–5.15  
Электризация при контакте, 5.8–5.14  
Электрическая рыба, 5.28  
Электрогитара, 5.44  
Электроток, удар, 5.22–5.24  
Электроциты, 5.28  
Эльфы, 5.6  
Эмпайр-стейт-билдинг, таран, 1.54  
Эмульсии, 5.37  
Эолова арфа 3.2  
Эффект анисового ликера, оптика, 6.113  
Эффект Вайсенберга, 2.61  
Эффект Коанда, 2.50  
Эффект красных глаз на фотографиях, 7.17  
Эффект Лейденфроста, 4.6, 4.8, 5.30  
Эффект лотоса, 2.93  
Эффект Магнуса, 2.14–2.17  
Эффект Марангони, 2.88  
Эффект самоочищения, 2.93  
Эффект сосисочной тени, 6.99  
Эффект чайника, 2.51  
Эхо, 3.64–3.66

**Я**  
Яблоки, давление груди, 2.140  
Яблоки, узоры из пятнышек, 6.124  
Язык в бутылке, 4.73  
Яйца  
вращение, 1.106, 2.28,  
приготовление, 4.44, 4.50,  
стоящие вертикально, 1.137  
Ярд эля, 2.120  
Ярданги, 2.112  
Яркость облаков, 6.58, цвет, 6.6, 6.49, 6.144  
Ясная ночь, 6.148  
Ячейки Бенара, 2.90  
Ящерицы василиски шлемоносные, 2.42  
Ящерицы, бегающие по воде, 2.42  
Ящерицы, сбор дождевой воды, 2.82

**A–Z**  
Anableps anableps, зрение, 7.19  
g-LOC, 2.46

Самым маленьким  
Детское чтение  
Умные книжки  
Для школы  
Детское творчество  
Родителям  
KUMON



**МИФ**  
ДЕТСТВО

Все детские книги  
на одной странице:  
[mif.to/deti](https://mif.to/deti)

Подписывайтесь на полезную  
рассылку: книги, скидки и подарки  
[mif.to/d-letter](https://mif.to/d-letter)



#mifdetstvo



*Научно-популярное издание  
Для среднего и старшего школьного возраста*

**Джирл Уокер**  
**Новый физический фейерверк**  
Сборник качественных задач по физике

Шеф-редактор *Юлия Петропавловская*  
Арт-директор *Елизавета Краснова*  
Ответственные редакторы *Галина Филатова, Валерия Важнова*  
Литературный редактор *Алла Кузнецова*  
Дизайн обложки *Татьяна Уклейко*  
Верстка *Елена Бреге*  
Корректурa *Надежда Болотина, Олег Пономарев*

ООО «Манн, Иванов и Фербер»  
[mann-ivanov-ferber.ru](http://mann-ivanov-ferber.ru)  
[vk.com/mif.podrostki](https://vk.com/mif.podrostki)  
[facebook.com/mifbooks](https://facebook.com/mifbooks)  
[instagram.com/mifbooks](https://instagram.com/mifbooks)





## ФИЗИКА — ЭТО ВСЯ НАША ЖИЗНЬ

**Джирл Уокер** — ученый, влюбленный в физику. Чтобы увлечь своих студентов, он собрал коллекцию необычных задач. Так родился сборник «Физический фейерверк».

Эта книга объяснит, что такое физика на самом деле. Забудьте скучные задачи про системы блоков и поезда из точки А в точку Б. Здесь речь пойдет о повседневной жизни: пробки на дорогах, аттракционы в парке, растворимый чай и «волна» на футбольном стадионе.

Впервые книга была напечатана в 1975 году. С тех пор она продолжает меняться. Перед вами второе российское издание — «Новый физический фейерверк». Еще больше заданий, еще больше удивительных наблюдений, еще более глубокое погружение в тайны физики!

«В этой книге описаны реальные природные или экспериментальные ситуации. Рассматривая задачу, надо сначала понять, какие физические законы проявляются в данном случае и как именно они работают, то есть построить модель явления. Поэтому сейчас у вас в руках не очередной задачник, который сулит вам "сто баллов". У вас в руках способ понять, что такое физика и что она изучает».

**Леонид Ашкинази,**  
кандидат физико-математических наук,  
член Русского физического общества

издательство  
**МАНН, ИВАНОВ И ФЕРБЕР**

 [vk.com/mif.podrostki](https://vk.com/mif.podrostki)

 [instagram.com/mifbooks](https://instagram.com/mifbooks)

 [facebook.com/mifbooks](https://facebook.com/mifbooks)

ISBN 978-5-00146-185-2



9 785001 461852 >