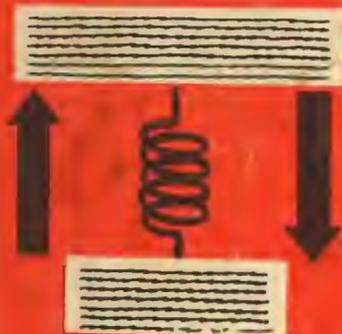




Е. А. БЕЗДЕНЕЖНЫХ, И. С. БРИКМАН

ФИЗИКА В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ И МЕДИЦИНЕ



51 коп.



Е. А. БЕЗДЕНЕЖНЫХ. И. С. БРИКМАН ФИЗИКА В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

Е. А. БЕЗДЕНЕЖНЫХ, И. С. БРИКМАН

ФИЗИКА В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ И МЕДИЦИНЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «РАДЯНСЬКА ШКОЛА»
КИЕВ — 1976



**Е. А. БЕЗДЕНЕЖНЫХ,
И. С. БРИКМАН**

В этой книге в соответствии с программой по физике средней общеобразовательной школы рассматриваются физические явления, встречающиеся в биологии, биологические явления, объясняемые физическими законами, использование законов физики в медицинской науке и в практике здравоохранения.

Книга написана для учащихся старших классов средних общеобразовательных школ, но будет полезна также учителям физики средних общеобразовательных школ для иллюстрации физических законов биологическими примерами, учителям биологии для связи преподавания биологии с физикой, учащимся и преподавателям физики средних медицинских учебных заведений, а также студентам первых курсов медицинских институтов и биологических факультетов университетов и педагогических институтов.

Рукопись рецензировали: Н. А. Понятенко — кандидат физ.-мат. наук, доцент; В. В. Пуклин — учитель физики СШ № 24 г. Киева.



Физика в живой природе и медицине



Б $\frac{70803-340}{M210(04)-76}$ 328—76

Художник В. Н. ИГНАТОВ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ДЛЯ ЧЕГО МЫ НАПИСАЛИ ЭТУ КНИГУ? 7

МЕХАНИКА В ПРИРОДЕ И МЕДИЦИНЕ .

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ ТКАНЕЙ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА 10

КОСТНАЯ ТКАНЬ 10

МЫШЕЧНАЯ ТКАНЬ 11

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЖИВОГО ОРГАНИЗМА 12

ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ ВЫПОЛНЯЮТ РАБОТУ 14

РАБОТА И МОЩНОСТЬ

ОРГАНИЗМОВ 14

ЭРГОМЕТРИЯ 16

РАБОТА СЕРДЦА 17

ГИДРОДИНАМИКА В БИОЛОГИИ И В ПРОСТЕЙШЕЙ МЕДИЦИНСКОЙ АППАРАТУРЕ 19

ГИДРОДИНАМИКА В МИРЕ ЖИВОТНЫХ 19

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ ДВИЖЕНИЯ КРОВИ В ОРГАНИЗМЕ 22

ДАВЛЕНИЕ КРОВИ И ЕГО ИЗМЕРЕНИЕ 24

ПРОСТЕЙШИЕ МЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ ПО ЗАКОНАМ ГИДРОДИНАМИКИ 25

ЗАКОН СТОКСА И РЕАКЦИЯ ОСЕДАНИЯ ЭРИТРОЦИТОВ (РОЭ) 28

НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОДИНАМИКИ 29

О ПЕРИОДИЧНОСТИ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДЕ 30

РЕГИСТРАЦИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ 31

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЧАСЫ 31

ЗВУК И СЛУХ 33

ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКОВ 34

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СЛУХА. ТЕОРИИ ВОСПРИЯТИЯ ЗВУКА 37

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТРОЕНИЯ ГОЛОСОВОГО

АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА

И ЖИВОТНЫХ 40

ЭХО В ЖИЗНИ ЖИВОТНЫХ 41

ЗВУКОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В КЛИНИКЕ 41

НЕСКОЛЬКО СЛОВ

О ШУМЕ 43

ВИБРАЦИИ И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА 46

О ВИБРАЦИЯХ 46
ЧТО ТАКОЕ ВИБРАЦИОННАЯ
БОЛЕЗНЬ? 46
ФИЗИКА ВИБРАЦИЙ 47
ВИБРАЦИИ И ГИГИЕНА
ТРУДА 51
ГОЛОС ТИШИНЫ (ГОВОРЯТ
ИНФРАЗВУКИ) 52

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА 53

МЕХАНИЧЕСКОЕ И ТЕПЛОВОЕ
ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА 53
УЛЬТРАЗВУК В ТЕРАПИИ 54
УЛЬТРАЗВУК В ХИРУРГИИ 56
УЛЬТРАЗВУК НА СЛУЖБЕ
ДИАГНОСТИКИ 57

ФИЗИКА И КОСМИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА 59

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПЕРЕГРУЗОК
И ИХ ДЕЙСТВИЕ НА ОРГА-
НИЗМ ЧЕЛОВЕКА 59
КОРОТКО О НЕВЕСО-
МОСТИ 63

ДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИЙ 63
ДЕЙСТВИЕ ШУМОВ 64
ВЛИЯНИЕ СНИЖЕНИЯ ВНЕШ-
НЕГО ДАВЛЕНИЯ 64
ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ И ЕЕ
УСТРАНЕНИЕ 65

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ И ДЫХАНИЕ 66

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ
И ДЫХАНИЕ ЧЕЛОВЕКА 66
ДЫХАНИЕ У НЕКОТОРЫХ
ЖИВОТНЫХ 71
ЗНАКОМЬТЕСЬ: ФИЗИЧЕСКИЕ
ЛЕГКИЕ 71

ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА 73

ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА
И САМОЧУВСТВИЕ ЧЕЛО-
ВЕКА 74

КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ЖИДКОСТИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ 75

ИХ ЖИЗНЬ СВЯЗАНА С ПО-
ВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ
ВОДЫ 75

ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ И
УДИВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА
ЖИДКОСТЕЙ 75
ГАЗОВАЯ ЭМБОЛИЯ 76
НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ КА-
ПИЛЛЯРНЫХ ЯВЛЕНИЙ
В ПРИРОДЕ 77

ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИ- НАМИКИ И ЖИВЫЕ ОРГА- НИЗМЫ 78

ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИ-
НАМИКИ 78
ЖИВОЙ МИР И ПЕРВОЕ НА-
ЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ 79
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ. ТЕПЛО-
ПРОВОДНОСТЬ БИОЛОГИЧЕ-
СКИХ ТКАНЕЙ 81
ФИЗИЧЕСКАЯ ТЕРМОРЕГУЛЯ-
ЦИЯ ОРГАНИЗМА 83
ТЕМПЕРАТУРА И ЖИВЫЕ ОР-
ГАНИЗМЫ 86
ТЕПЛОЛечение С ПОМОЩЬЮ
НАГРЕТЫХ СРЕД 87

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР В МЕДИЦИН- СКОЙ ПРАКТИКЕ 88

НЕМНОГО О ПОЛУЧЕНИИ
НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР 88
ОХЛАЖДЕНИЕ ЖИВЫХ ОРГА-
НИЗМОВ 90
ОХЛАЖДЕНИЕ ЧЕЛОВЕКА 90
ГИПОТЕРМ 91
ХОЛОД И ГЛАЗ 91

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО НА СЛУЖБЕ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА

ВВЕДЕНИЕ 93

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА И В МЕ- ДИЦИНСКОЙ ПРАКТИКЕ 93

БИОПОТЕНЦИАЛЫ 93
АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕ-
СТВО И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛО-
ВЕКА 95
АЭРОИОНЫ — ДРУЗЬЯ
И ВРАГИ ЧЕЛОВЕКА 96
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ — АР-
СЕНАЛ ВРАЧЕЙ 98

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕ- СКИЙ ТОК И ЕГО ДЕЙСТВИЕ НА ОРГАНИЗМ 100

ОТКРЫТИЕ ГАЛЬВАНИ 100
ЖИВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ 101
ОРГАНИЗМ РАССКАЗЫ-
ВАЕТ 103

ПОСТОЯННЫЙ ТОК —
ЛЕКАРЬ 107

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
КОЛЕБАНИЯ В МЕДИЦИНЕ 109

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТ-
НЫХ КОЛЕБАНИЙ 109
РАДИОВОЛНЫ В МЕДИ-
ЦИНЕ 114

ИМПУЛЬСНЫЕ ТОКИ В МЕДИ-
ЦИНСКОЙ ПРАКТИКЕ 118

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ 118

ПОЛУЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ
ТОКОВ 118

ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ
ДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ
ТОКОВ 119

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РОЛИ
СКАЛЬПЕЛЯ 121

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В БИОЛО-
ГИИ И МЕДИЦИНЕ

НЕМНОГО ИСТОРИИ 122
«СЕКРЕТ КОМПАСА» И ЖИВЫЕ

ОРГАНИЗМЫ 124

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

В БОТАНИКЕ 125

ЧЕЛОВЕК И ЕГО МАГНИТНОЕ
ПОЛЕ 126

КАКИЕ ЭРСТЕДЫ БЕЗ-
ВРЕДНЫ? 127

МАГНИТ ЛЕЧИТ 128

ОПТИКА В ПРИРОДЕ
И МЕДИЦИНЕ

СВЕТ И ГЛАЗ 129

КАК ЭТО НАЧИНАЛОСЬ? 129

У КОГО КАКИЕ ГЛАЗА? 130

ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКИЙ

ПРИБОР 132

ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

ГЛАЗА 135

ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ ТЕОРИЯ
ЦВЕТНОГО ЗРЕНИЯ 138

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА
В МЕДИЦИНСКИХ ПРИБО-
РАХ 140

ОЧКИ — ПРОСТЕЙШИЙ МЕДИ-
ЦИНСКИЙ ПРИБОР 141

ОТ ПРОСТОГО МИКРОСКОПА
К СПЕЦИАЛЬНЫМ ВИДАМ

МИКРОСКОПИИ 143

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИЕМЫ

МИКРОСКОПИИ 147

ЯСНОВИДЯЩИЕ ПРИБОРЫ 149

СФЕРИЧЕСКИЕ ЗЕРКАЛА .
В АРСЕНАЛЕ МЕДИКОВ 151

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ
И ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ
В МЕДИЦИНЕ 153

ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ
ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ 153

ТЕПЛОВИЗОР 154

УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ

ЛУЧИ 157

УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЙ

СКАЛЬПЕЛЬ 159

ДОЗИМЕТРИЯ УЛЬТРАФИОЛЕ-
ТОВОГО И ИНФРАКРАСНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ 160

ЛАЗЕРЫ — ПОМОЩНИКИ
ВРАЧЕЙ 161

ПОЧЕМУ ЛАЗЕРЫ ЛУЧШЕ
ЛИНЗ И ЗЕРКАЛ? 161

СНАЧАЛА О СОДЕРЖА-
НИИ 162

ТЕПЕРЬ О ФОРМЕ 163

И, НАКОНЕЦ, О ПРИМЕНЕ-
НИИ 164

РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ
ИССЛЕДУЮТ И ЛЕЧАТ 166
ИЗ ИСТОРИИ ЗАМЕЧАТЕЛЬНО-
ГО ОТКРЫТИЯ 166

ВОЗБУЖДЕНИЕ РЕНТГЕНОВ-
СКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 167

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕНТГЕНОВ-
СКИХ ЛУЧЕЙ 169

СВОЙСТВА РЕНТГЕНОВСКИХ
ЛУЧЕЙ 170

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ

РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ 171

РЕНТГЕНОСКОПИЯ И РЕНТГЕ-
НОГРАФИЯ 172

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗА-
ЛЕГАНИЯ ИНОРОДНОГО

ТЕЛА 173

ПЕРСПЕКТИВЫ РЕНТГЕНОГРА-
ФИИ 174

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ
ИОНИЗИРУЮЩИХ
ИЗЛУЧЕНИЙ

РАДИАЦИЯ — ДОБРО
И ЗЛО 176

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОАК-
ТИВНЫХ ИЗОТОПОВ ДЛЯ
ДИАГНОСТИКИ, ЛЕЧЕНИЯ
И ИССЛЕДОВАНИЙ 176

МЕЧЕННЫЕ АТОМЫ 178

СКОЛЬКО КРОВИ В ЧЕЛО-
ВЕКЕ? 181

ОРГАНЫ — КОЛЛЕКЦИОНЕРЫ 182
«БЕСКРОВНАЯ ХИРУРГИЯ» 183

**РАДИАЦИОННЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ
СОЛНЦА И КОСМИЧЕСКИЕ
ИЗЛУЧЕНИЯ 187**

ЗЕМЛЯ ПОДВЕРГАЕТСЯ
ДЕЙСТВИЮ РАДИАЦИОННЫХ
ИЗЛУЧЕНИЙ 187
ЭНЕРГИЯ СОЛНЦА И ПОЯВ-
ЛЕНИЕ ЖИЗНИ НА ЗЕМЛЕ 187
СОЛНЦЕ И ЖИВЫЕ ОРГА-
НИЗМЫ 188

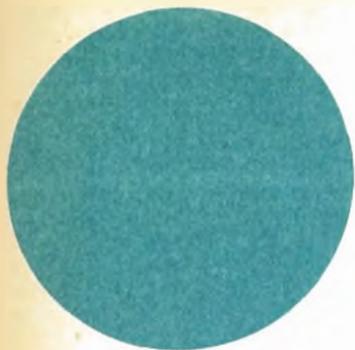
**МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИ-
ЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**ПАТЕНТНОЕ БЮРО
ПРИРОДЫ 190**

КЛАДОВАЯ МУДРОСТИ —
ПРИРОДА 190
ДЕНЬ РОЖДЕНИЯ БИО-
НИКИ 190
МЕРТВЫЕ МОДЕЛИ ЖИВЫХ
ПРОЦЕССОВ 191
КАК ЧЕЛОВЕК «ИЗОБРЕТАЛ
ВЕЛОСИПЕД» 192
ПАТЕНТЫ, ПОДАРЕННЫЕ
ПРИРОДОЙ 194
ЧТО ЖЕ ДАЛЬШЕ! 199

ПРЕДИСЛОВИЕ





ДЛЯ ЧЕГО МЫ НАПИСАЛИ ЭТУ КНИГУ!

Эта книга — не учебник. Это книга для чтения. Ее не обязательно читать с начала. Можно прочесть прежде то, что заинтересовало при беглом просмотре ее страниц или оглавления. Если после этого у вас появится желание прочесть всю книгу, значит, мы не зря потрудились.

Для понимания этой книги нужны некоторые знания по физике. Как же быть, если что-то забыто или еще не изучено? Для этого придется заглянуть в учебник по физике. Это не так уж и плохо. Это даже очень хорошо! К тем разделам, которые окажутся трудными, можно вернуться после того, как соответствующий материал будет изучен на уроках физики.

Эта книга написана для учащихся старших классов. Как правило, приязанности старшеклассников к тем или иным наукам уже определены. Определены и физики, и лирики.

Те, кому физика и математика не очень нравятся, обычно решают, что их жизненный путь не лежит через технический вуз, и хорошо бы им стать медиками. Другие же, которые к этому времени подружился с физикой и математикой, полагают, что им не следует быть медиками, что биологические специальности не дадут возможности раскрыться их способностям. Знакомство с этой книгой покажет, как глубоко ошибаются и те и другие. Они поймут: чтобы быть хорошим врачом (вообще биологом), нужно подружиться с физикой еще в школе; а если такая дружба уже

состоялась, то в медицинской профессии можно найти массу увлекательных дел. Одно из них может стать делом всей вашей жизни. Мы в этом уверены. Если бы не было такой уверенности, не было бы и этой книги. Если вы ее прочтете, мы надеемся, что книга в какой-то мере поможет вам в выборе специальности.

Физика и биология дружат давно. Дружба эта чрезвычайно плодотворна: в результате ее возникла новая наука — би о ф и з и к а. Некоторые вопросы биофизики рассматриваются в этой книге. Биология дает много примеров столь удачных решений сложных задач, что техника решила использовать патентное бюро природы, и это вызвало к жизни еще одну науку — б и о н и к у. Некоторые вопросы бионики мы также рассматриваем в этой книге.

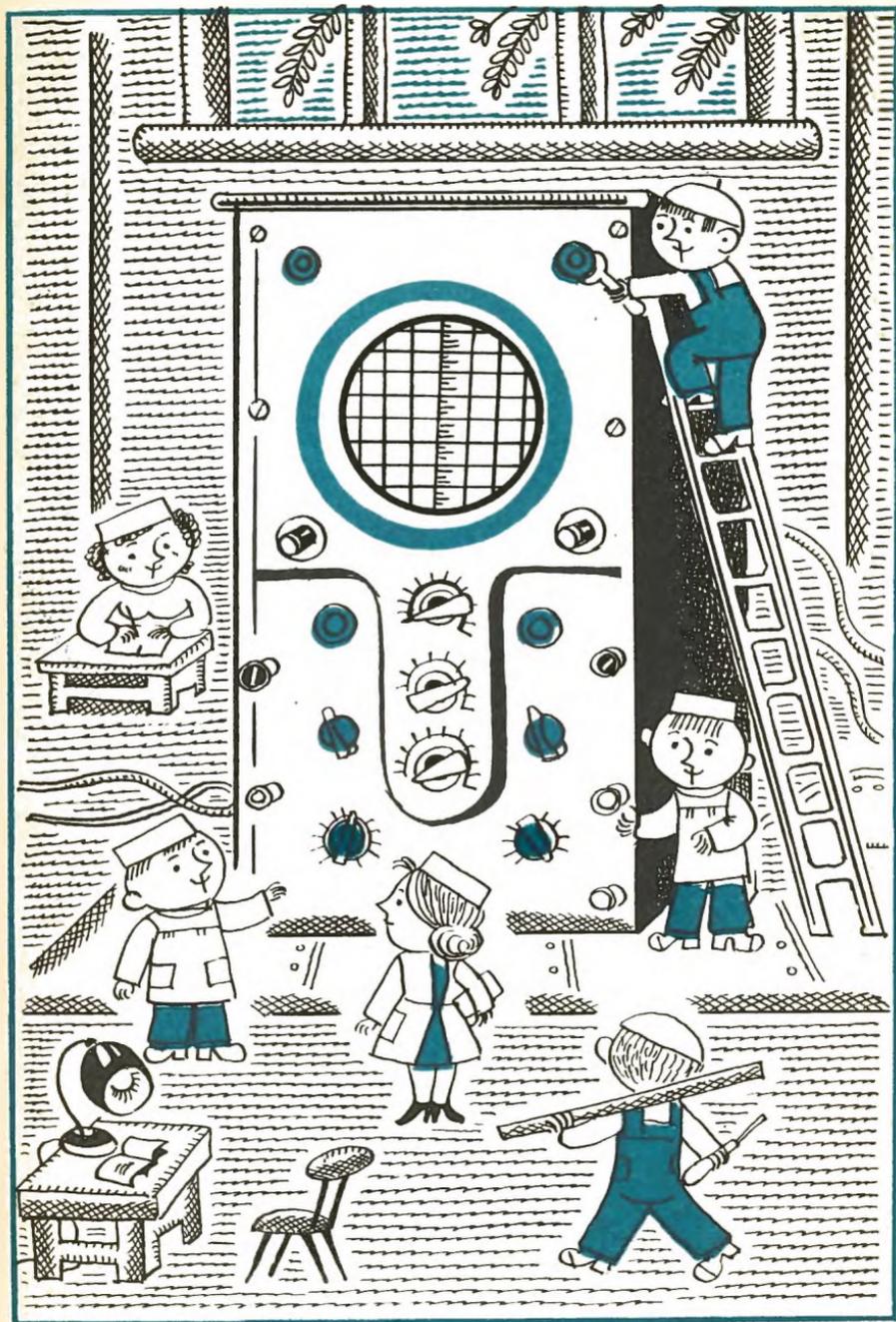
Физика давно и верно служит медицине. Можно ли представить себе медицину без микроскопа? Микроскоп явился причиной возникновения многих медицинских наук — вирусологии, микробиологии, элидемиологии... А что было бы без микроскопа с такими отраслями медицины, как хирургия (в связи с появлением асептики и антисептики), гистология, патологическая анатомия и многими другими? И какие только микроскопы не использует теперь медицина! Оптические, ультрафиолетовые, фазоконтрастные, интерференционные, поляризационные, электронные, ионные...

Физика дала медицине рентгеновские лучи, роль которых в диагностике и лечении общеизвестна. Теперь широко распространена такая медицинская специальность, как рентгенолог. Что он без знания физики? Ремесленник! Открытие ядерных излучений в физике привело к возникновению в медицине еще одной новой специальности — радиолога. Это очень важная, очень нужная и очень тонкая медицинская специальность. Однако радиолог должен быть и врачом, и физиком. Совсем недавно получили луч лазера, а сегодня он уже лечит больных. Кибернетика, электронные вычислительные машины — все эти и другие последние достижения физики уже внедряются в медицинскую науку и практику. Создана космическая медицина, и за состоянием здоровья космонавта теперь наблюдают с Земли. Это опять новая область — биотелеметрия. Все это невозможно осмыслить без достаточных знаний по физике и математике. Сейчас можно с уверенностью сказать: нет таких разделов медицины, которые обходились бы без физики и техники в самом широком смысле. Современная операционная, реанимационное отделение скорее напоминают крупные физические лабори-

тории, чем медицинские учреждения. С такой же уверенностью можно сказать, что нет ни одного существенного открытия в физике, которое не нашло бы себе применения в медицине.

В этой небольшой книге на отдельных примерах мы постараемся показать ту большую роль, которую играет физика в развитии биологии и медицины, и как биология, в свою очередь, влияет на развитие техники. Тема очень широкая, полностью осветить ее в небольшой книге невозможно. Наша задача — показать эту проблему на отдельных примерах. Таких примеров в книге очень много, они часто не связаны друг с другом, их объединяет общая идея, сущность которой отражена в названии книги.

Пусть вас не смущает отсутствие единого подхода в раскрытии различных вопросов (кое-где описано явление, иногда только его применение, нередко мы ограничиваемся описанием прибора и т. д.). Наша задача — привлечь ваше внимание к рассматриваемой проблеме. Например, мы хотим ознакомить вас с рентгенотерапией и рентгенографией и отводим для этого одну страничку. А ведь по этим вопросам написаны многие тома книг. Они ждут вас.



МЕХАНИКА В ПРИРОДЕ И МЕДИЦИНЕ

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ ТКАНЕЙ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА

Костная ткань

В 1889 году в Париже открывалась Всемирная выставка. К ее открытию инженер Эйфель спешил закончить строительство башни, которая стала символом Парижа. Однако конструкция Эйфеля не была новой. Патент принадлежал природе. Готовая конструкция была заключена в трубчатых костях бедра и голени. Оказывается, профиль башни полностью совпадает с сечением трубчатых костей. Даже углы между ее несущими поверхностями точно такие же, как углы между костными перекладинами в костном трубчатом веществе.

Природой давно «изобретены» конструкции, обеспечивающие прочность при малом весе: трубчатые и тавровые сечения костей животных, трубчатое строение многих растений: пшеницы, бамбука и др. (рис. 2). Нейтральный слой детали, работающей на изгиб, никаких деформаций не испытывает и, следовательно, никаких нагрузок не несет. Трубчатые кости — пример уменьшения веса конструкции, экономии материала без ущерба для их механических качеств.

У человека и животных механическая прочность тела обеспечивается опорно-двигательным аппаратом, состоящим из скелета и целой группы мышц. Назначение его — обеспечивать механическую прочность организма и создавать основу для сложных движений.

В организме человека насчитывается более двухсот костей, различных по строению и назначению. В зависимости от функции, которую они выполняют, кости обладают различным запасом прочности. Благодаря трубчатому строению, кости способны выдерживать колоссальные нагрузки. Так, бедренная кость (основа нижней конечности), поставленная вертикально, выдерживает нагрузку 15 кн, а большеберцовая — 1,6—1,8 тонн. Такие нагрузки в 25—30 раз превышают вес тела (рис. 3). Прочность кости на растяжение больше, чем у древесины дуба и сосны (вдоль волокон), в 9 раз превосходит прочность свинца и почти равна прочности чугуна!

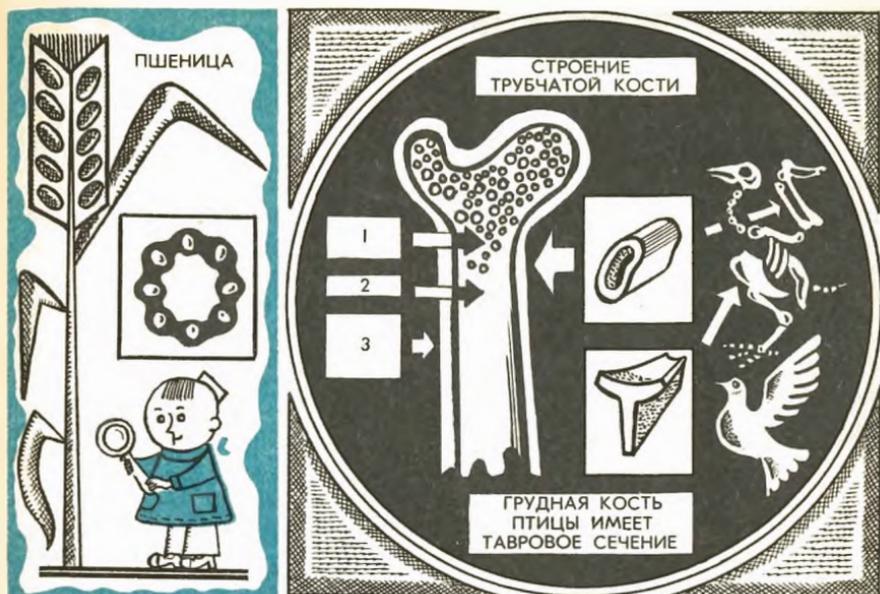


Рис. 2. Тавровые и трубчатые кости:
 1 — губчатое вещество; 2 — полость;
 3 — плотное вещество кости.

При выполнении разнообразных движений человеком его мышцы и элементы скелета подвергаются различного рода деформациям: сжатию, растяжению, изгибу. Они возникают под действием собственной силы тяжести или внешних нагрузок. Кости позвоночного столба, таза и нижних конечностей в основном подвергаются деформации сжатия и изгиба, а кости верхних конечностей, связки, сухожилия и мышцы — деформации растяжения.

Мышечная ткань

Не менее удивительны свойства мышц. В теле человека насчитывается около 600 мышц, а вместе они составляют до 40% массы человека. Мышечная ткань обладает свойствами сокращаться и растягиваться. Ей присуща также эластичность, способность восстанавливать свою первоначальную форму после прекращения действия сил, вызывающих ее деформацию. Эластичность мышц выше, чем у некоторых сортов резины.

У мышцы сравнительно небольшая тяга производит относительно большое удлинение, после чего мышца полностью возвра-

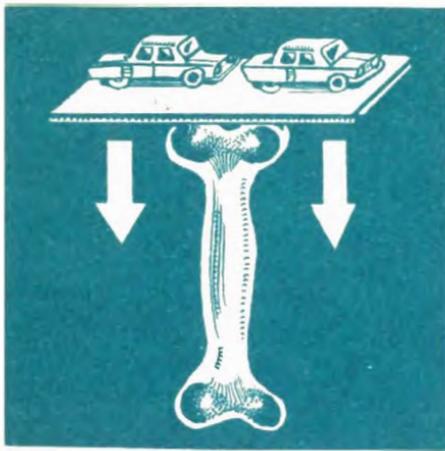


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая прочность бедренной кости.

ны мышцы зависит амплитуда ее сокращения, а от толщины пучков — сила ее сокращения. В старческом возрасте толщина мышечных пучков уменьшается, сила их падает. Однако если человек активен, много ходит, занимается физическим трудом, атрофия мышц замедляется.

Академик А. И. Берг отметил, что в середине XIX века из всей энергии, производимой и потребляемой на Земле, 94% приходилось на мускульную силу человека и домашних животных и лишь 6% энергии вырабатывали водяные колеса, ветряные мельницы и небольшое количество паровых машин. В наше время лишь 1% энергии производится мускульной силой. Значит, сейчас миллионы людей испытывают «мускульный голод». Эта проблема, связанная с «мышечным голодом», становится значительной медицинской задачей, так как она определяет состояние здоровья человека. Вялость мышц ослабляет организм человека, приводит к ряду заболеваний, сокращает срок его жизни. Основные направления в решении этой проблемы — нагрузки мышц с помощью занятий физической культурой и спортом.

Механические возможности живого организма

Все мы с большим увлечением совершали путешествие в страну лилипутов и великанов, куда в детстве водил нас Джонатан Свифт. В этих удивительных странах все было, как в нашем мире, только размеры всего живого и неживого были в 12 раз меньше или больше, чем у нас. Быть может, Джонатан Свифт

не написал бы этой замечательной сказки, если бы прочитал у Галилея такое:

«Если бы кто-нибудь пожелал сохранить в громадном великане те же пропорции конечностей, что и у обычного человека, то он должен был бы или подыскать более твердый и более прочный материал для костей, или согласиться на меньшую крепость великана по сравнению с человеком среднего роста; если великан был бы необыкновенно большой высоты, то он бы упал и был раздавлен своей собственной тяжестью. Если уменьшить размеры тела, то его прочность не будет уменьшаться в том же отношении: оказывается, что чем меньше размер тела, тем больше его относительная прочность. Поэтому маленькая собачка, вероятно, могла бы выдержать на своей спине двух или даже трех таких же собачек, однако я думаю, что лошадь не смогла бы выдержать на себе другую лошадь таких же размеров».

Как хорошо, что Свифт не прочитал этого отрывка и описал чудесное путешествие Гулливера по Лилипутии и Бробдингнегу.

Галилей был прав — ни лилипуты, ни бробдингнеги на самом деле существовать не могли. Дело в том, что вес тела пропорционален его объему, а прочность пропорциональна площади несущих конструкций, поддерживающих тело человека или животного. Если великан в 12 раз больше обычного человека, то прочность его опорно-двигательного аппарата должна быть в $12^2=144$ раза больше, а вес увеличится в $12^3=1728$ раз. Таким образом, у великана отношение прочности к объему будет в 12 раз меньше, чем у обычного человека, т. е. этой прочности будет недостаточно для удержания веса тела.

Можно убедиться в правоте Галилея, если сравнить животных, близких по строению, но разных по размеру, например, сравнить берцовые кости изящной газели и бизона. Оказывается, что эти кости геометрически не подобны — кость большого животного значительно толще, чем ей полагалось бы быть по геометрическому подобию.

Слон — велик, его конечности толсты и массивны. Кости же кита, который весит в 40 раз больше слона, тоньше — их прочность оказывается достаточной, так как кит живет в воде. На суше ребра кита сломались бы, не выдержав веса тела.

Механические возможности живого организма ограничены прочностью его конструкции и весом тела.

Существует однако еще более важное влияние размеров живых организмов на условия их жизни, например теплообмен. О влиянии теплообмена на размеры животных мы будем говорить несколько позже, при рассмотрении I начала термодинамики применительно к живым организмам (стр. 80).

ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ ВЫПОЛНЯЮТ РАБОТУ

Работа и мощность организмов

Живые организмы способны выполнять значительную работу. Издавна люди использовали мускульную силу животных. Сила мышц животных и человека довольно велика.

Об огромных возможностях мышц свидетельствуют такие примеры.

Спортсмен может бежать со скоростью 15—18 км/час в течение 1—2 часов. При езде на велосипеде человек за минуту выполняет работу, равную 12 000 дж на протяжении многих часов. Леонид Жаботинский штангу массой 217,5 кг поднял за 1 сек на высоту 2 м, совершив при этом работу, равную примерно 4350 дж, т. е. развил мощность около 4350 вт. Это можно сравнить с мощностью малолитражного автомобиля.

При обыкновенной ходьбе по ровному месту, при каждом двойном шаге, человек массой 65 кг выполняет следующую работу:

Занесение вперед свободной ноги	2,8 дж
Горизонтальное перемещение центра тяжести	18,12 дж
Вертикальное перемещение центра тяжести	39,52 дж
Всего	60,44 дж

Как видно из приведенных данных, самой большой затраты работы требует вертикальное перемещение центра тяжести. Освобождение энергии при опускании центра тяжести практически не используется и приводит в большинстве случаев только к выделению тепла. Исследования физиолога А. А. Ухтомского показали, что работа, выполняемая организмом при ходьбе, не изменятся, если человек делает от 110 до 150 шагов в минуту, а при повышении скорости быстро возрастает и при 180 шагах в минуту оказывается большей, чем при беге в 210—220 шагов в минуту. Таким образом, медленный бег энергетически более выгоден, чем быстрая ходьба.

Верхний предел мощности человеческого организма обусловлен следующими соображениями. Любая мышца действует с ограниченной величиной силы, зависящей от ее поперечного размера. Кроме того, скорость сокращения тоже ограничена рядом физиологических особенностей. Ограничения в силе и времени накладываются и на мощность. Необходимо отметить, что энергия мышц может быть аккумулирована, «накоплена», и за счет запасенной энергии мышца способна развивать значительные усилия. Так, мы размахиваемся перед ударом или разбегаемся перед прыжком.

До сих пор мы говорили только о силе и времени. Теперь уместно напомнить, что в формулу мощности, кроме силы и времени, входит еще и расстояние (путь), на котором действует сила. Чем этот путь больше, тем меньше сила, действующая при одной и той же мощности. Поэтому, чем меньше упругие

перемещения, тем больше сила, действующая на тело. Это обстоятельство объясняет многие биологические и физиологические закономерности в природе. Ударные орудия животных (копыта, бивни, рога), как правило, обладают высокой твердостью. Удар по твердым частям тела (череп, суставы) значительно болезненнее, чем по мягким тканям. Удлинение пути торможения ослабляет силу удара — сгибание ног при приземлении после прыжка, упругий волосаянй покров на подошвах прыгательных конечностей животных и т. д.

Укажем далее на биологическое значение распределения энергии между взаимодействующими телами. На основании закона сохранения количества движения и формулы кинетической энергии можно показать, что не только скорости, но и приобретенные энергии обратно пропорциональны массам взаимодействующих тел. Поэтому при ходьбе затрачиваемая человеком энергия практически полностью расходуется на перемещение тела (опорная масса — земля — очень велика, и, следовательно, приобретенная ею скорость, а значит и энергия, практически равна нулю). Иначе обстоит дело, если человек плавает: движения рук и ног смещают назад несколько десятков килограммов воды; на это расходуется приблизительно столько же энергии, сколько на сообщение скорости самому пловцу. Еще менее выгодно используется энергия при полете — здесь опорное тело обладает совсем малой массой.

Интересно, что в одних и тех же условиях человеческий организм может работать с различными коэффициентами полезного действия: чем больше масса груза, поднимаемого человеком (предполагается, что человек поднимается вместе с грузом, неся его на себе), по сравнению с массой человека, тем выше к. п. д. Так, если человек массой 64 кг поднимает на некоторую высоту h груз массой 24 кг, то к. п. д. будет равен

$$\eta = \frac{24h}{(64+24)h} \approx 28\%;$$

если поднимаемый груз равен 12 кг, то к. п. д.

$$\eta = \frac{12h}{(64+12)h} \approx 16\%;$$

наконец, если груз равен 1 кг, то

$$\eta = \frac{1 \cdot h}{(64+1)h} \approx 1,5\%.$$

Следовательно, чем меньше масса полезного груза по сравнению с массой тела, тем меньше коэффициент использования энергии организма.

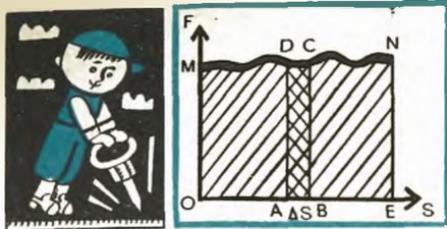


Рис. 4. График действия силы.

Мощность, развиваемая живыми организмами, может изменяться в весьма широких пределах. Рыбы и водные млекопитающие экономно расходуют энергию. Так, например, кит длиной 27 м и массой 122 000 кг при плавании под водой со скоростью 8,5 км/час развивает мощность всего около 5 квт, а при скорости 17 км/час — около 40 квт. Вследствие столь экономной затраты энергии киты могут до 30 минут плавать под водой, не пополняя запаса кислорода.

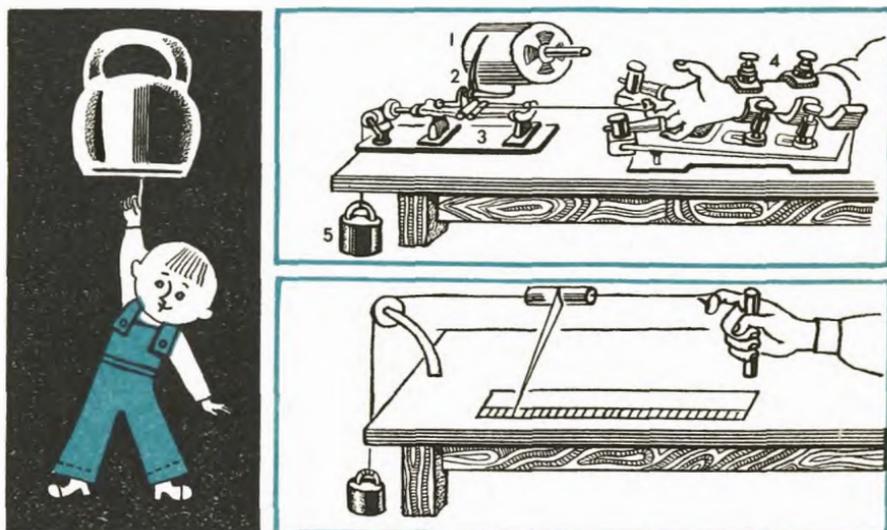
Эргометрия

Все энергетические исследования в биомеханике требуют, разумеется, измерений силы и работы. Для этой цели врачи пользуются приборами, получившими название соответственно динамометров и эргометров.

Динамометры, применяемые в медицине, хорошо всем известны, они описаны в школьных учебниках.

Для измерения работы, выполняемой органом, используют ме-

Рис. 5. Эргограф (для указательного пальца).



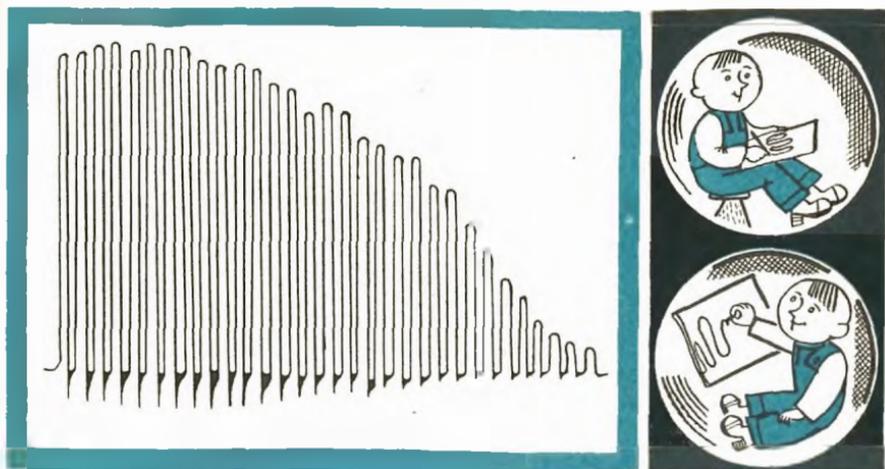


Рис. 6. Эргограмма.

тод, который называется эргометрией. Сущность этого метода состоит в том, что записывается график MN действия силы (рис. 4). На этом графике работа за какое-то время Δt характеризуется площадью четырехугольника $ABCD$, так как $A = Fs$ или $\Delta A = F\Delta s$. Чтобы определить работу на пути OE , надо измерить площадь фигуры $OMNE$.

Эргометры бывают различных конструкций. На рис. 5 показан простейший эргометр, с помощью которого записывается эргограмма (рис. 6) работы указательного пальца. Зажимами 4 рука закрепляется на столе. Палец с помощью тяги и направляющего устройства 3 поднимает груз 5. Конец писчика 2 скользит по бумаге, закрепленной на поверхности барабана кимографа 1. Внизу на рис. 5 показана упрощенная схема прибора. Площадь заштрихованной части эргограммы (рис. 6) характеризует выполненную при этом работу (хорошо видно, как она убывает со временем). Эта методика достаточно удобна и широко используется при физиологических исследованиях.

Работа сердца

Особое внимание хочется уделить работе и мощности сердца. У животных частота ударов сердца обратно пропорциональна их массе. Чем животное меньше, тем сердце у него бьется быстрее. У кита, например, при массе тела 150 т сердце делает 7 сокращений в минуту, у слона (масса 3 т) — 46, у кошки (масса 1,3 кг) — 240, а у синицы московки (масса 8 г) — 1200.

Чем же объяснить, что сердце может работать в таком темпе? Прежде всего сердечная мышца «отдыхает». В норме сердце человека делает 70—75 сокращений в минуту. Сокращение сердца человека длится 0,49 сек, а после каждого сокращения 0,31 сек длится пауза. Кроме того, чтобы справиться со своей колоссальной нагрузкой, сердце должно хорошо питаться, получать достаточное количество кислорода. Поэтому у высших животных сердце имеет свою мощную кровеносную систему.

Кровь человеческого организма совершает полный круг за 20 сек, делая за сутки свыше 3700 оборотов. У человека общая протяженность сосудов — 100 000 км. 7—8 л крови для их заполнения явно недостаточно, интенсивно снабжаются только усиленно работающие органы. Поэтому одновременная напряженная работа многих систем невозможна.

После приема пищи наиболее энергично функционируют органы пищеварения, к ним и направляется значительная часть крови; для нормальной работы головного мозга ее не хватает, и человек испытывает сонливость.

Чтобы протолкнуть кровь через капилляры и мельчайшие артериолы, нужна немалая сила. Хотя по мере разветвления артерий их общая суммарная площадь сечения возрастает, становясь в конечном итоге в 800 раз больше сечения аорты, по которой кровь вытекает из сердца, сопротивление от этого только увеличивается. Ведь у человека 100—160 миллиардов капилляров, а их общая длина порядка 60—80 тысяч километров!

Известный русский физиолог И. Ф. Цион подсчитал, что в течение человеческой жизни сердце успевает совершить работу, равную усилию, которого было бы достаточно, чтобы на высочайшую вершину Европы Монблан (высота 4810 м) поднять железнодорожный состав.

За каждое сокращение сердце человека выбрасывает в аорту от 60 до 80 мл крови, а при усиленной работе — до 200 мл, т. е. около стакана крови. В состоянии покоя сердце человека за 1 мин перекачивает 6 л крови, за 1 год — 3 миллиона литров (1400 автоцистерн потребовалось бы для перевозки такого объема жидкости). В течение жизни через наше сердце пройдет 150—250 тысяч тонн крови! И это в состоянии покоя.

При беге на средние дистанции к мышцам должно притекать в 10—20 раз больше крови. За 1 мин сердцу приходится «перекачивать» до 35—40 л, т. е. приблизительно 3—4 ведра! Завидная работоспособность!

ГИДРОДИНАМИКА В БИОЛОГИИ И В ПРОСТЕЙШЕЙ МЕДИЦИНСКОЙ АППАРАТУРЕ

Чтобы помочь читателям лучше разобраться в предлагаемом материале, напомним некоторые положения гидродинамики.

1. Уравнение неразрывности струи:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2, \text{ или } \frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Если жидкость движется по системе трубок различного сечения, то скорость ее движения обратно пропорциональна площади сечения трубы (рис. 7).

2. Давление, оказываемое движущейся жидкостью, обратно пропорционально скорости ее движения. Эта зависимость является следствием уравнения Бернулли, которое математически выражается так:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const},$$

где ρ — плотность жидкости, v — скорость движения жидкости, p — гидростатическое давление.

Гидродинамика в мире животных

Природа часто стремится навязать любому органу дополнительные, не свойственные ему функции. Как ни специфичны задачи сердечно-сосудистой системы, даже она не избежала этой участи: уж слишком заманчиво было использовать давление, существующее внутри кровеносной системы.

Рис. 7. Движение жидкости в трубке с переменным сечением.

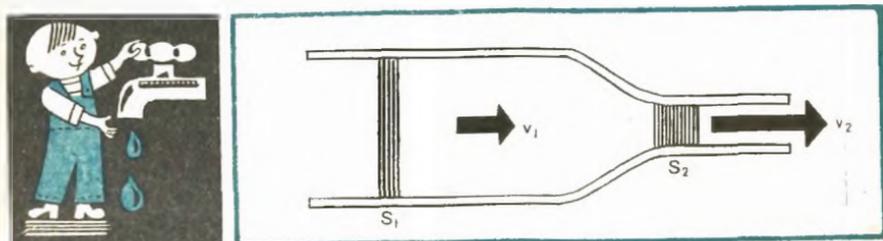




Рис. 8. Жабовидная ящерица повергает в бегство своих врагов.

Известно, что значительное повышение кровяного давления (гипертония) очень опасно для организма, так как может вызвать разрушение системы, разрывы кровеносных сосудов. Кровь при этом изливается в какой-либо орган. Это угрожает здоровью и даже жизни человека. Некоторые же животные приспособились вызывать гипертонию в своих интересах.

Жабовидная ящерица, обитающая в мексиканских пустынях, использует местную гипертонию в сосудах головы для обороны. Кровь, заполняя под большим, чем обычно, давлением гребни, шипы и иные выросты на голове и других частях тела, заставляет их увеличиваться в размерах, выпрямляться, менять окраску и тем самым придает животному устрашающий вид. Более того, в минуту особой опасности специальный мускул зажимает один из кровеносных сосудов, что приводит к резкому повышению давления в кровеносных сосудах головы. При этом мелкие сосудики в мигательной перепонке глаз не выдерживают и лопаются — кровь выбрызгивается из глаз навстречу врагу. Это оружие действует в радиусе примерно 1,5 м. Устрашающий вид и неожиданный душ часто обращают в бегство грозных врагов (рис. 8).

Повышение давления с помощью запирающего мускула способствует линьке. Рептилии растут всю жизнь. Постепенно одежда становится тесной для них и возникает необходимость в ежегодной смене ее. Когда приходит время сбросить старую кожу, запирающий мускул зажимает кровеносные сосуды, идущие от головы. Давление в сосудах головы повышается, все кровеносные сосуды переполняются кровью и голова раздувается до тех пор, пока старая кожа на ней не лопнет. Ящерица выползает из своей старой шкуры через образовавшееся отверстие, как из ворота комбинезона.

При увеличении давления крови в полостях и межтканевых пространствах значительно повышается механическая прочность тканей. Это привело к созданию очень удобного гидростатиче-

ского скелета: он может создаваться только на тот период, когда нужен. (Человек стал использовать аналогичные конструкции в технике лишь в XX веке). Такой скелет для животных очень удобен: он создается на тот период, когда нужен, а когда потребность в нем исчезает, давление в системе понижается и от скелета не остается и следа. Природа пронесла это гидродинамическое устройство через всю эволюцию животного мира — от самых примитивных существ до человека включительно.

Гидродинамические устройства используются и для выполнения двигательных функций. Например, такие устройства имеются в конечностях пауков. Сгибание конечностей у этих восьминогих существ, каждая лапка которых состоит из 6—7 члеников, происходит за счет сокращения специальных мышц, а разгибание — за счет повышения давления жидкости внутри конечностей.

Большое значение имеют гидродинамические устройства у ряда животных для рытья нор. Так, земляной червь при рытье норы во влажной земле максимально сокращает кольцевую мускулатуру своего переднего головного конца, превращая его почти в острое тело, и ищет малейшую щель между частицами земли. Если это не удается, червь начинает забивать в землю передний свой конец, ударяя по нему изнутри глоткой, которая приводится в движение с помощью гидродинамического устройства. Повышение давления на 0,9 мм рт. ст. позволяет наносить удары с силой 0,085 н. Внедрившись хоть немного в землю, червь повышает давление в самой передней части тела, расширяя ее, а вместе с ней и проделанное отверстие. Еще энергичнее действуют сипункулиды, доводящие при рытье нор давление до 52 мм рт. ст.

К числу достаточно совершенных гидродинамических устройств относится двигательный аппарат иглокожих, который особенно хорошо развит у морских звезд и ежей, офиур и многих голотурий. Лучи морских звезд пронизаны симметрично расположенными лучевыми каналами, наполненными водянистой жидкостью. Веточки, отходящие от каналов, проникают в каждую из крохотных мускульных ножек, расположенных в нижней, ротовой, стороне лучей. Жидкость нагнетается в ножки, которые при этом сильно набухают, вытягиваются вперед по направлению движения и с помощью присосок прикрепляются к грунту, после чего мускулатура ножек сокращается, выталкивая жидкость из каналов и подтягивая звезду вперед.

Мы рассмотрели только некоторые примеры гидродинамики в мире животных. Те читатели, которые увлекаются биологией, могут значительно увеличить их число.

**Физические закономерности, лежащие
в основе движения крови в организме**

На 18-й день жизни в крохотном, не больше горошины, комочке клеток — человеческом зародыше — начинает биться сердце, заставляя кровь приносить питательные вещества к самым отдаленным клеткам организма.

Кровеносная система человека — это сложная замкнутая система эластичных трубок различного диаметра (аорта, артерии, артериолы, капилляры, вены, вены).

От сердца кровь движется вначале по аорте — эластичной, из мышечной ткани трубке диаметром 2—3 см. Чем дальше от сердца, тем больше разветвляются сосуды, отсылая во все органы свои разветвления — артерии. Диаметр артерий уменьшается по мере отдаления от сердца. Врезаясь в ткани органов, артерии разветвляются и превращаются в мельчайшие сосуды — артериолы. На этом дробление сосудов, несущих кровь, не заканчивается: артериолы дают начало бесчисленным волосным сосудикам — капиллярам. Стенка капилляра имеет особое устройство и напоминает ситечко. В отверстие между клетками, которые лежат в один слой, свободно проходят из капилляра в ткани кислород и питательные вещества. Капилляры нигде не заканчиваются, не обрываются, а постепенно увеличивая свой диаметр, превращаются в вены. Вены соединяются в вены, которые несут кровь в сердце. Круг замыкается. К месту старта кровь возвращается в среднем через 20 сек. За рабочие сутки сердце развивает мощность в 27 лошадиных сил, перегоняя по сосудам до 10 000 л крови. (О работе сердца мы рассказали в конце предыдущего раздела).

Кровь в артериях за 1 сек «пробегает» полметра, в венах — 10—20 см, в капиллярах — 0,05—0,1 см. Приведенная ниже таблица показывает зависимость давления и скорости течения крови от размеров кровеносного сосуда.

Сосуды	Диаметр, мм	Скорость, см/сек	Давление, тор *
Аорта	20	50	50—150
Артерии	10—5	50—20	80—20
Артериолы	0,1—0,5	20—1,0	50—20
Капилляры	0,5—0,01	0,05—0,1	20—10
Венулы	0,1—0,2	0,1—1,0	10—5
Вены	10—30	10—20	(—5)—(+5)

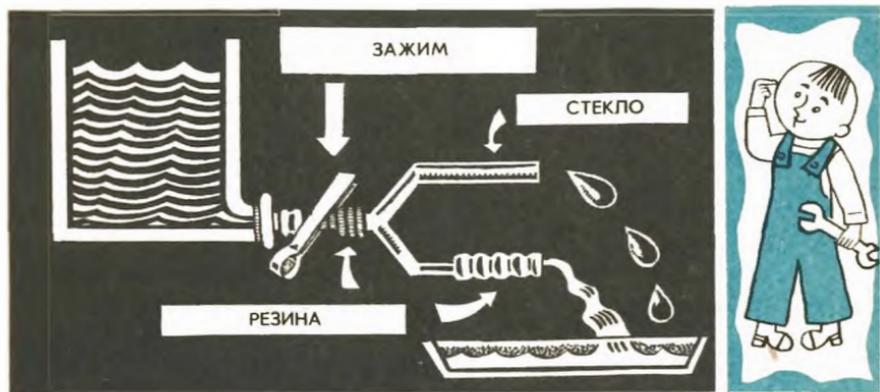
* 1 тор — единица давления, соответствующая 1 мм. рт. ст.

Первые два столбца цифр в этой таблице обусловлены законом неразрывности струи и связывают величину сечения со скоростью движения крови. Анализируя эти цифры, можно подумать, что закон неразрывности струи в кровеносной системе не соблюдается, ибо чем уже сосуд, тем скорость движения в нем меньше, что особенно хорошо видно на примере капилляров. Однако это несоответствие только кажущееся. Дело в том, что в таблице приведен диаметр одного сосуда, но ведь по мере разветвления сосудов площадь каждого из них уменьшается, а суммарная площадь разветвления возрастает. Так, суммарная площадь всех капилляров в сотни раз превышает площадь аорты — этим и объясняется такая малая скорость крови в капиллярах.

Второй и третий столбики цифр этой таблицы обусловлены зависимостью давления от скорости движения жидкости. И здесь анализ цифр приводит к кажущемуся несоответствию с закономерностью: скорость крови уменьшается от аорты к капиллярам, а затем возрастает к венам; следовательно, давление должно быть большим в капиллярах и меньшим в аорте и венах. Такой вывод, однако, не имеет смысла: кровь может двигаться только по направлению от большего давления к меньшему (см. таблицу). Такое отклонение от законов гидродинамики вызвано работой сердца — оно нагнетает кровь в аорту и этим создает давление до 150 тор, затем давление падает, а в венах даже становится отрицательным также за счет отсасывающего действия сердца.

Действие эластичности стенок сказывается в связи с периодичностью работы сердца. Измерения показали, что при частоте сокращений 70 в минуту на сокращение желудочков приходится 0,3 сек, предсердий — 0,12 сек и 0,5 сек сердце отдыхает (около

Рис. 9 Демонстрация действия эластичности стенок на течение жидкости.



0,9 сек на 1 цикл). Так возникает ритмическая пульсация, которая в некоторых местах организма легко прощупывается (пульс), а по мере разветвления сосудов сглаживается за счет эластичности сосудов, исчезая в капиллярах и венах.

При каждом сокращении сердечной мышцы в аорту выталкивается 60—70 см³ крови. Поскольку кровеносная система заполнена кровью, кровь выталкивается из сердца в сосуды под некоторым давлением, что сопровождается растяжением стенок аорты, создается некоторый резерв крови в этом растяжении. Когда сердце отдыхает, ток крови в системе не прекращается: под действием упругих сил стенки сосудов возвращаются в исходное состояние, направляя в систему кровь из своего резерва. Действие эластичных трубок можно увидеть на опыте, изображенном на рис. 9. Жидкость из большого сосуда через резиновый шланг поступает в резиновую (эластичная) и стеклянную трубки. Периодически зажимая резиновый шланг, в эти трубки направляют прерывистый поток жидкости. За счет эластичности стенок резиновой трубки пульсации сглаживаются, поэтому из нее жидкость вытекает непрерывным потоком. Из стеклянной трубки жидкость вытекает прерывисто.

Давление крови и его измерение

Величина кровяного давления имеет большое значение для жизнедеятельности организма. Работа сердца и действие сил упругости стенок аорты приводят к периодическому изменению величины кровяного давления. Принято измерять максимальное и минимальное давление (что под этим понимают, объясним немного позднее, в этом же параграфе). У взрослого человека нормальное максимальное давление 110—120 тор, а минимальное — 60—70 тор. Эти цифры показывают, насколько давление крови в сосудах выше нормального атмосферного давления.

Чтобы дифференцировать (отличить) гипертонию (повышенное давление) и гипотонию (пониженное давление) от других болезней, надо уметь быстро измерять кровяное давление. Давление крови можно измерять прямым методом — непосредственно в полость сосудов или сердца вводится зонд, соединенный с манометром. Однако этот метод применяется только при хирургических операциях на сердце и в медико-биологических исследованиях на животных.

Для измерения кровяного давления человека обычно применяется косвенный метод. Он основан на измерении давления воздуха, необходимого для того, чтобы сжать артерию и прекратить в ней ток крови. Прибор, служащий для этой цели, называется сфигмоманометром (рис. 10). Он состоит из манометра

чашечного типа 1, резиновой груши 2 и манжеты 3. Манжета через тройник 4 соединена резиновыми трубками с манометром и резиновой грушей.

Обернув руку манжетой выше локтя, нагнетают в манжету грушей воздух до давления, при котором перестает прослушиваться пульс: артерия полностью зажата. После этого постепенно выпускают воздух из манжеты (при помощи тройника), пока не появится отчетливо слышимый звук (при прослушивании пульса ниже манжеты) — начальный тон, возникающий во время про-

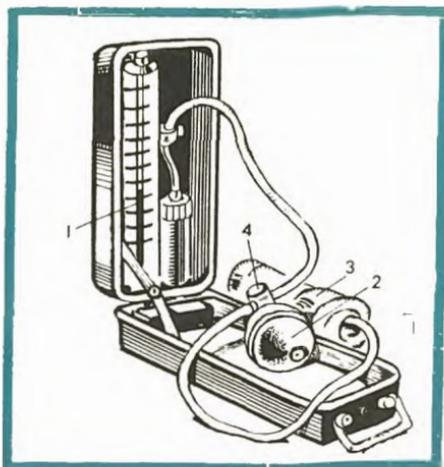


Рис. 10 Сфигмоманометр.

хождения крови толчками через зажатую артерию. При первом появлении начального тона производят отсчет давления по манометру — оно соответствует максимальному (систолическому) давлению.

При дальнейшем снижении давления в манжете звуковые явления постепенно прекращаются и в момент полного восстановления просвета артерии исчезают. Отсчитанное в этот момент давление воздуха в манжете соответствует минимальному (диастолическому) давлению крови.

Если в сфигмоманометре ртутный манометр заменен металлическим, то такой прибор называется сфигмотонометром.

Простейшие медицинские приборы, действующие по законам гидродинамики

Медицинский шприц. Наиболее простым и хорошо известным инструментом является шприц. Первыми из современных моделей считают шприцы Анеля и Плеваца, предложенные ими в 1853 году. Эти шприцы состояли из стеклянного цилиндра емкостью 1 мл с оправой из твердого каучука и металлического стержня с кожаным поршнем. Для бактериологических целей служил шприц Коха, снабженный резиновой грушей вместо поршня. Но, наверное, идею шприца человек позаимствовал у природы.

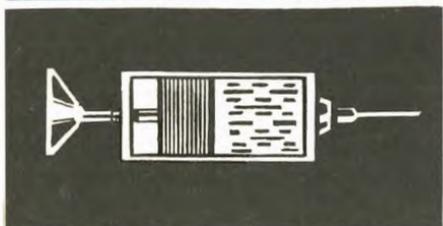
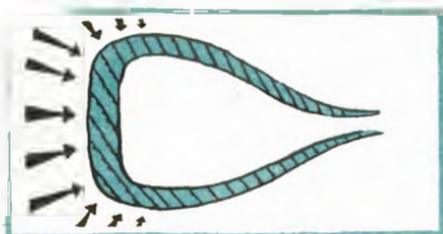


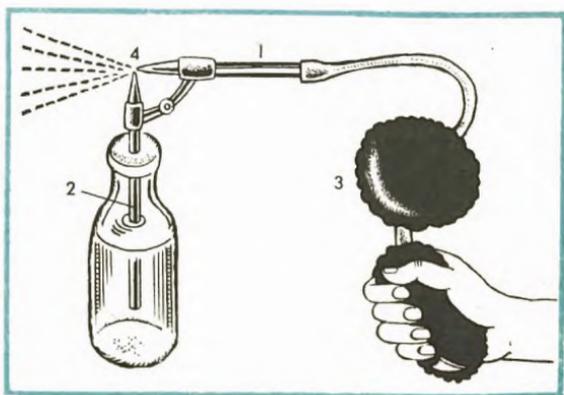
Рис. 11. Схема строения зуба змеи и шприца.

Если внимательно посмотреть на зуб ядовитой змеи (рис. 11), мы увидим те же элементы, что и в шприце. Колющая часть зуба, полый канал и резервуар для яда напоминают иглу, полую внутри, и цилиндр шприца (рис. 11). При сокращении мышечной ткани яд попадает в полый канал зуба (роль поршня играет мышечная диафрагма). С точки зрения гидродинамики зуб змеи и все модели шприцев, вплоть до современных «Рекордов», представляют собой трубу переменного сечения, для которой справедливы и закон неразрывности струи, и уравнение Бернулли.

Из уравнения Бернулли можно определить скорость вытекания лекарства из иглы шприца. При нажатии на поршень лекарственное средство подается в иглу. Так как скорость жидкости обратно пропорциональна площади сечения $\left(\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1}\right)$, то незначительное смещение поршня приводит к быстрому вытеканию струи из иглы шприца.

Ингалятор — прибор, применяемый для введения лекарственных средств в капельном состоянии в область носоглотки, — разновидность пульверизатора. Напомним его действие.

Рис. 12. Схема пульверизатора.



Пульверизатор (рис. 12) состоит из двух трубок, расположенных под прямым углом. Горизонтально расположенная трубка 1 на конце имеет сужение, под которым располагается один конец вертикальной трубки 2, другой ее конец опущен в сосуд с жидкостью (например, во флакон с духами). Резиновой грушей 3 через горизонтальную трубку продувают воздух, в суженной части трубки 4 скорость воздуха возрастает, поэтому давление тут уменьшается и становится меньше атмосферного. Жидкость под действием атмосферного давления поднимается из сосуда вверх по вертикальной трубке, захватывается потоком воздуха и распыляется.

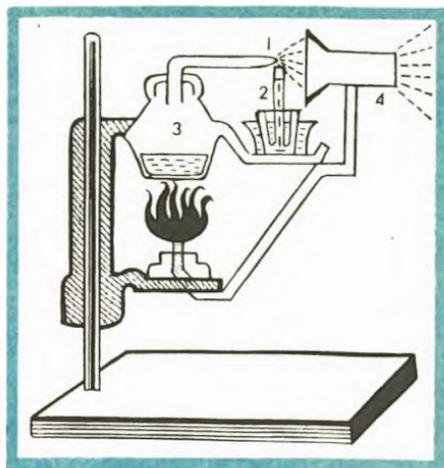


Рис. 13. Схема ингалятора.

В ингаляторе (рис. 13) вместо груши используют паробразователь 3 (для наглядности на рисунке он показан со спиртовкой, в приборах употребляются электрические паробразователи). Пар, проходя через сужение горизонтальной трубки 1, увеличивает скорость и у конца горизонтальной трубки создает давление ниже атмосферного. Атмосферное давление выталкивает по вертикальной трубке 2 лекарство из флакона; лекарство распыляется струей пара и через патрубков 4 вдыхается больным.

Водоструйный насос. В медицинской практике часто применяют водоструйный насос, разрежающее действие которого основано на законах гидродинамики. Водоструйный насос (рис. 14) состоит из стеклянного баллона 1, присоединяемого трубкой 2 к водопроводному крану, а трубкой 3 — к сосуду, в котором создается разрежение. Трубка 2 на конце имеет коническое сужение, поэтому вода вытекает из нее в трубку 4 с большой скоростью (согласно уравнению неразрывности струи). Давление вблизи сужения падает ниже атмосферного (уравнение Бернулли); воздух из сосуда, где создается разрежение, засасывается трубкой 3 и через щель 5 уносится потоком воды через трубку 4.

Водоструйный насос создает разрежение до 200 мм рт. ст. Он не требует смазки, бесшумен, гигиеничен. Поэтому он находится применение в медицине в качестве отсоса при операциях, для создания разрежений в клинических лабораториях и т. п.

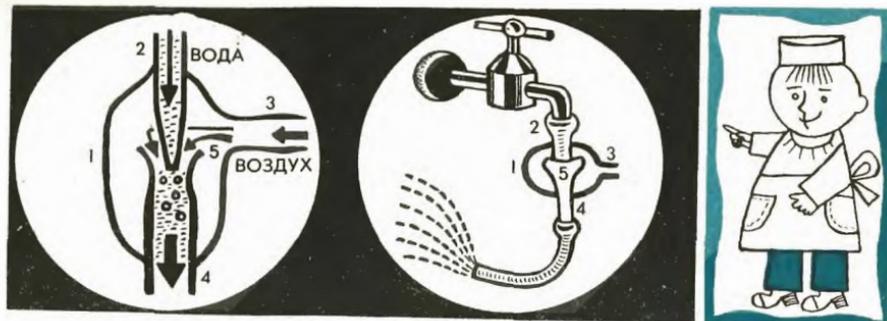


Рис. 14. Схема водоструйного насоса.

Мы ограничились рассмотрением простейших приборов, но законы гидродинамики используются и при создании таких приборов, как искусственное сердце, легкие, почки и др. Это очень сложные приборы, и мы не можем рассматривать их работу в этой книге.

Закон Стокса и реакция оседания эритроцитов (РОЭ)

Очень важной проблемой гидродинамики является изучение законов движения тел различной формы в жидкости. Закон Стокса позволяет определить силу сопротивления, которую встречает со стороны жидкости (или газа) падающее в ней шарообразное тело. По закону Стокса $F = 6\pi\eta r v$, где η — коэффициент вязкости жидкости, в которой падает шарик, r — радиус шарика, v — скорость падения шарика. В начале падения шарик движется ускоренно, но с возрастанием скорости увеличивается сила сопротивления со стороны жидкости, ускорение уменьшается и затем становится равным нулю: шарик в жидкости движется равномерно и прямолинейно. Это может быть только тогда, когда сила сопротивления F станет равной весу шарика P . Закон Стокса часто используют для определения скорости оседания шарообразных тел в жидкости.

В жизни человека кровь играет особую роль. Трудно перечислить функции, которые она выполняет. Основная ее функция транспортная. Кровь транспортирует по телу питательные вещества и кислород. Основную нагрузку в этом выполняют эритроциты. Это круглые или овальные дискообразные тельца, диаметр которых (у человека) равен 8 микронам. В каждом кубическом миллиметре крови находится до 5 миллионов эрит-

роцитов — в организме человека потоком крови переносится около 25 триллионов эритроцитов! Чтобы представить себе это число, можно мысленно выложить эритроциты в один ряд, тогда длина этого ряда будет около 200 000 км.

Вся эта армия перемещается в вязкой жидкости — плазме крови человека. Так как эритроциты имеют дискообразную форму и оседают в вязкой жидкости, то скорость их оседания (реакцию оседания эритроцитов — РОЭ) можно определить (приближенно) непосредственно по закону Стокса. Это диагностическое средство дает возможность установить наличие воспалительных процессов в организме человека.

В медицине пользуются косвенным методом, применяя прибор Панченкова (рис. 15). Он состоит из четырех проградуированных капиллярных пипеток, вертикально установленных в штативе. Кровь, предварительно смешанную с лимонно-кислым натрием для предотвращения ее свертываемости, насыщают в пипетки, которые ставят в штатив. Эритроциты оседают в течение часа. О скорости их оседания судят по количеству плазмы над осевшими эритроцитами. В норме (у здоровых людей) скорость оседания эритроцитов колеблется: у женщин в пределах 7—12 мм в час, у мужчин — 3—9 мм в час.

Закон Стокса можно использовать для гигиенических целей. Так, с его помощью можно определить скорость оседания пыли, дыма и других отходов производства.



Рис. 15. Прибор Панченкова.

Некоторые «новые» проблемы гидродинамики

Вот уже несколько десятилетий изучаются особенности движения крови в капиллярах. Кровь в них ведет себя не так, как обычная жидкость, например вода. Если по трубке движется чистая жидкость, то коэффициент сопротивления трубки не зависит от ее сечения, а обуславливается только вязкостью жидкости. При движении крови сопротивление трубки оказывается тем меньше, чем меньше ее диаметр.

Это очень интересное явление находит применение для гидродинамических расчетов аппаратов типа «искусственное сердце» или «почка».

Ученые Советского Союза недавно теоретически дока-

зали, а канадские медики зафиксировали экспериментально, что при движении крови в тонких сосудах вследствие гидродинамического взаимодействия красных кровяных телец с плазмой красные кровяные тельца оттесняются от стенок. Появление сил, оттесняющих эритроциты от стенок, связано с их вращением. В результате у стенок сосуда образуется своего рода смазывающий слой чистой плазмы, вязкость которой в 4—6 раз меньше, чем цельной крови.

К числу «новых» проблем гидродинамики принадлежит также проблема высокой скорости и маневренности быстроходных рыб. Долгое время считалось, что гидродинамика решить эту проблему бессильна. И лишь в последние годы ученые убедились, что гидродинамика может объяснить эти явления, если изучить деформацию тела рыбы при ее движении в воде. Английские и советские ученые показали, что большая скорость достигается благодаря особым движениям тела рыб, по которому проходят волны изгибов. Не исключено, что это открытие даст возможность создать высокоскоростные плавательные аппараты.

В качестве примера мы привели только две проблемы гидродинамики, связанные с биомеханикой. Таких проблем очень много.

О ПЕРИОДИЧНОСТИ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДЕ

Процессы, повторяющиеся через определенные промежутки времени, широко представлены в живой природе. Периодический характер носят многие функции организма человека и животных. Сердце, периодически сокращаясь, посылает кровь во все самые отдаленные части организма. Уже у человеческого эмбриона оно делает одно сокращение в каждую секунду, $\nu = 1$ гц. Возможно, промежуток времени 1 сек и был выбран как длительность паузы между сердечными сокращениями. Позже у новорожденного пульс учащается, доходя до 140 сокращений в минуту (частота $\nu = \frac{1}{T}$; $\nu = 2,3$ гц). Затем частота

сердечных сокращений уменьшается и, как мы уже говорили, у взрослого человека в среднем составляет 70—75 сокращений в минуту, возрастая при усиленной работе (до 2,5 раз). За 100 лет человеческой жизни сердце успевает сделать $5 \cdot 10^9$ сокращений!

Периодичность наблюдается и в работе легких, мозга, кишечника, в изменении температуры тела, давления и объема легких. Таких примеров можно привести много. Фактически все процессы в живой природе в той или иной степени периодичны.

Регистрация периодических колебаний

Для врачей очень важно научиться записывать периодические процессы, протекающие в организме. Для этой цели в физиологии и медицине применяют кимографы, с помощью которых записывают колебательные процессы, протекающие в сердце, легких, нервной системе, а также колебания температуры, давления и т. д.

На рис. 16 изображена схема электрокимографа. Барабан с закопченной лентой 1 установлен на валу 2, который приводится в движение электромотором, вмонтированным в корпус прибора 6. Скорость вращения барабана устанавливается специальным датчиком. Электрометром 7 с отметчиком времени 4 вычерчивает на ленте пунктирную прямую — систему штрихов, которые задают масштаб времени. На этом рисунке 3, 5, 8, 9 — подвесная система с датчиком для демонстрации работы кимографа. В медицинских и физиологических исследованиях перо (конец стрелки) с помощью специальных устройств соединено с датчиком, расположенным на исследуемом объекте. По записанной на кимографе кривой можно не только судить о характере колебательного процесса, но и определить его важнейшие характеристики — период, частоту, амплитуду, декремент затухания и т. д.

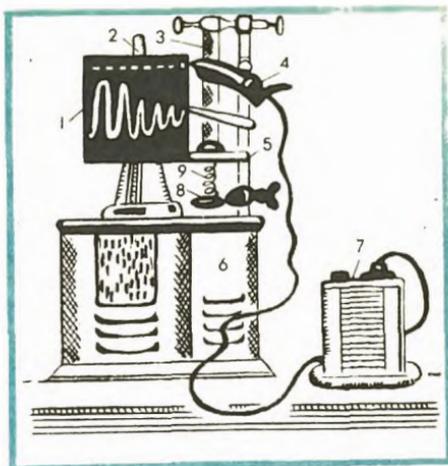


Рис. 16. Электрокимограф.

Биологические часы

Факторы внешней среды, окружающие человека, животных, растения, также периодически изменяются. День и ночь сменяют друг друга точно по расписанию, без опозданий приходит весна, зима, лето, осень.

Оказалось, что растения, животные и человек унаследовали «календарную память». Когда день достигает определенной длины, растения начинают цвести, птицы петь, жители леса пробуждаются от зимней спячки. Биоритмы — это отражение цикличности явлений, происходящих в природе.

Еще в 1729 году французский ученый Мэран обнаружил, что растения способны «отсчитывать» время — их листья совершают определенные движения в течение суток. Птицы, рыбы и насекомые выработали у себя удивительное чувство времени. Они могут ошибаться лишь на несколько минут. Животные удивительно точно определяют время для спячки. Медведь-шатуни, не улегшись по каким-то причинам в спячку или потревоженный во время спячки, не дожидает до весны.

Зимняя спячка животных — характерный пример годичного биологического ритма. Вот один из экспериментов, подтверждающих это.

Суслик был помещен в комнату без окон, где электрическое освещение делило сутки ровно пополам и где поддерживалась постоянная температура на уровне 0°C. И несмотря на то, что у суслика было достаточно корма и воды, он впал в спячку, примерно в то же время, что и на воле.

Палоло, морской кольчатый червь, живет в темных пещерах коралловых рифов на юго-западе Тихого океана. Он отличается удивительной пунктуальностью. Раз в году, всегда в последнюю четверть лунного месяца, в ноябре, он всплывает на поверхность океана для нереста.

В процессе многовекового развития организм человека тоже усвоил ритм внешних явлений. Так, температура тела человека, частота пульса, артериальное давление, дыхание, работоспособность и даже настроение изменяются в определенном ритме. Температура тела самая низкая — ночью. К утру она повышается и достигает максимума к 18 часам. У большинства людей в течение суток имеются два пика повышенной работоспособности. Первый подъем наблюдается от 9 до 12—13 часов, второй — между 16—18 часами. В периоды максимальной активности повышается и острота наших органов чувств: утром и днем человек лучше слышит и лучше различает цвета.

Возникли медицинские проблемы, связанные с биоритмами человека. Хирурги Флориды заметили, например, что операции на гортани, проведенные во вторую четверть лунного месяца, часто заканчиваются сильным кровотечением. Эффект введения многих лекарственных препаратов зависит от времени. Часть из них ночью действуют гораздо сильнее, чем днем. Скоро нас не будут удивлять предупредительные надписи на пузырьках с какой-либо микстурой: «Не принимать между 16 и 20 часами!». Подобные факты известны давно. Но объяснить и связать их удалось совсем недавно. Появилась даже новая наука — биоритмология.

Теперь ясно, почему болезненно переносятся стремительные перелеты самолетом через временные пояса — расстраиваются наши биологические часы. Еще не до конца ясен их механизм. Известно лишь, что управляет «часами» область головного мозга, воздействующая на гипофиз, а он в свою очередь задает

режим работы всех желез, регулирующих жизнедеятельность организма.

Четкая ритмичность наблюдается в смене торможений и возбуждений в коре головного мозга. Бодрствование сменяется сном. Однако известны случаи нарушения этой закономерности. Сломались «биологические часы» у 77-летнего шведа Олафа Эриксона. Он не спит уже 46 лет. Когда потребовалось хирургическое вмешательство, врачам не удалось усыпить больного даже с помощью наркоза. С трудом помогло лишь местное обезболивание. Житель Лондона Сидней Эдвард не спит с июля 1941 года. Сидней был очевидцем гибели невесты, и шок навсегда лишил его сна. В течение 20 лет не нуждается в будильнике и португалец Алинило Роза Морейро. С другой стороны, наблюдаются случаи длительного сна. Патриция Маггуира, например, спит беспробудным сном уже 20 лет! Вот какие казусы наблюдаются при нарушении биологических ритмов.

Недавно получены данные о том, что процессы старения связаны с биологическими часами и некоторые люди быстро стареют из-за нарушения их нормальной работы. Зная механизм биологических часов, можно будет «починить» их.

Изучение биологических ритмов необходимо и для космической медицины. Инженерам придется подумать о том, как создать для космонавтов искусственные день и ночь.

ЗВУК И СЛУХ

Для вас не новость, что необходимыми условиями возникновения и восприятия звука являются: источник звука (колеблющееся тело), среда, в которой распространяется звук, и приемник звука (ухо или другой прибор, воспринимающий звук).

Источник звука — любое колеблющееся тело; если тело колеблется с частотой до 20 гц, то оно излучает инфразвуки; колебания в диапазоне от 20 до 2000 гц называются звуками, а свыше 20 000 гц — ультразвуками.

Звуки называются музыкальными, если колебания периодичны, они могут быть сложными, но обязательно периодическими. К таким звукам относятся звуки музыкальных инструментов, речь человека. В отличие от музыкальных звуков шумы состоят из большого количества аperiodических колебаний. Кроме музыкальных звуков и шумов, различают еще звуковой удар. Это одиночная звуковая волна большой интенсивности, возникающая, например, при сильном взрыве.

Восприятие звуков человеком весьма субъективно. Один и тот же звук воспринимается им в различных условиях по-разному: легкое покашливание находящегося рядом человека можно не заметить, если это происходит на стадионе во время футбольного матча, вызвать раздражение, если это в концертном зале, или тревогу, если это покашливание обнаружено у ребенка, и т. д. Восприятие звуков связано с состоянием человека (субъекта) и зависит от многих внешних факторов. Различные люди по-разному воспринимают звуки: одних шум моря успокаивает, других — раздражает; одни не замечают шума улицы, а у других от него возникает головная боль. Такое восприятие не назовешь объективным, оно, безусловно, субъективно.

Звук имеет и объективные физические характеристики: сила звука (мы воспринимаем ее как громкость), частота (субъективно — высота тона) и гармонический спектр (в восприятии определяющий тембр звука).

Сила звука — это энергия, которую за 1 сек переносит звуковая волна через площадку в 1 м^2 , расположенную перпендикулярно к направлению распространения звуковой волны:

$$I = \frac{E}{St}, \quad |f| = \frac{d\mathcal{E}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}} = \frac{v\pi}{\text{м}^2}.$$

Не всякой силы звук мы можем услышать. Оказывается, что звук силой $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{вт}}{\text{м}^2}$ мы еще можем услышать — эта сила звука называется пороговой (порог слышимости). При увеличении силы звука усиливается громкость. Если же сила звука достигает $I_{\text{max}} = 10 \frac{\text{вт}}{\text{м}^2}$, мы начинаем чувствовать боль в ушах (болевой порог). Болевой порог отличается от порога слышимости в 10^{13} раз! Это очень большой интервал сил звуков, которые может воспринимать наш слуховой аппарат.

Как же человек воспринимает такой громадный диапазон сил звуков? Оказывается, что восприятие звуков (и не только звуков — запаха, цвета, боли и т. д.) происходит по логарифмическому закону: если сила звука увеличивается в 1000 раз, то воспринимаемая громкость увеличится в $\lg 1000$, т. е. только в 3 раза; увеличение силы звука в миллион раз (10^6) приводит к увеличению громкости только в 6 раз. Эту зависимость можно выразить формулой:

$$L = \text{кг} \frac{I}{I_0}.$$

* Пороговые значения приведены для частоты 1000 гц.

где L — воспринимаемая громкость (субъективная характеристика); отношение $\frac{I}{I_0}$ — показывает, во сколько раз увеличилась сила звука; k — коэффициент пропорциональности. Этот закон не может быть назван физическим, так как L — не физическая, а субъективно воспринимаемая величина; поэтому такие законы называют психофизическими. Следует указать, что этот закон ограничен: он справедлив не для всего диапазона звуковых волн, воспринимаемых человеком.

Приведенную выше формулу удобно использовать для определения единицы измерения громкости. L будет равно единице, если $k=1$ и $\lg \frac{I}{I_0} = 1$; а это возможно, если $\frac{I}{I_0} = 10$. Таким образом, громкость изменяется на 1 бел, если сила звука изменится в 10 раз. Чаще пользуются единицей, в 10 раз меньшей, — децибел. Так, шум шагов примерно равен 40 децибелам, крик — 70, шум городской улицы — 90, болевой порог — 130 децибелам.

На субъективное восприятие звука оказывает влияние характер действия раздражителя. При непрерывном действии звуковой волны чувствительность восприятия понижается. Поэтому длительные раздражения умеренной силы, вследствие адаптации нерва, не вызывают неприятных, режущих слух ощущений. Физика этих явлений заключается в следующем. Согласно законам сложения колебаний, форма суммарной волны остается неизменной, если частоты слагаемых колебаний (или периоды) относятся как небольшие целые числа. Возникающие при этом звуки, называемые консонансами, отличаются длительным равномерным звучанием, что способствует адаптации, снижению чувствительности слухового нерва; такие сочетания звуков приятны уху. Примером могут служить широко известные музыкальные созвучия (аккорды), приведенные в таблице (рис. 17).

Иначе обстоит дело с прерывистыми раздражениями. В этом случае нерв не успевает адаптироваться; при каждом новом импульсе чувствительность восстанавливается, возникают неприятные, режущие слух ощущения.

Сухие цифры порогов, в пределах которых человек воспринимает звуки, не характеризуют высокую чувствительность слухового аппарата, а она поистине фантастична: человек воспринимает звук, если звуковая волна сместила мембрану всего лишь на одну стомиллиардную часть сантиметра! Это расстояние в тысячу раз меньше диаметра атома водорода! Причина столь высокой чувствительности слухового аппарата не раскрыта до настоящего времени. Решение этой проблемы — очень увлекательное и очень трудное дело.

Однако человек не является чемпионом в области слуха. Многие животные способны слышать гораздо более слабые звуки. Не следует считать это большим недостатком человека. Пожа-

АККОРД	ОТНО- ШЕНИЕ ЧАСТОТ	ПРИМЕР
УНИСОН	1:1	
ОКТАВА	1:2	
ДУОДЕЦИМА	1:3	
КВИНТА	2:3	
КВАРТА	3:4	
ТЕРЦИЯ БОЛЬШАЯ	4:5	
ТЕРЦИЯ МАЛАЯ	5:6	

Рис. 17. Отношения частот в различных аккордах.

луй, человеку выгодно слышать меньше, чем больше. Гораздо важнее, что он без особого вреда может переносить довольно сильные звуки, возникающие при звуковом давлении в 300 000 тор. А вот у некоторых животных, например у белых крыс, сильные звуки вызывают судорожные припадки и даже смерть.

Слух человека не только по остроте, но и по другим показателям отстает от слуха многих животных. Во-первых, мы слышим очень узкую полосу частот звуковых колебаний. Звук не воспринимается как непрерывный, тогда частота колебаний составляет 16—18 герц (гц) и исчезает, когда частота колебаний достигает 20 000 гц.

Это сравнительно небольшо-

шая частота. Собаки способны улавливать звуки частотой до 38 000 гц. Киты и дельфины могут следить за изменением звукового давления, которое происходит с частотой 100—125 тыс. гц, а летучие мыши — даже до 300 тыс. гц.

Человек и высшие животные обладают бинауральным слухом. Это очень помогает в определении местонахождения источника звука. Звуковые волны не одновременно достигают правого и левого уха. Человек способен заметить, что звук до одного уха доходит всего лишь на 0,0001 сек позже, чем до другого.

У лисицы расстояние между ушами около 10 см, т. е. приход звука в одно ухо по отношению к другому может опаздывать не более, чем на 0,0003 сек. Животные вообще могут очень точно измерять и запоминать величину интервалов между приходом отдельных звуков. Собака легко отличает звучание метронома, производящего 100 ударов в минуту, от метронома, дающего 98 ударов. Даже для изоощренных ушей музыкантов-профессионалов звучание обоих метрономов кажется одинаковым.

Что крепче всего на свете? Что быстрее всего на свете? Что слаще всего? Герои старинных сказок проявляют чудеса сообразительности, отгадывая такие загадки. Читателям этой книжки тоже задается загадка: что мягче всего на свете?

Думаете перина? Подушка? Нет, воздух. Конечно же! Воздух податливей и легче пуха. Лучшие матрацы — надувные. Ну, а что на свете самое упругое? Не пружина и не резина, а все тот же воздух. Несмотря на свою мягкость, он чрезвычайно упруг. Не будь этого, вы не надували бы им свои мячи: они наотрез отказались бы прыгать.

Упругость «сверхмягких» тел — газов — в свое время удивляла физиков и служила поводом для горячих споров. Недоумение разрешил Михаил Васильевич Ломоносов. Виновником этих свойств оказалось беспорядочное движение газовых молекул. Бомбардируя стенки сосуда, вмещающего газ, они создают давление, которое упрямо борется со сжатием. Итак, наша Земля окружена огромным упругим океаном. И именно поэтому наш мир полон звуков. Хлопком в ладоши вы быстро сжимаете воздух. Благодаря своей упругости он тут же расширяется и сдавливает соседние участки атмосферы. Те, сжавшись, в свою очередь, стремятся расшириться — и все дальше распространяется невидимая волна! Такие волны могут возникать в любых упругих телах (газообразных, твердых, жидких).

Достигнув нашего уха, звуковая волна ударяется о барабанную перепонку и создает ощущение, которое мы называем звуковым.

На рисунке 18 показан разрез уха, а на рисунке 19 — схема строения уха. Ухо представляет собой сочетание рупора (наружное ухо) и чувствительного манометра (среднее ухо) с резонансной системой внутреннего уха.

Рассмотрим подробнее механизм восприятия звука человеком. Звуковые волны собираются ушной раковиной и, распространяясь вдоль слухового прохода, достигают барабанной перепонки, а от нее передаются в среднее ухо. Здесь наряду с передачей звука происходит и его усиление. Усиление звука объясняется тем, что поверхность барабанной перепонки почти в 22 раза меньше, чем поверхность стремечка.

Поэтому энергия звуковой волны усиливается тоже в 22 раза. Кроме того, слуховые косточки (молоточек, наковальня и стремечко; рис. 19) работают как рычаг, длинное плечо которого в 2,5 раза больше короткого, вследствие чего звуковые колебания еще больше усиливаются и передаются во внутреннее ухо — лабиринт.

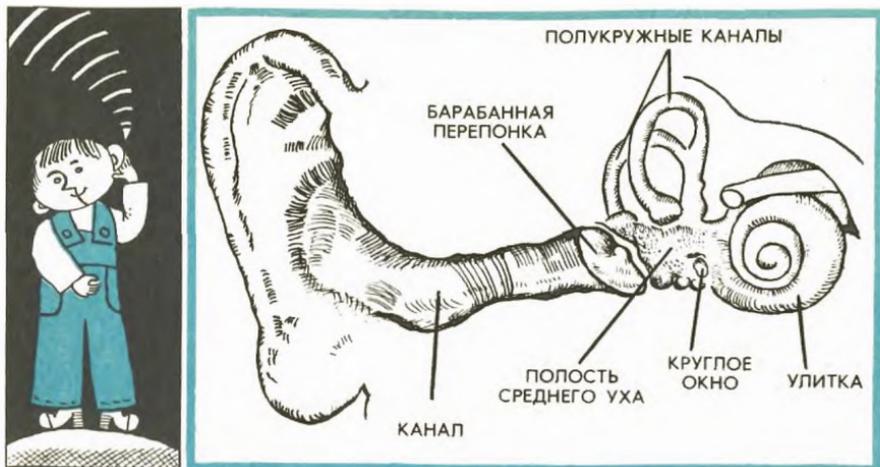


Рис. 18. Разрез уха.

Лабиринт (рис. 20) — это костная полость, заполненная особой жидкостью — эндолимфой. Лабиринт состоит из трех частей: улитки 1, преддверья 2 и трех полукружных каналов 3. В улитке и расположен собственно орган слуха — кортиев орган. Первая попытка объяснить физические основы слуха была сделана Гельмгольцем. Врач по образованию, он был в одинаковой степени и физиком, и физиологом. В недрах внутреннего уха ученый разыскал нечто замечательное: крошечное подобие рояля с 24 000 «струн» — упругих волоконцев различной длины. По «струне» на каждую частоту слышимых колебаний! Этот живой резонатор-анализатор спрятан в извилистой костяной трубке и называется основной мембраной. Звуковые волны бегут в жидкости поперек «струн» — волокон, те мгновенно отзываются на них резонансными колебаниями*. При этом возбуждаются многочисленные окончания слухового нерва, который и передает полученную информацию в мозг.

Теория Гельмгольца не объясняет ряд особенностей слуха, в частности восприятие силы звука и изменение чувствительности слуха с частотой. Эта трудность устраняется в ионной теории Лазарева, построенной по аналогии с фотохимической теорией зрения. Согласно этой теории предполагается наличие некоторого звукочувствительного вещества, которое под действием звука разлагается на ионы, раздражающие окончания слухового нерва. Опираясь на изменение способности этого ве-

* Когда частота их собственных колебаний совпадает с частотой звука.



Рис. 19. Схема строения уха.

щества к разложению, Лазарев сумел объяснить явления адаптации и восстановления чувствительности.

Оригинальная теория слуха, разработанная Я. И. Френкелем, получила название релаксационной. Колебания волокон в вязкой среде являются агармоническими — возвращение волокон в положение равновесия аperiодично и характеризуется различным временем релаксации. Последнее пропорционально длине волокон и определяет, какое именно волокно будет резонировать со звуковым колебанием. Иными словами, энергия колебаний различной частоты поглощается различными волокнами; именно так возникает информация о высоте и качестве звука, поступающая в центральную нервную систему.

Ни одна из приведенных теорий восприятия звука не решает полностью проблемы восприятия звука. Эта проблема необычайно сложна, она связана с биоэнергетикой, механохимией, электроникой, кибернетикой...

Рис. 20. Лабиринт.



Источником голоса у человека и высокоразвитых животных является гортань, в которой находятся голосовые связки. Если человек молчит, голосовые связки образуют широкую щель, через которую свободно проходит воздух в легкие и обратно. При произношении звуков мышцы натягиваются, голосовые связки сближаются и образуют узкую щель. Воздух, проходя сквозь нее, вызывает колебания голосовых связок, которые в свою очередь передают колебания воздуху, находящемуся в трахее, гортани, полости рта и носа. Это очень простая теория: чем больше связки, тем ниже звук, сильное дуновение — звук громче. Просто, правда?

Такая примитивная трактовка живого вибратора не выдержала опытной проверки. У многих певцов, например у Карузо, Шаляпина, размеры связок никак не соответствовали тому, что требовала эта теория. Оказалось, что воздух, выходящий из легких, не единственная причина колебаний голосовых связок. Действие голосового аппарата гораздо сложнее. Вибрация голосовых связок способна происходить и без механических толчков воздуха. Горло — это скорее электронно-физиологический «громкоговоритель».

Колебания связок вызываются также электрическими импульсами возбуждения, поступающими к гортани из головного мозга. Это и лежит в основе новой теории голоса. И вот что любопытно: даже когда человек не поет, а только слушает музыку или мысленно представляет себе какую-нибудь мелодию, его голосовые связки все равно колеблются, причем с такой же частотой, как и при настоящем пении. Эти колебания поддаются регистрации электронными приборами. Выходит, можно уловить и записать мысленное пение!

У насекомых все обстоит иначе: у них нет голосового аппарата. Для производства звуков они обычно используют трение. Саранча водит лапкой по своим жестким крыльям. Кузнечики извлекают звук трением надкрылий. У сверчков на трущейся поверхности крыла около 150 треугольных призм и четыре перепонки, вибрация которых усиливает звук. Не удивительно, что и уши у насекомых не на голове. У сверчка звуковоспринимающий аппарат расположен на коленке, у саранчи — на ножке.

Рыбы извлекают звуки при трении жаберных пластин. Карповые скрежещут глоточными зубами. Очень интересно устроен звуковой аппарат окуневых, особенно развитый у поющих рыб и морского петушка триглы. Звуки издаются с помощью плавающего пузыря, благодаря сокращению особых барабанных мышц, которые вызывают колебания его стенок.

Многие звуки животные издают во время движения. Блеяние бекаса, несущегося с неба, возникает от вибрации рулевых перьев хвоста во время особых токовых полетов. Надсадный писк комара, от которого невольно замираешь, ожидая укуса, вовсе не является предупреждением — писк возникает от движений крыльев, и, видимо, в некоторых случаях комар был бы рад замолчать, да не может.

Эхо в жизни животных

Животные очень широко используют эхолокацию. Лишенная зрения собака за 1—2 дня способна научиться не наткаться на стены и крупные предметы. Так же ориентируются рыбы: движение их тел вызывает в воде местные сжатия, распространяющиеся в разные стороны, как обычные волны. Их отражение от встречных предметов улавливается особым органом — боковой линией. С помощью такой вибролокации рыбы даже ночью не натываются на препятствия.

Из птиц, способных к эхолокации, наиболее интересен гуахаро, живущий на островах Карибского моря. Во время полета гуахаро издают частые, короткие звуки в диапазоне 7000 гц, вполне доступные человеческому уху. Звук в воздухе распространяется со скоростью 340 м/сек, т. е. в 12—15 раз быстрее полета птиц. Поэтому звуковая волна всегда успевает намного раньше, чем сами гуахаро, достичь препятствия и вернуться обратно. Птицы получают своевременную информацию о расстоянии до препятствия.

Летучим мышам и дельфинам эхолокация нужна не только для того, чтобы избегать препятствий. Она им необходима в поисках пищи. Они пользуются ультравысокими звуками с частотой от 40 000 до 30 000 гц и длиной волны 1—3 мм. Эхолокация помогает узнать не только местонахождение добычи, но и куда, с какой скоростью она движется. Поэтому дельфины и летучие мыши применяют звуковые импульсы, в которых частота колебаний звуковых волн изменяется.

Звуковые методы исследования в клинике

Многие процессы, протекающие в организме, в том числе патологические, сопровождаются различными звуковыми эффектами. По характеру таких звуков можно определить, какие именно процессы протекают в данной области тела и в некоторых случаях установить диагноз. Такой метод клинического исследования называется аускультацией. В простейшем случае

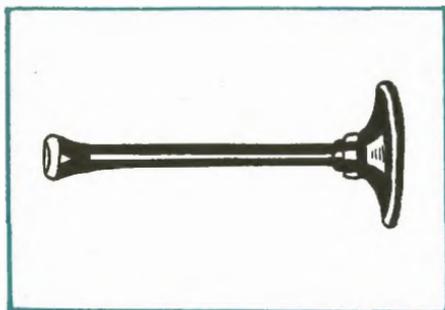
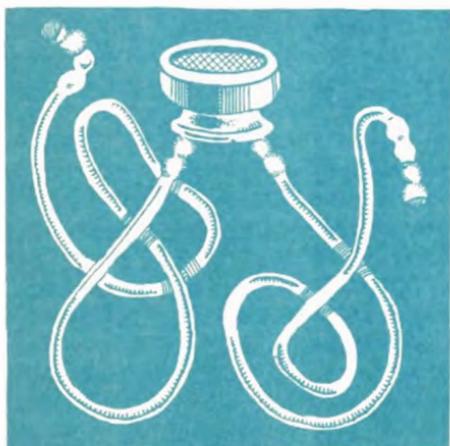


Рис. 21. Стетоскоп.

аускультация осуществляется прикладыванием уха к исследуемой области, однако в большинстве случаев для этой цели пользуются стетоскопом (рис. 21), в котором роль звуковода играют стенки прибора и воздушный столб внутри трубки, или бинауральным стетоскопом (рис. 22), дающим возможность вести прослушивание двумя ушами. Фонендоскоп (рис. 23) снабжен двумя воронками прослушивания сердца и легких. Вторая из них затянута мембраной — столб воздуха в образованной таким образом полости является резонатором, усиливающим прослушиваемые звуки. Все эти приборы могут служить своеобразными датчиками для электронных устройств, преобразующих звуковую энергию в электрическую с последующим усилением, трансляцией, записью и т. д. Другим способом звукового клинического исследования является перкуссия — выстукивание полостей тела с последующим анализом возникающих при этом звуков. Постукивание производится специальным молоточком с резиновой головкой (рис. 24, а) по подкладываемой на место удара пластинке — плессиметру (рис. 24, б) или просто кончиком согнутого пальца одной руки по фаланге пальца второй руки, наложенной на тело больного.

Рис. 22. Бинауральный стетоскоп.



На постукивание резонируют полости внутри организма (каверны, раздутый кишечник и т. д.), по-разному реагируют на звук молоточка или пальца мягкие, упругие, твердые и другие ткани. Все это обеспечивает врача необходимой диагностической информацией.

В настоящее время все чаще для прослушивания и анализа звука применяется электронная техника, например электронный стетоскоп, преобразующий звуковую информацию в фонокардиограмму.

Для диагностики заболевания уха в отоларингологической клинике часто прибегают к методу аудиометрии. Метод состоит в изучении порогов слышимости у данного пациента. Оказывается, что при различных частотах порог слышимости различен и в норме имеет вид, изображенный нижней кривой на рис. 25. Верхняя кривая характеризует болевой порог при различных частотах. Обе кривые получены как результат исследования очень большого количества людей. Таким образом, на рис. 25 область 1 — область слышимых звуков, область 2 — звуки, которые человек не воспринимает вследствие малой их силы (они лежат ниже порога слышимости), и область 3 — звуки, вызывающие ощущение боли.

При аудиометрии у данного больного измеряют пороговые значения силы звука при разных частотах. Кривая, полученная по этим значениям — а у д и о г р а м м а, в зависимости от характера заболевания имеет специфический вид, отличный от кривой здорового уха.

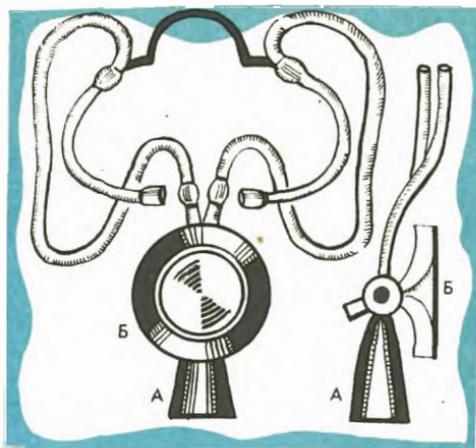


Рис. 23. Фонендоскоп.

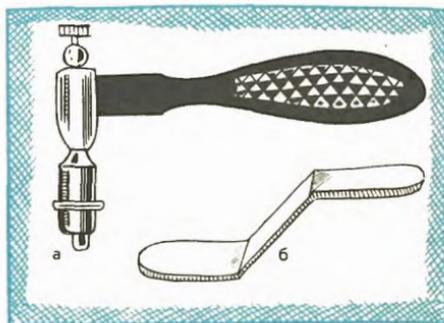
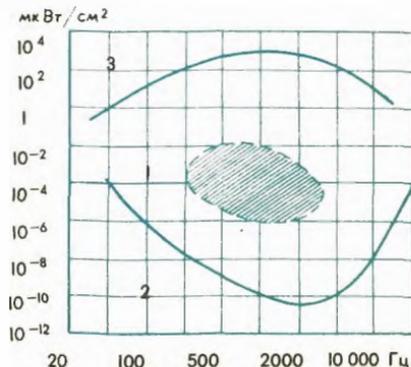


Рис. 24. Молоточек для простукивания [а] и плессмер [б].

Рис. 25. Графики слуховых порогов:

1 — область речи; 2 — порог слышимости; 3 — болевой порог.



Несколько слов о шуме

Вы только что видели, как звук помогает установить диагноз. Однако звук может стать причиной заболе-

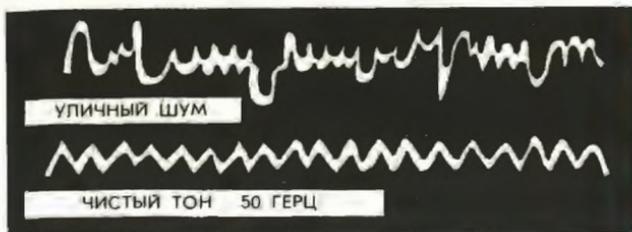


Рис. 26. Графики уличного шума и чистого тона.

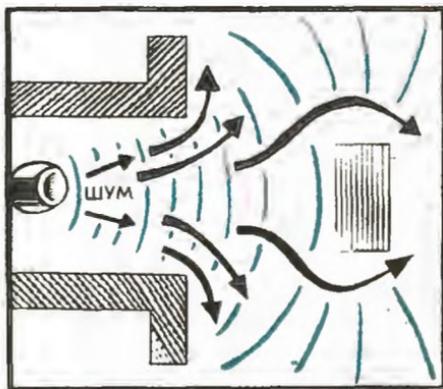
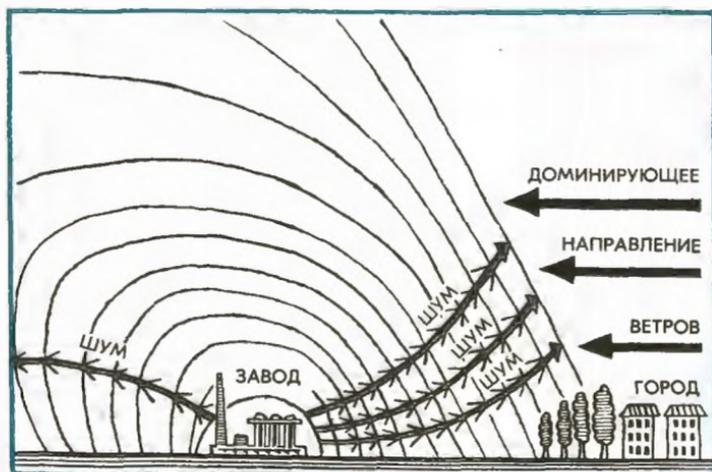


Рис. 27. Дифракция звуковых волн.

Рис. 28. Роза ветров.



ваний не только органов слуха (глухота), но и центральной нервной системы. В этом отношении особенно опасны шумы.

В чем отличие музыкальных звуков от обычного шума? Волчий вой и комариный писк — звуки музыкальные, а барабанный бой и стук кастаньет — просто шум. Барабанщики, конечно, недовольны. Но ничего не поделаешь, такой приговор вынесла наука. К музыкальным звукам она отнесла те, которые обладают определенной периодичностью. И вместе с пением скрипки и человеческой речью в эту поэтическую компанию попал и паровозный гудок.

С физической точки зрения шум представляет собой неупорядоченную, непериодическую последовательность звуковых волн, чистых (простых) тонов. На рис. 26 показаны для сравнения записи кривых чистого тона (внизу) и уличного шума (вверху), — последняя кривая представляет собой сумму многих синусоид.

Для измерения шума используют инспекторский шумомер. Микрофон шумомера преобразует звуковые колебания в электрические. Затем они усиливаются, выпрямляются и измеряются стрелочным гальванометром, шкала которого проградуирована в децибелах. На панели прибора расположена кнопка включения и переключатель диапазонов.

Распространение звуковых волн в принципе аналогично распространению света, однако защита от шума значительно сложнее, чем от света. Прежде всего сравнительно большая длина волны звука приводит к дифракции звука вокруг препятствий (рис. 27). Кроме того, коэффициенты поглощения звука намного меньше, чем у света. Все это требует разработки специальных средств борьбы с шумами, особенно производственными. Для этого существует несколько способов. Прежде всего борьба с шумом в самом источнике: применение глушителей, замена железных ободов, применение упругих подвесов и т. д. Во-вторых, правильная планировка магистралей, цехов, создание защитных зон (особенно растительных) с учетом розы ветров (рис. 28) и т. д. Наконец, и это особенно важно, применение звукоизолирующих материалов, увеличивающих поглощение звука.

Очень часто, особенно во время отдыха, тишину леса разрывает шум многочисленных динамиков, включенных на полную мощность. Люди не слышат легкого и приятного шума леса, пения птиц. Отдых перестает быть полноценным.

В настоящее время принимаются решительные меры по борьбе с шумом со стороны государственных и общественных организаций.

О вибрациях

Широкое внедрение во все отрасли народного хозяйства машин, механизированных инструментов и оборудования повышает производительность труда. Однако работа многих механизмов связана с вибрациями, которые передаются человеку и оказывают на него вредное влияние.

Под ви б р а ц и я м и понимают колебания твердого тела около положения равновесия, при этом либо все тело колеблется как единое целое, не изменяя своей формы, либо колеблются частицы, составляющие тело.

Вибрации, как любой колебательный процесс, характеризуются частотой и амплитудой. Колебания, возникшие в каком-либо месте тела (например, руки рабочего, держащего отбойный молоток), распространяются по всему телу в виде упругих волн. Таким образом, в основе вибраций лежит колебательный процесс, а волновое движение — распространение этих колебаний по телу человека.

Что такое вибрационная болезнь?

Колебания, распространяясь по телу, вызывают в тканях организма переменные напряжения (сжатие, растяжение, сдвиг, кручение, изгиб), что при продолжительном воздействии может вызвать в организме стойкие нарушения нормальных физиологических функций — «вибрационную болезнь». Эта болезнь приводит к ряду серьезных нарушений в организме человека: сосудистые нарушения (особенно нарушение капиллярного кровообращения); функциональные нарушения центральной нервной системы, проявляющиеся в головной боли, нарушении сна, повышении утомляемости, раздражительности; расстройства вегетативной нервной системы, приводящие к изменению сосудистой реактивности, к нарушению проницаемости тканей и капилляров, к повышенному потоотделению и др.; костные нарушения; нарушение функций внутренних органов; изменения слухового анализатора и другие расстройства. Многие из вас испытали действие колебаний на свой организм во время качки парохода или самолета («морская болезнь»).

Как видите, вибрационная болезнь — это очень серьезное заболевание. Дело в том, что вибрационное воздействие испытывают очень многие люди различных специальностей: обрубщики, клепальщики, камнерезчики, бурильщики, формовщики, слеса-

ри-сборщики, шлифовальщики, вальщики и раскряжевщики леса, рихтовщики и др. Даже проводники железнодорожных вагонов подвержены влиянию этой болезни. Механизированные инструменты, являющиеся источниками вибрации, широко распространены в различных отраслях промышленности: горнорудной (перфораторы, отбойные молотки, горные сверла), лесной (моторные и электрические пилы, сучкорезки), машиностроительной (рубильные, клепальные молотки, зачистные, шлифовальные и полировальные машинки, сверлилки, гайковерты), в строительстве (отбойные молотки, бетоноломы). В учебнике по физике описано устройство и действие отбойного молотка. Действие вибраций на человека обуславливается многими факторами, среди которых наиболее важными являются параметры, характеризующие вибрации: частоты (спектр частот, основные частоты и др.), амплитуды, скорость, ускорение и энергия колебательных процессов, сложность колебательного процесса и т. д. Все эти характеристики являются физическими, и поэтому для изучения механизмов возникновения тех или иных видов болезненных нарушений, а также для разработки мер предупреждения вибрационной болезни нужно хорошо знать физику колебательных процессов.

Физика вибраций

Из школьного курса физики известно, что простое гармоническое колебание является движением, заданным уравнением смещения $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$, где λ — смещение (расстояние колеблющейся точки от положения равновесия в данный момент времени); A — амплитуда колебания (максимальное смещение); $\omega t + \varphi_0$ — фаза колебания, характеризующая положение колеблющейся точки в данный момент времени; φ_0 — начальная фаза, определяющая положение колеблющейся точки в момент начала отсчета времени. Графиком такого движения является синусоида.

Скорость движения колеблющейся точки (тела) также является периодической величиной и изменяется со временем по закону косинуса $v = v_A \cos \omega t$ (если $\varphi_0 = 0$, т. е. если $x = A \sin \omega t$), где v_A — амплитудное значение скорости. Колеблющаяся точка движется неравномерно, ускорение пропорционально смещению и направлено к положению равновесия $a = -x\omega^2 = -A\omega^2 \sin \omega t = -a_A \sin \omega t$, где ω — круговая частота (угловая скорость).

Таким образом, мы имеем уже три уравнения для характеристики колебательного движения: уравнение смещения $x = A \sin \omega t$; уравнение скорости $v = v_A \cos \omega t$, уравнение ускорения $a = -a_A \sin \omega t$. Уравнения скорости и ускорения можно пре-

образовать так, чтобы выразить их через положительное значение синуса: $\cos \omega t = \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, $-\sin \omega t = \sin(\omega t + \pi)$,

тогда

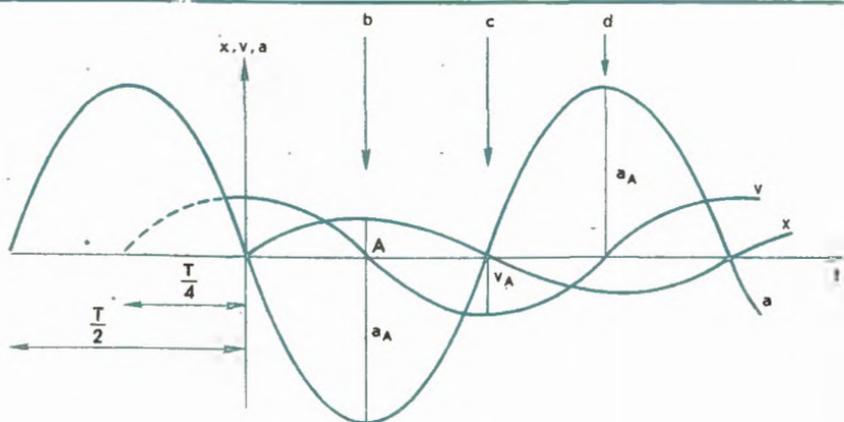
$$x = A \sin \omega t;$$

$$v = v_A \sin(\omega t + \frac{\pi}{2});$$

$$a = a_A \sin(\omega t + \pi).$$

Из приведенных уравнений видно, что x , v и a изменяются по одному и тому же синусоидальному закону, отличаются же они только начальной фазой и амплитудой. Отличие начальных фаз свидетельствует о том, что графики x , v и a смещены по фазе один относительно другого на $\frac{\pi}{2}$ (по времени на $\frac{1}{4}$ периода). Амплитудные значения x , v и a соответственно равны A , $A\omega$ и $A\omega^2$, т. е. амплитуда ускорения больше амплитуды скорости, которая во столько же раз (ω) больше амплитуды смещения. Сдвиги фаз между x , v и a и различие в амплитудах изображены на рис. 29. Значения x , v и a , направления их движения через положение равновесия и максимальные отклонения от него показаны на рис. 30. Эти изменения находят свое выражение и на графиках x , v , a на рис. 29 (сравните величину и направление этих величин по положениям b , c , d на рисунках 29 и 30). Мы рассмотрели кинематические характеристики колебательного движения. Для объяснения вибрационной болезни большое значение также имеет динамическая и энергетическая характеристика

Рис. 29. Сдвиг фаз, смещения, скорости и ускорения.



тики колебания. Простейшей колебательной системой является тело массой M , подвешенное на пружине с упругостью k (рис. 31). При изучении реакции организма на силовое воздействие, тело человека можно рассматривать как механическую систему, в которой масса отождествляется с массой работающих структур, а упругость — с мышечной напряженностью или упругостью тканей.

Если колеблющаяся система изолирована, то на нее (после выведения ее из положения равновесия) действуют внутренние силы: сила инерции $F_{\text{и}} = -Ma$ и сила упругости, которая, согласно закону Гука, в пределах деформации пропорциональна относительной деформации: $F_y = kx$; тогда $kx + Ma = 0$, или, если подставить значения x и a ,

$$kA \sin \omega t - \omega^2 M A \sin \omega t = 0.$$

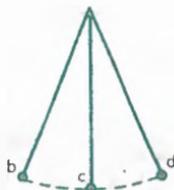
Из этого уравнения видно, что $k = M\omega^2$, откуда

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}}.$$

Эта формула показывает, что система, выведенная из положения равновесия и предоставленная самой себе, колеблется с определенной частотой, значение которой зависит только от свойств самой системы (k и M) и не зависит от того, каким образом система была приведена в движение. Эту частоту называют частотой свободных или собственных колебаний (ее часто обозначают ω_0).

Любая сложная система, в том числе и тело человека, имеет много собственных частот колебаний, и при определенных условиях vibra-

Рис. 31. Маятники на пружине.



СМЕЩЕНИЕ x	A	0	A
СКОРОСТЬ v	0	v_A	0
УСКОРЕНИЕ a	$-a_A$	0	a_A

Рис. 30. Смещение, скорость и ускорение колеблющегося маятника.

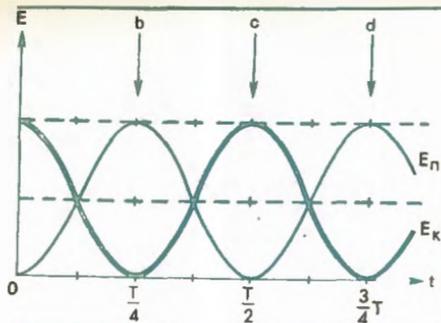


Рис. 32. График взаимного превращения $E_{\text{п}}$ и $E_{\text{к}}$ в колебательном движении.

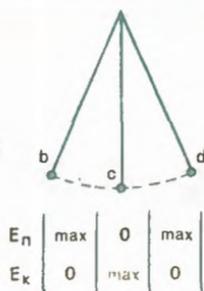


Рис. 33. График взаимного превращения $E_{\text{п}}$ и $E_{\text{к}}$ при колебаниях маятника.

ционного воздействия (например, при равенстве частот собственных и вынужденных колебаний, т. е. при резонансе) некоторые из этих частот могут оказывать существенное влияние на биологическое действие вибраций.

Рассмотрим энергетическую характеристику гармонического колебания. Кинетическая энергия колеблющегося тела

$$E_{\text{к}} = \frac{Mv^2}{2} = \frac{Mv^2_A \cos^2 \omega t}{2} = \frac{MA^2 \omega^2 \cos^2 \omega t}{2}.$$

Потенциальная энергия упруго деформированного тела:

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{MA^2 \omega^2 \sin^2 \omega t}{2}.$$

Тогда полная энергия колеблющегося тела:

$$\begin{aligned} E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} &= \frac{MA^2 \omega^2 \cos^2 \omega t}{2} + \frac{MA^2 \omega^2 \sin^2 \omega t}{2} = \\ &= \frac{MA^2 \omega^2}{2} (\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t) = \frac{MA^2 \omega^2}{2}. \end{aligned}$$

Наличие в формуле энергии колеблющегося тела суммы $\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t$, равной единице, показывает, что величина энергии в идеальном случае остается неизменной (когда нет потерь), однако происходит периодическое превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Эти изменения хорошо видны на рис. 32. На рис. 33 показаны значения $E_{\text{п}}$ и $E_{\text{к}}$ для колеблющегося маятника в положении равновесия и в положении максимального отклонения от него. Сравните эти величины на рис. 32 и 33.

Мы рассмотрели только случай, когда на колеблющуюся систему не действовали внешние силы. Для вибрации характерен другой случай, когда на систему в процессе колебания непре-

ривно действует внешняя, периодически изменяющаяся сила $F = F_A \sin \omega_1 t$. В этом случае система будет колебаться с частотой этой вынуждающей силы, т. е. колебания будут вынужденными. Эта вынуждающая сила уравнивается внутренними силами инерции и упругости:

$$F = F_{II} + F_y, \text{ или } F = Ma + kx;$$

$$F_A \sin \omega_1 t = MA\omega^2 \sin \omega t + kA \sin \omega t;$$

$$F_A \sin \omega_1 t = (M\omega^2 + k) A \sin \omega t.$$

Если $\omega = \omega_1$, т. е. частота вынуждающей силы станет равной частоте собственных колебаний системы (следует еще учесть силы сопротивления), то наступит резонанс, амплитуда колебаний при этом чрезвычайно сильно возрастает, что является опасным для прочности системы.

Рассмотренные нами вопросы только приблизили нас к решению задачи об анализе причин вибрационной болезни. Дело в том, что мы рассматривали простые колебания, в то время как вибрационные колебания, как правило, сложные колебания, т. е. колебания, совершающиеся одновременно с несколькими частотами.

Вибрации и гигиена труда

Физику вибраций приходится учитывать врачу, занимающемуся вопросами вибрационной болезни. Еще в большей степени физика вибрации нужна врачу-гигиенисту, занимающемуся профилактикой, предупреждением этого распространенного заболевания, его изучением, анализом, научным обоснованием допустимых параметров вибрации, участием в разработке мер снижения тех или иных параметров вибрации, в утверждении инструментов, механизмов, основанных на вибрациях и т. д. Поэтому врач-гигиенист, занимающийся вибрациями, должен в необходимом объеме знать соответствующие области медицины, физики, математики, техники...

Изучение и решение гигиенических проблем вибрации осложняется еще и тем, что действие вибраций, как правило, сопровождается одновременным действием на организм человека сопутствующих факторов — шум, охлаждение или нагревание организма, состояние опорно-двигательного аппарата, неудобная поза, различная степень напряжения мышц и др. Рассмотрение всех этих факторов в комплексе — очень сложная задача, решением которой занимаются ученые.

Звуки с частотой менее 20 гц — инфразвуки — не воспринимаются человеческим ухом. Однако они далеко не безразличны для человека.

Полвека назад в лондонском театре «Лайрик» ставили пьесу, по ходу которой действие переносилось из современности в глубокое прошлое. Все попытки режиссера, костюмеров, декораторов создать ощущение таинственности не увенчались успехом. Выход нашел присутствовавший на репетиции знаменитый физик Роберт Вуд. Он предложил воздействовать на зрителей низким, почти неслышимым звуком. Рассчитывая трубу, Вуд ошибся — звука не было совсем. Но хрустальные подвески на канделябрах старинного здания задрожали, все присутствующие почувствовали беспричинный страх. Даже возле театра на улице началась паника. Причиной ее был инфразвук.

В 1934 году русский психиатр М. Никитин наблюдал припадки эпилепсии, вызываемые звуками органа. Наряду с тонами музыки, которые хорошо различает ухо, появляются инфразвуки, вызываемые вибрацией органичных труб.

Установлено, что шум в полосе частот 2—15 гц интенсивностью 105 дб вызывает замедление зрительной реакции на 10% у половины людей, подвергнутых испытанию. Инфразвуки вызывают головную боль, повышают утомленность, снижают работоспособность. Колебания с частотой в 7 гц влияют на работу сердца.

Чем объяснить такое сильное действие инфразвуков? Физиологи регистрировали, как изменяются биопотенциалы в слуховом нерве при звуках различной частоты. Оказалось, что частота их изменения совпадает с частотой воздействующего звука. Это значит, что всякое колебание, проникающее в органы слуха, попадает в мозг. Низкочастотные сигналы, возможно, подавляют нормальные ритмы мозга и поэтому угнетающе действуют на психику.

Инфразвуки удивительно широко распространены в окружающей среде, и, как ни странно, большинство источников инфразвуков создано руками человека. Так, при движении легкового автомобиля со скоростью около 100 км/час возникает инфразвук с частотой 16 гц и громкостью 112 дб; двухместный вертолет на скорости 120 км/час генерирует инфразвук громкостью 118 дб на частоте 11,5 гц; а вблизи печи, работающей с поддувом воздуха, шум на частоте 7 гц достигает 115 дб!

Некоторые животные хорошо слышат низкие звуки, недоступные человеческому уху. Это удалось установить, применяя метод условных рефлексов. Если во время кормления животного подавать низкочастотный сигнал, животное постепенно привы-

кает к сигналу и будет реагировать на сигнал как на корм. Многие животные слышат звуки частотой 12 и даже 8 гц.

Эта особенность органа слуха животных дает возможность им «предчувствовать» бедствия. Достоверно известно: медузы узнают о приближении шторма за 10—15 часов и, словно спасаясь от сильных волн, заранее уходят из прибрежных вод в глубины моря. В японских домах разводят рыбок, которые за несколько часов до землетрясения начинают метаться по аквариуму. А глубоководные рыбы накануне бедствия выплывают на поверхность моря. И шторму, и землетрясению предшествует инфразвук, который и фиксируется животными.

Советские ученые уже создали аппарат, работающий по принципу инфразвукового уха медузы, который предсказывает приближение шторма задолго до того, как он разразится.

Если загадка прогнозирования землетрясений животными связана прежде всего с инфразвуком, то, очевидно, возможно создание приборов, рассчитанных на улавливание предшествующей землетрясению инфразвуковой «увертюры».

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ УЛЬТРАЗВУКА

Механические колебания, частота которых выше 20 000 гц, называются ультразвуками. Они, как и колебания звукового диапазона, распространяются в однородной среде с постоянной скоростью, равной скорости звука. Свойства отражения, преломления, дифракции, интерференции также присущи ультразвуковым волнам.

Однако очень большая частота ультразвуков придает им специфические свойства. Так, они сильно поглощаются воздухом и другими газами, меньше — жидкостями и твердыми телами. На границе между разнородными средами ультразвуковые волны интенсивно поглощаются и энергия их переходит в тепло.

Биологическое действие ультразвука связано, в основном, с его механическим, тепловым и физико-химическим действием.

Механическое и тепловое действие ультразвука

Механическое действие ультразвука на биологические объекты сводится, в основном, к следующему. Переменное звуковое давление в ультразвуковой волне может изменяться в пределах от +3 до —3 атм. Возникновение отрицательного давления приводит к возникновению внутри жидкости полостей, разрывов. Это явление, получившее название кавитации, приводит к ряду последствий: деполяризации макромолекул, специфическим химическим реакциям, ионизации, при больших интенсив-

ностях — к деструкции (нарушение структуры), разрыву ткани (тканевая кавитация).

При образовании стоячих звуковых волн в биологических объектах наблюдается ряд явлений: тепловые повреждения в узлах волны, разделение смесей и растворов на компоненты; возникают также электрические явления: разделяются ионы с различными массами, возникают периодические поля и разность потенциалов между узлами и пучностями. Установлено также, что ультразвук способствует нормализации и усилению обмена веществ, в частности, ускоряет процессы диффузии и осмоса.

Тепловое действие ультразвука может быть обусловлено тремя различными факторами. Во-первых, периодические сжатия среды приводят к адиабатическому повышению температуры. Во-вторых, на границе двух разнородных сред тепловой эффект возникает вследствие различий в характере движения частиц — обстоятельство, играющее важную роль в ультразвуковой терапии. Наконец, акустическая энергия ультразвуковой волны при поглощении превращается в тепловую. Поглощение звука обусловлено вязкостью и теплопроводностью среды, а также внутримолекулярным поглощением.

Ультразвук в терапии

В основе биологического действия ультразвука лежит его свойство поглощаться тканями человека и животных. Энергия поглощенных ультразвуковых волн тканями организма превращается главным образом в тепло. Тепловой эффект, производимый ультразвуком, может быть весьма значительным: при ультразвуковом облучении мощностью 4 вт/см^2 в течение 20 сек температура тканей организма на глубине 2—5 см повышается на $5\text{—}6^\circ$.

Биологическое действие ультразвуковых волн зависит от их интенсивности. Ультразвуковые волны малой (до $1,5 \text{ вт/см}^2$) и средней ($1,5\text{—}3 \text{ вт/см}^2$) интенсивности вызывают в живых тканях (живых средах) положительные биологические эффекты, стимулируют протекание нормальных физиологических процессов. Это свойство используется в биогенетике, селекции, а также в клинике при лечении хронических радикулитов, полиневритов, различных осложнений после повреждений суставов, связок, сухожилий, при лечении аллергических состояний — бронхиальной астмы, дерматозов. Ультразвуковые волны большой интенсивности ($3\text{—}10 \text{ вт/см}^2$) оказывают вредное воздействие на отдельные органы и человеческий организм в целом. Например, при длительном воздействии на человека ультразвуковых колебаний частотой 20—30 кгц, возникающих в производ-

ственных условиях, появляются расстройства нервной системы, повышается утомляемость, поднимается температура. Ультразвуки очень большой интенсивности вызывают нарушение передачи нервного импульса от одной нервной клетки к другой в области их стыков (сигналов), что приводит к ряду осложнений.

Очень интенсивные ультразвуки для человека смертельны. В Испании 80 добровольцев были подвергнуты действию ультразвука турбореактивных двигателей. Результаты этого варварского эксперимента оказались плачевными: 28 человек погибли, остальные оказались полностью или частично парализованными.

Ультразвуковые колебания уверенно и прочно вошли в клинику. Дозированным пучком ультразвука можно провести нежный массаж сердца, легких и других органов и тканей. В урологических клиниках с помощью механического действия ультразвуковых волн успешно дробят камни в мочевых путях и этим спасают больных от довольно тяжелых операций. Отоларингологи (специалисты по болезням уха, горла и носа) с помощью специально сконструированных приборов фокусируют ультразвуковые волны и воздействуют на барабанную перепонку, слизистую оболочку носа. Таким способом они научились лечить хронический насморк, болезни гайморовых полостей. Другие методы лечения оказываются при этих заболеваниях менее эффективными.

Успешно применяют ультразвуковые колебания в неврологических клиниках при лечении заболеваний периферической нервной системы, в частности хронических радикулитов, невритов, невралгии. Ультразвуки используются для лечения болезней суставов, позвоночника, дыхательных путей и других заболеваний.

Имеются данные о применении ультразвука в анестезиологии и реанимации (обезболивание и оживление).

Свойство ультразвука губительно действовать на вирусы, бактерии, грибки находит применение для стерилизации операционного материала, белья, хирургических инструментов.

Тепловой эффект, вызываемый ультразвуком, иногда бывает вредным. В этом случае вместо непрерывного облучения применяют импульсное. Так, если в секунду излучается 100 импульсов длительностью по 0,001 секунды, то ткань будет охлаждаться в течение 0,9 всего времени облучения. Это устраняет перегрев.

Ультразвуковые колебания малой мощности способствуют разрыхлению уплотненной ткани, рассасыванию различных рубцовых образований, солевых наслоений в суставах и полостях.

Следует отметить, что мы указали только на некоторые случаи применения ультразвуковых колебаний в клиниках. Им принадлежит большое будущее.

Хирургические инструменты, создаваемые веками, как правило изменяются незначительно. В качестве примера можно привести скальпель, прошедший через многовековую историю хирургии. Однако в последние десятилетия сделаны серьезные попытки к существенному изменению одного из главных хирургических инструментов. Оказалось, что придание ультразвуковых колебаний лезвию режущего инструмента снижает усилие, необходимое для рассечения ткани, уменьшает повреждение ткани, приостанавливает кровотечение, так как под действием ультразвука повышается свертываемость крови. Ультразвук в некоторой степени обезболивает операцию, ибо он «усыпляет» нервы. Ультразвук убивает микроорганизмы и их споры, а это стерилизует рану.

Удивительные результаты дает применение ультразвука в ортопедии и травматологии. Многие века врачи рассекали кость долотом, молотком, кусачками, пилой! Да — пилой! Она очень похожа на обыкновенную пилу для твердых пород дерева или металла. Эта пила наносила дополнительную травму, своими зубьями рвала костную ткань, делала работу хирурга очень тяжелой. Рассечение кости долотом и молотком мяло кость, повреждало значительную часть здоровой ткани, нанося ей ненужные дополнительные травмы.

Ультразвуковая «пила» — это «нож» с насечкой, которому сообщаются ультразвуковые колебания с частотами от 20 до 50 кгц. Зубья насечки движутся с размахом в 80 мкм, выбирая микрочастицы кости. Это позволяет проделать филигранную, мягкую работу. Кость можно рассечь так, как нужно, сделать распил любой формы. Операция проходит без особых усилий со стороны хирурга — работу выполняет ультразвук.

Электропила, которую применяли для этой цели, оказалась значительно хуже — она перегревает ткани, обугливает кость; при пользовании электропилой необходимо на широком пространстве освобождать кость от мягких тканей, в то время как ультразвуковая пила проходит в отверстие диаметром 1 см. Директор Центрального института травматологии и ортопедии академик АМН СССР М. В. Волков так сказал об ультразвуковой пиле: «Резка — это ни с чем не сравнимый, восхитительный метод».

Из ортопедической клиники ультразвук перешел в клинику торакальной хирургии, где производятся операции в грудной полости — на легких, сердце. Здесь он стал незаменим при гораздо более многосложных, «глубинных» полостных операциях. Именно здесь его возможности раскрылись в полном блеске и полноте. В 1971 г. академик Б. В. Петровский (министр здравоохранения СССР) сделал первую операцию с помощью ультра-

звука на грудной клетке. Теперь таких операций проведено очень много. При рассечении грудной клетки ультразвук позволил предотвратить нагноение, в пять раз снизить кровопотери, внести обезболивающий эффект.

Резка ультразвуком костей, в противоположность другим способам, отличается легкостью и маневренностью, возможностью манипулировать в труднодоступных для обычных хирургических инструментов местах. Она обеспечивает осторожное и вместе с тем радикальное удаление костных опухолей и гнойно-воспалительных очагов.

Ультразвук может быть не только режущим инструментом. С его помощью удастся соединять (сваривать) сломанные или рассеченные при операции участки костей, скреплять их с пересаженной костной тканью.

К преимуществам ультразвуковых методов относится также кратковременность операций. Рассечение мягких тканей и распиливание костей занимает в среднем около 4 мин, сварка длится 1,5—2 мин. Ультразвуковые колебания не передаются воздушной средой и потому не оказывают какого-либо вредного влияния ни на пациента, ни на хирурга. В живых тканях они также очень быстро поглощаются. Специальные эксперименты показали, что уже на расстоянии 7 мм от места контакта волновода и тканей колебания становятся практически неощутимыми. Заживление ран после ультразвукового распиливания и сварки совершается в обычные сроки. Так же нормально протекает процесс восстановления костной ткани.

В 1972 году за разработку и применение в клинической практике метода ультразвукового соединения после переломов, ортопедических и торакальных операций, воссоздания костной ткани при заболеваниях и дефектах костей, а также ультразвуковой резки живых биологических тканей группе советских ученых была присуждена Государственная премия.

Ультразвук на службе диагностики

Для ультразвуковой диагностики решающую роль играют не интенсивность звука, а длина волны, в частности малая длина волны. Ультразвуковые волны малой длины дают возможность, во-первых, создать остронаправленные пучки звука и, во-вторых, использовать отражение звука для обнаружения внутренних дефектов.

Для использования ультразвука с целью диагностики должен быть выполнен ряд условий. Прежде всего необходимо избежать дифракции на исследуемом объекте — отсюда и требования к длине волны. Кроме того, необходима постоянная связь между излучателем и объектом исследования, иначе энергия

излучения будет изменяться и результаты окажутся искаженными. Наконец, необходимо измерять энергию, выходящую из образца, — именно она и является носителем необходимой информации.

Преодоление этих трудностей и позволило применить ультразвук для диагностики.

Прежде всего используется так называемый «эхо-метод». Направляемые на тело исследуемого больного ультразвуковые импульсы отражаются от поверхностей раздела, например передней и задней стенок желудка, — «эхо» звука на экране осциллографа сравнивается с посланным импульсом, что дает возможность не только, например, обнаружить язву желудка, но и измерить толщину стенки. Такого рода рефлектоскопы обладают достаточно высокой чувствительностью: можно обнаруживать внутренние дефекты, отражающие лишь 5% падающей звуковой энергии. В двухразмерном рефлектометре — сонаре — пучок звука «прощупывает» внутренние органы по различным направлениям подобно радиолокатору, что позволяет исследовать значительные поверхности.

В дальнейшем были предприняты успешные попытки визуализации звука, т. е. получения его видимого изображения. Один из способов, примененный для «просвечивания» черепа звуком, заключается в следующем. С одной стороны черепа устанавливается излучатель ультразвука, с другой — приемник (кварцевая пластинка). Принятый кварцем сигнал усиливается и подается на неоновую лампочку, интенсивность свечения которой пропорциональна величине принятого сигнала. Затем зондируют череп, перемещая вдоль него излучатель и приемник, и одновременно протягивают мимо лампочки фотобумагу. После проявления на фотобумаге появляется теневое изображение опухоли, полости, инородного тела и т. д.

С помощью ультразвука можно регистрировать изменение объема сердца, размеры полости желудочка, амплитуду сокращений и толщину сердечной мышцы. Оказалось, что интенсивность звука, воспринятого кварцевым приемником, зависит от отношения длин акустического пробега в стенке сердца и в воздухоносной ткани легкого. Запись этой зависимости называется ультразвуковой кардиограммой.

Используя эффект «фокусированного» приема ультразвуковых колебаний, можно производить избирательный по глубине прием информации о движении структур сердца. Ультразвуковые диагностические приборы применяются уже довольно широко. С их помощью можно получить ультраграммы нормального желудка, грудной железы, сердца, костей, мышц, печени и т. д. Сравнивая ультраграмму органа пациента с ультраграммой здорового органа, врач ставит диагноз с достаточной степенью точности.

Преимущество ультразвукового «просвечивания» по сравнению

с рентгеноскопией («просвечивание» рентгеновскими лучами) состоит в том, что рентгеновские лучи дают изображение «твердых» тканей на фоне «мягких» (на фоне мягких тканей хорошо видны кости). Для рассмотрения мягких тканей на фоне мягких тканей (например, кровеносный сосуд на фоне мышц) сосуд нужно заполнить веществом, хорошо поглощающим рентгеновское излучение (контрастное вещество). Ультразвуковые волны, благодаря уже указанным особенностям, дают изображение без введения контрастных веществ. Ультразвуковые колебания довольно широко используются в медицинской практике. Однако поиски новых областей применения ультразвука в медицине продолжаются.

ФИЗИКА И КОСМИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

Достижение с помощью ракетных двигателей первой и второй космических скоростей положило начало освоению космического пространства. Первый этап освоения ближнего космоса — околоземного пространства — мог считаться завершенным только после выхода в космическое пространство человека.

При овладении космосом наряду с комплексом физико-технических задач возникли и другие специфические задачи, связанные с медико-биологическим обеспечением полета, породившие новую науку — космическую медицину.

Естественно, что разработка проблем космической медицины целиком относится к компетенции медицины, биологии, физиологии, психологии и т. д. Однако специфика космической медицины теснейшим образом связывает ее с физикой. По существу, главной задачей космической медицины является обеспечение нормальной жизнедеятельности человека в условиях, когда он подвергается в космическом полете воздействию целого ряда физических факторов.

Каковы же те физические факторы, воздействию которых подвержен космонавт? Основными из них являются: действие на организм перегрузок, состояния невесомости, вибрации, шума, радиации, изменение атмосферного давления, температуры.

Возникновение перегрузок и их действие на организм человека

При взлете и выходе на орбиту ракеты ее скорость увеличивается от нуля до первой космической скорости (порядка 28 000—30 000 км/час) за относительно небольшой промежуток времени — около 5 мин. Следовательно, на активном участке полета — взлет и посадка с работающими двигателями — возникают значительные ускорения.

Сама по себе скорость не оказывает на организм никакого действия. Вспомним, что согласно принципу относительности классической механики в равномерно и прямолинейно движущихся системах все процессы протекают точно так же, как и в неподвижных. Мы не замечаем ни орбитальной скорости Земли вокруг Солнца (108 тыс. км/час), ни скорости суточного вращения Земли (около 1000 км/час в наших широтах). Значит, опасаться следует не скорости, а ускорения.

Строго говоря, непосредственное действие на человека оказывает не само ускорение, а сила, в результате действия которой возникают ускорения. Поскольку, таким образом, речь должна идти только о силе, мы приходим к понятию перегрузки. На человека, стоящего на поверхности Земли, действует только одна сила — сила тяжести P и реакция поверхности Земли (по третьему закону динамики) на действие силы тяжести, приложенной к Земле. На активном участке полета — ускоренное движение! — к силе реакции Земли добавляется сила реакции на тягу двигателя F . Если для человека, стоящего на Земле, отношение $\frac{F+P}{P}$, равно единице, то для человека, испытывающего перегрузку, это отношение будет больше единицы. Отношение силы F , ускоряющей систему, к силе тяжести системы P :

$$N = \frac{F}{P},$$

и называется перегрузкой. Поскольку $F=ma$ и $P=mg$, то можно записать, что

$$N = \frac{ma}{mg} = \frac{a}{g},$$

и измерять перегрузку в единицах « g ». Например, выражение «перегрузка равна $3g$ » означает, что при ускорении на тело действует сила, втрое превосходящая вес тела. За время взлета космонавт движется с ускорением, величина которого изменяется от g до $7g$. На рис. 34 приведен метод обозначения направления ускорений. Он основан на определении действия инерционных сил.

Перегрузки, испытываемые космонавтом под действием ускорения, обозначают направлением смещения внутренних органов человека (показано стрелками). Здесь же приведена широко используемая система обозначения направления действия ускорений по смещению глазных яблок: 1 — ускорение вперед, глазные яблоки вдавливаются; 2 — ускорение вниз (к ногам), глазные яблоки смещаются вверх; 3 — ускорение вправо, глазные яблоки смещаются влево; 4 — ускорение назад, глазные яблоки выходят из орбит; 5 — ускорение вверх (к голове), глазные яблоки смещаются вниз; 6 — ускорение влево, глазные яблоки смещаются вправо.

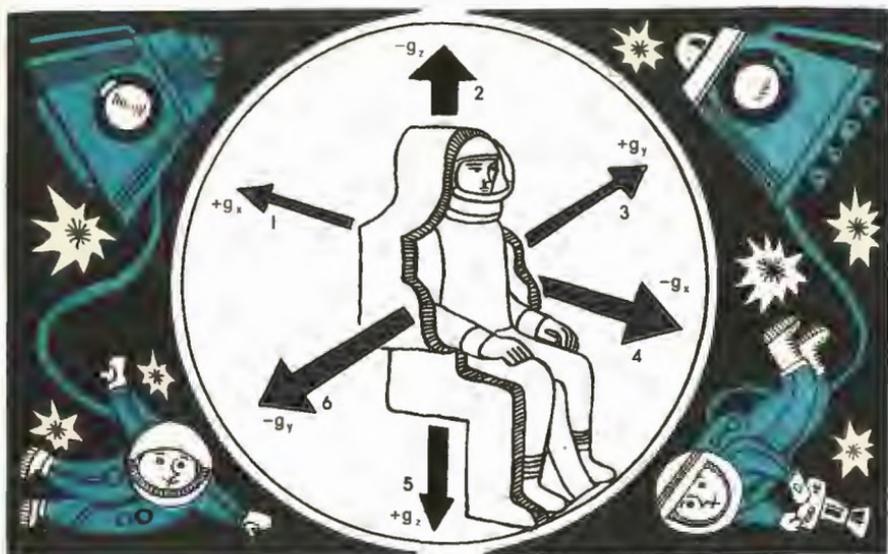


Рис. 34. Схема направлений и величин перегрузок космонавта.

Человек легче всего переносит перегрузки по оси $+g_x$. Далее, в порядке уменьшения выносливости следуют перегрузки в направлениях $-g_x$, $+g_z$ и $-g_z$.

Способность выносить перегрузки у различных людей различна; она зависит от скорости нарастания перегрузок, температуры окружающей среды, содержания кислорода во вдыхаемом воздухе, длительности пребывания в условиях невесомости и от эмоционального состояния человека. Перегрузки вызывают значительное ухудшение состояния организма человека: замедляется ток крови, снижается острота зрения и мышечная активность.

На рис. 35 показано, какие максимальные перегрузки может преодолеть человек, двигая головой и конечностями: а — поднять и опустить кисть руки; б — поднять и опустить предплечье; в — поднять и опустить всю руку; г — наклонить голову вперед и откинуть назад; д — передвинуть голень со ступней вперед и назад; е — поднять и опустить голень со ступней; ж — поднять и опустить всю ногу.

При перегрузке происходит замедление кровообращения. Давление крови у человека в норме на уровне сердца, — 0,12 ат, но так как голова на 30 см выше сердца, то при ускорении $4 g$ этого давления достаточно лишь для того, чтобы кровь могла дойти до головного мозга. Чтобы обеспечить кровоснабжение головного мозга при ускорении $8 g$, сердце должно увеличить напор крови более чем вдвое. При ускорении $5 g$, направленном

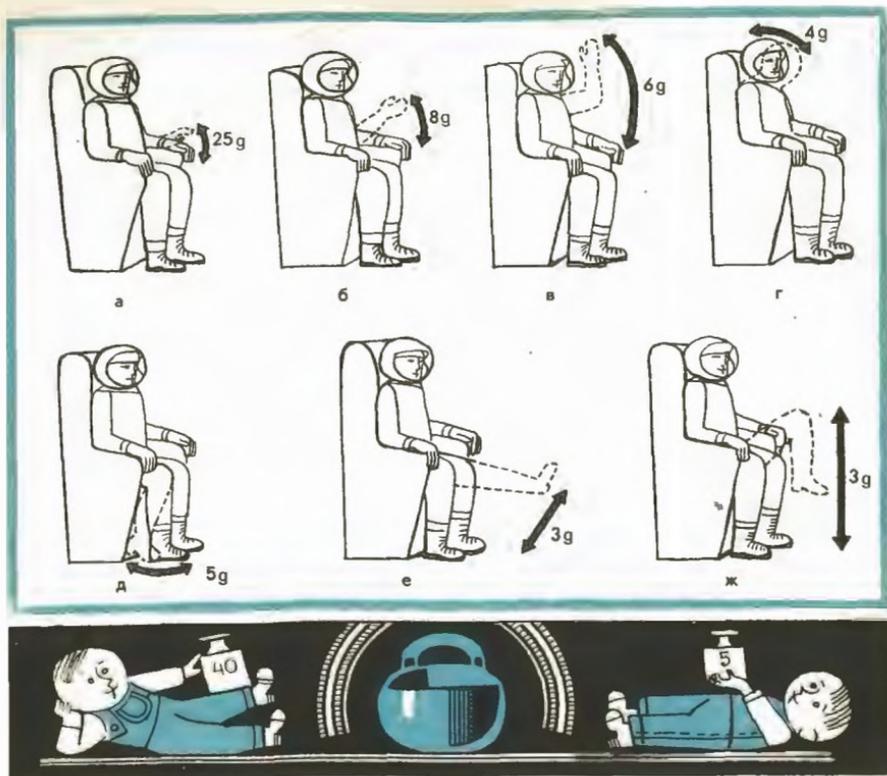


Рис. 35. Максимальные перегрузки при различных движениях космонавта.

по оси — g_z , кровь «утяжеляется» настолько, что сердце вообще не может гнать ее к голове, человек испытывает ощущение «черной пелены» перед глазами и теряет сознание. Если ускорение направлено в противоположную сторону, по оси $+g_z$, перед глазами встает «красная пелена» и наступает потеря сознания в результате прилива крови к голове. Уже при ускорении, несколько большем g , у космонавта могут появиться нарушения зрения. При продольном ускорении у космонавта могут наблюдаться зрительные галлюцинации.

Перегрузка и является первым основным физическим фактором, действующим на организм на активном участке космического полета. На первый взгляд это обстоятельство не сопряжено с большими трудностями: малые перегрузки, действующие длительный срок, могут обеспечить нарастание ускорений и, в итоге, — получение первой космической скорости. К сожалению, такой путь с технической точки зрения неприемлем: дли-

тельное преодоление поля тяготения Земли приведет к недопустимому увеличению расхода горючих материалов ракеты. Противоречие между объективными условиями динамики полета и субъективными требованиями физиологии организма разрешается космической медициной следующим образом: необходимо найти оптимальные условия для максимального ускорения, безопасного для организма, и одновременно разработать противоперегрузочные средства и методики.

Оказалось, что как с технической, так и с физиологической точки зрения оптимальной является перегрузка в $4g$ при длительности $4,5$ мин.

Коротко о невесомости

При достижении космической скорости на круговой или эллиптической орбите в момент выключения двигателей наступает состояние невесомости — сила тяжести скомпенсирована инерциальными силами, или, более строго, и ракета, и космонавт падают на центр притяжения с одинаковым ускорением и по одинаковым траекториям; естественно, что при этом они между собой не взаимодействуют. Поэтому можно сказать, что состояние невесомости соответствует состоянию свободного падения.

Медико-биологические исследования на советских и американских спутниках показали, что человеческий организм удовлетворительно переносит состояние невесомости, а незначительные нарушения вестибулярного аппарата, наблюдавшиеся у Г. С. Титова после первого длительного пребывания в невесомости, устраняются специальной системой тренировок, которую проходят все космонавты.

Действие вибраций

При запуске двигателей космического корабля и при их работе во время полета возникают вибрации и шум, вызывающие ощущение дискомфорта, раздражение, тошноту и другие неприятные ощущения (об этом уже шла речь раньше). Иногда появляется чувство тревоги и страха, удушья, боли в области живота и позвоночника, общего утомления, головной боли, зуда и глухоты. Вредное действие вибрации на организм человека имеет механическую природу в диапазоне тех частот, которые возникают во время космического полета.

Человеческое тело и его отдельные органы имеют собственные частоты, лежащие в том же диапазоне, что и частоты ракето-

носителей. Так, космический корабль «Аполлон» имеет основную резонансную частоту около 4,5 гц. После отделения двигателей первой ступени частота достигает 6 гц, а после отделения третьей ступени — около 9 гц. Собственная частота колебаний органов человеческого тела лежит в диапазоне от 3 до 12 гц. Когда корабль вибрирует на какой-нибудь из этих частот, вибрация органов человека вследствие резонанса увеличивается, эти органы деформируются, смещаются или теряют фиксацию, т. е. может произойти их механическое повреждение. В космических кораблях имеются устройства, смягчающие вибрации, толчки, тряску.

Действие шумов

Шумы, возникающие во время работы ракетных двигателей, пагубно сказываются на самочувствии космонавтов. Шум в 160 дб может вызвать разрыв барабанной перепонки и смещение слуховых косточек в среднем ухе, что приводит к необратимой глухоте. При 140 дб человек ощущает сильную боль, а продолжительное действие шума в 90—120 дб приводит к повреждению слухового нерва.

Конструкция космического корабля предусматривает изоляцию космонавта от вредных, но неизбежных шумовых эффектов.

Влияние снижения внешнего давления

Снижение внешнего атмосферного давления представляет серьезную опасность для космонавта. Уже при давлении ниже 267 тор (что соответствует высоте 8 км) развиваются «декомпрессионные расстройства», а при давлении в 40 тор нарушения становятся необратимыми. Борьба со снижением барометрического давления выиграна современной техникой с помощью систем герметизации кабин, специальных скафандров, гермошлемов и т. д. Установлено, что нормальная жизнедеятельность космонавта обеспечивается и при снижении барометрического давления до 500 тор. Оптимальное парциальное давление кислорода в кабине не должно превышать 420 тор — большие концентрации оказываются вредными. Соотношение между общим давлением и парциальным давлением кислорода регулируется химическим путем — с помощью регенерации.

Важнейшим физическим агентом является радиация, которой подвергается летящее в космосе тело, не защищенное, в отличие от Земли, толстым защитным слоем атмосферы. Основным источником излучения в околоземном космосе является Солнце, радиация которого содержит, кроме видимого света, и более жесткие электромагнитные волны — ультрафиолетовое и рентгеновское излучения, а также корпускулярное излучение — поток заряженных частиц высоких энергий. Наконец, ракета облучается космическими лучами, в основном протонами высоких энергий. Расчеты показывают, что суммарная мощность дозы излучения в космическом пространстве должна быть порядка 0,35 рентген за неделю, что значительно выше предельно допустимой дозы. Поэтому приходится, во-первых, обеспечивать кабину космонавта мощной радиационной защитой и, во-вторых, выбирать трассу полета таким образом, чтобы избежать встречи с радиационными поясами Земли — областями повышенной радиации.



Следует подчеркнуть, что значение физики для космической медицины не ограничивается изучением факторов, воздействующих на человека в космическом полете, и указанием путей обеспечения безопасности полета.

Исключительную роль играют физические методы в подготовке космонавта. Медико-биологические исследования связаны с широким использованием средств электрофизиологии; тренировка на перегрузку производится с помощью центрифуги; на координацию движений, ориентировку, равновесие — с помощью устройства, напоминающего карданов подвес, в котором можно производить одновременное вращение во всех трех плоскостях, и т. д.

Наконец, из нужд космической медицины появилась и быстро развивается целая область технической физики — биотелеметрия — комплекс физических устройств, дающих возможность вести наблюдения за состоянием организма космонавта на значительных расстояниях. Здесь на помощь врачу приходит радиоэлектроника.

Успешное преодоление всех трудностей, о которых речь шла выше, позволило врачам, биологам и физиологам разработать и осуществить медико-биологическое обеспечение космических полетов.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ И ДЫХАНИЕ

Вы уже знаете, что основным законом природы является закон сохранения энергии. Энергетические затраты организма человека покрываются за счет окисления белков, жиров и углеводов. Для окисления необходим кислород. Доставкой его занимаются органы дыхания. У человека эту функцию выполняют легкие. Ритмическое движение грудной клетки — это еще не дыхание. Сущностью дыхания являются окислительные процессы, которые лишь отдаленно напоминают горение. При обычном горении кислород непосредственно присоединяется к окисляемому веществу. При биологическом окислении белков, жиров или углеводов у них «отнимается» водород, который, в свою очередь, восстанавливает кислород, образуя воду.

Чтобы жить, необходимо снабдить кислородом каждую клетку организма. Большинство животных нашей планеты черпают кислород из атмосферы или извлекают кислород, растворенный в воде, используя для этого легкие или жабры, а кровь затем разносит кислород по всему организму.

Природа не сразу создала легкие и жабры. Первые многоклеточные живые организмы дышали всей поверхностью тела. Все последующие живые организмы хотя и приобрели специальные органы дыхания, но способность дышать кожей не утратили. Лишь животные, одетые в броню (черепахи, броненосцы, крабы и им подобные) не пользуются этой привилегией.

Газовые законы и дыхание человека

У человека в дыхании принимает участие вся поверхность тела — от самого толстого эпидермиса пяток до покрытой волосами кожи головы. Особенно усиленно дышит кожа на груди, спине и животе. Интересно, что по интенсивности дыхания эти участки кожи значительно превосходят легкие. Так, например,

с одинаковой по размеру дыхательной поверхности здесь может поглощаться кислорода на 28%, а выделяться углекислого газа даже на 54% больше, чем в легких.

Однако участие кожи в общем дыхательном балансе человека по сравнению с легкими ничтожно. Общая поверхность кожи у человека около 2 м², тогда как поверхность легких, если развернуть все 700 миллионов альвеол, микроскопических пузырьков, через стенки которых происходит газообмен между воздухом и кровью, составляет около 90—100 м², т. е. в 45—50 раз больше.

Напомним, что если в некотором объеме имеется смесь газов, не вступающих в химическую реакцию, то общее давление, производимое газом на стенки сосуда, равно сумме парциальных давлений (закон Дальтона):

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n,$$

где $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ — давления, производимые каждым газом, входящим в состав смеси (парциальный — частный от латинского слова *pars* — часть).

Человек дышит атмосферным воздухом, который состоит из кислорода — 20,94%, углекислого газа — 0,03%, азота и инертных газов (аргон и др.) — 79,03%. Состав же выдыхаемого воздуха иной: кислорода 16,3%, углекислого газа — 4% и азота 79,7%.

Рис. 36. Газообмен в легких:

1 — направление движения кислорода; 2 — направление движения углекислого газа; 3 — кровь в капилляре (область большой плотности углекислого газа); 4 — альвеольный пузырек легкого (область большой плотности кислорода).

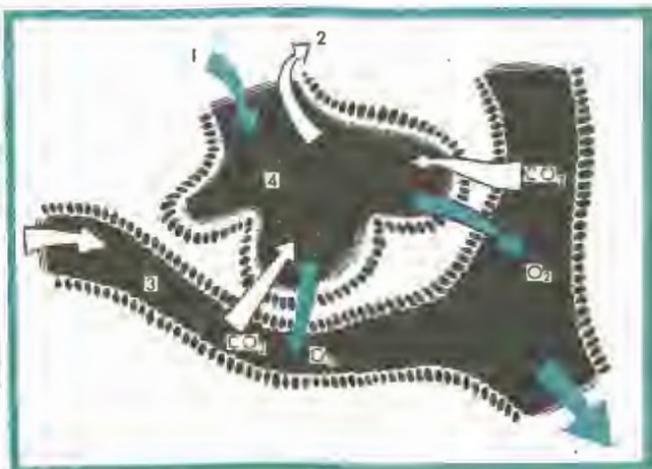




Рис. 37. Схема движения грудной клетки при дыхании:

1 — грудная клетка неподвижна; 2 — вдох: увеличение объема грудной клетки; 3 — выдох: уменьшение объема грудной клетки.

Парциальное давление кислорода в крови меньше, чем в воздухе, и он переходит из воздуха в кровь до тех пор, пока их парциальные давления не уравниваются.

Благодаря диффузии молекул газа через соприкасающиеся стенки альвеол легких и капилляров кровеносной системы происходит газообмен в легких (рис. 36).

Знание газовых законов помогает понять механизм легочного дыхания. С помощью межреберных мышц и диафрагмы осуществляется объемное расширение грудной клетки в трех направлениях: в вертикальном (купол диафрагмы становится более плоским), поперечном и переднезаднем (за счет движения ребер). При этом давление воздуха в легких падает ниже атмосферного: вследствие образовавшегося перепада давлений происходит вдох. Затем вследствие расслабления мышц объем грудной клетки уменьшается, давление в легких становится выше атмосферного — происходит выдох.

Обратно пропорциональная зависимость между объемом и давлением ($\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$ — закон Бойля—Мариотта) создает необходимые для вдоха и выдоха разности давлений атмосферного воздуха p_a и воздуха в легких p_l (рис. 37).

Важную роль в этих процессах играет плевральная полость, в которой в процессе дыхания возникают разрежения. Если хирургическим путем открыть наружному воздуху доступ в плевральное пространство, то атмосферное давление сожмет легкое, выключит

чив из процесса дыхания (пневмоторакс — один из методов лечения легочного туберкулеза).

Весьма важным показателем работы легких является их объем. Точно определить объем легких не так просто, это мы увидим ниже. Существует очень простой способ грубого определения объема легких по весу и росту человека, т. е. по данным, которые известны каждому человеку. Установлено, что у мужчин примерно 2500 см^3 , а у женщин 2000 см^3 объема легких приходится на 1 м^2 поверхности тела. Теперь можно оценить объем легких, если найти площадь поверхности тела по формуле Дубоиса:

$$S = 0,167 \sqrt{P l},$$

где S — искомая площадь тела в м^2 , P — вес в кг, l — рост в м. Если обозначить через V общий объем легких при наибольшем выдохе и максимальном вдохе, то

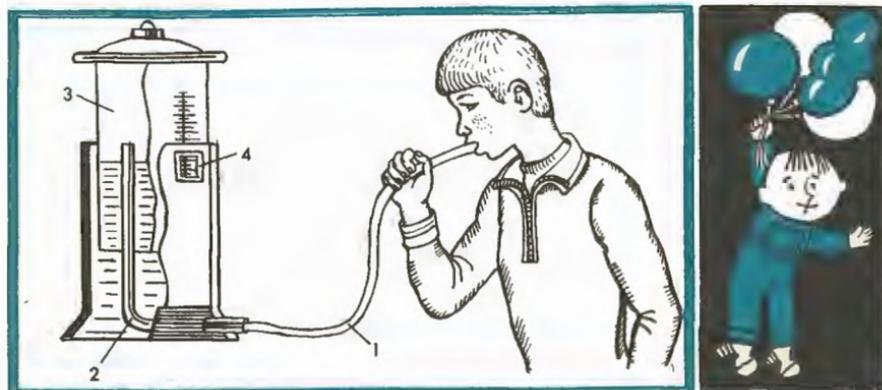
$$V = V_2 + V_3 + V_4 + V_5,$$

где V_2 — объем воздуха, выдохнутого спокойно после спокойного вдоха; V_3 — объем максимального выдоха после спокойного вдоха; V_4 — объем воздуха, постоянно находящегося в легких; V_5 — объем, который можно вдохнуть при самом большом вдохе после спокойного выдоха. Величина

$$V_1 = V_2 + V_4 + V_5$$

равна именно тому объему воздуха, который обменивается при одном цикле дыхания, и представляет наибольший интерес для медиков. Объем V_3 легко определить с помощью медицинского спирометра. Он представляет собой два полых цилиндра (рис. 38). Воздух, выдыхаемый через шланг 1 и трубку 2, попадает в цилиндр 3. По мере наполнения воздухом цилиндр 3

Рис. 38. Схема спирометра.



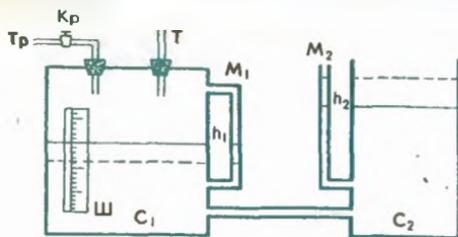


Рис. 39. Прибор для измерения объема легких.

остановятся на отметках h_1 и h_2 соответствующих манометров M_1 и M_2 .

Обозначим объем и давление в сосуде C_1 до и после выдоха соответственно через V' , p' и V'' , p'' . Тогда на основании уравнения газового состояния

$$p'V' = n'RT; \quad p''V'' = n''RT.$$

Обозначим искомый объем легких через V_x . Если этот объем содержит n_x граммолекул воздуха, то, очевидно, $n'' = n' + n_x$. Далее, температуру T_0 примем равной $35,5^\circ\text{C}$ ($308,7^\circ\text{K}$), а T измерим термометром.

Давление p' измеряется с помощью барометра, а $p'' = p' + h$ и величина давления столба воды $h = h_2 - h_1$ отсчитываются манометрами M_1 и M_2 .

Подставив во второе уравнение системы значение $n'' = n' + n_x$ и решив полученную систему относительно n_x , получим:

$$n_x = \frac{p''V'' - p'V'}{RT}$$

Наконец, подставив n_x и $p'' = p' + h$ в уравнение газового состояния для V_x :

$$p'V_x = n_xRT_0,$$

получим искомое выражение для объема легких:

$$V_x = \frac{T_0}{T} \left(\frac{p' + h}{p'} V'' - V' \right),$$

в котором все величины поддаются непосредственному измерению.

* T_0 — температура выдыхаемого воздуха, T — вдыхаемого.

Интересно, что природа для создания дыхательных органов у животных использовала кожные покровы и органы пищеварения. Совершенно удивительна дыхательная система насекомых. Все тело их пронизано системой сложноветвящихся трубочек. Даже мозг и тот изрешечен воздухоносными трахеями.

Трахеи, разветвляясь, уменьшаются в диаметре до тех пор, пока не станут такими тоненькими, что могут подойти буквально к каждой клетке тела; здесь нередко они распадаются на пучок уже совсем мельчайших трахеол диаметром меньше одного микрона, которые входят прямо в протоплазму клеток. Как видим, кислород у насекомых доставляется прямо к месту назначения. Особенно много трахеол в клетках, усиленно потребляющих кислород; в крупных клетках дыхательных мышц они создают целые сплетения.

Казалось бы, у насекомых удачно решена проблема дыхания. Однако струя воздуха, проходящего внутри организма насекомого, способна быстро его «высушить». Кроме того, на испарение жидкости затрачивается энергия, которую необходимо пополнять, чтобы не переохладиться. Чтобы это не произошло, отверстия трахей открываются лишь на очень короткий срок, а у многих водяных насекомых они вообще запечатаны. В этом случае кислород путем диффузии через покровы тела или жабры просачивается в воздухоносные пути и распространяется дальше по ним тоже путем диффузии. В средах, где процент кислорода намного меньше нормы, появилось дополнительное устройство — лабиринт — система очень сложно переплетающихся каналов и полостей, расположенных в расширенной части первой жаберной дуги. Такой лабиринт впервые был замечен у гурами *osphromenus olfas*, что в переводе с латинского означает «нюхатель обоняющий». Гурами непрерывно поднимаются к поверхности водоема и втягивают в себя воздух, как бы принимают. Все объясняется очень просто: жабры у гурами недоразвиты, и они дышат воздухом. Если поместить гурами в водоем, где есть много кислорода, но не дать возможности им всплывать к поверхности, лабиринтовые рыбки попросту «захлебнутся» и «утонут».

Знакомьтесь: физические легкие

Огромные водные просторы Земли давно привлекали внимание людей. Еще в древности люди предпринимали попытки проникнуть в их толщу. Появились кессон и водолазный костюм. Позже, уже в XX веке, появился акваланг —

автономный водолазный аппарат с баллонами сжатого воздуха или кислорода.

Примерно с такой же проблемой «столкнулись» животные. Некоторые из них предвосхитили путь людей в создании водолазных костюмов на несколько десятков миллионов лет. Легко растяжимый и очень длинный сифон, как настоящий водолазный шланг, имеют личинки эристалис. Живут они на дне водоемов, зарывшись в ил. Если водоем в этом месте очень мелок, личинки имеют возможность, не вылезая из ила, выставить на поверхность воды свой шланг и преспокойно дышать.

Предки водяных насекомых были наземными животными, поэтому они дышат только воздухом. При переселении в воду пришлось научиться делать запасы воздуха. У жуков-плавунцов эти запасы помещаются под надкрыльями, а у гладышей — на брюшке. Пузырьки воздуха удерживаются с помощью особых, не смачиваемых водой волосков. Отверстия дыхательной системы находятся в местах прикрепления воздушных пузырьков; из этих резервуаров и черпают насекомые необходимый для жизни кислород.

Особенно интересен водяной паук серебрянка. Тело его покрыто мелким несмачиваемым пушком. Когда паук погружается в воду, к телу его пристают мельчайшие пузырьки воздуха, покрывая все тело сплошной воздушной оболочкой. В воде эта оболочка блестит, и паук становится похож на живой шарик ртути. Кроме того, выставляя из воды кончик брюшка, паук забирает более крупный пузырек воздуха и, придерживая его задними лапками, отправляется в царство Нептуна.

Среди водных растений паук натягивает нити своей паутины. Сначала паутина имеет плоский вид, но по мере того как паук переносит под нее пузырьки воздуха, она начинает выпячиваться, принимая форму наперстка. Получается миниатюрный кессон. Сходство с аквалангом и кессоном чисто внешнее. Происходящие здесь процессы гораздо сложнее. Пузырьки воздуха, которые несут на себе насекомые, с одной стороны, являются запасными резервуарами, а с другой — помогают извлекать кислород из окружающей воды. Это приспособление даже получило специальное название — физические легкие.

В воде, как известно, растворены все газы, входящие в состав воздуха, в количестве, пропорциональном их концентрации в атмосфере. По мере того как насекомое дышит, концентрация кислорода в воздушном пузырьке уменьшается, и когда станет меньше 16%, в воздушный пузырек начинается диффузия кислорода, растворенного в воде. Таким образом, запас кислорода в пузырьке все время пополняется. Если расход кислорода небольшой (например, когда насекомое находится в состоянии покоя), физическое легкое может обеспечить потребность в кислороде в течение очень долгого времени. Если же расход кислорода велик, диффузия его из воды не может своевременно

восполнять потерю, процентное содержание кислорода в воздушном пузырьке резко уменьшается, а процентное содержание остальных газов (прежде всего азота) повышается и становится значительно больше, чем бывает обычно. Поэтому азот начинает растворяться в воде. Объем воздушного пузырька уменьшается за счет расхода части кислорода на дыхание и растворение азота в воде, насекомое вынуждено всплывать на поверхность для пополнения своих запасов.

В кипяченой воде физические легкие не работают, т. к. в ней нет растворенных газов и пополнять запасы кислорода неоткуда. Аналогичные процессы произойдут с физическими легкими, если они окажутся в воде, где растворен лишь чистый кислород, и в качестве запаса у насекомого в физических легких будет тот же кислород в чистом виде. Запаса хватит примерно на полчаса, ибо в таких условиях диффузия тоже не происходит.

ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА

Человек живет на Земле, $\frac{3}{4}$ которой — моря и океаны, еще $\frac{1}{5}$ часть суши покрыта водой в твердом виде — льдом и снегом. Все это обилие воды непрерывно испаряется. Поэтому в воздухе всегда есть водяные пары. Водяной пар — невидимка. Не путайте его с облаками, туманом — это уже сконденсировавшийся водяной пар, огромное скопление капелек воды.

Если в теплую комнату внести холодные металлические предметы, они сразу «запотевают». Водяной пар, имеющийся в воздухе, конденсируется на их холодной поверхности. Это явление используется для определения «точки росы» — температуры, при которой водяной пар из ненасыщающего переходит в насыщающий.

Иногда с явлением запотевания холодных предметов приходится бороться. Так, при осмотре голосовых связок больного врачу приходится пользоваться специальным сферическим зеркальцем. Это небольших размеров металлическое зеркальце на длинной ручке, которое вводится в полость рта. Влажность воздуха в ротовой полости 100%, поэтому зеркальце быстро запотекает. Чтобы этого не случилось, зеркальце предварительно нагревают в пламени спиртовки до температуры выше температуры тела человека. На нагретых поверхностях зеркала пар не конденсируется, и врач хорошо видит состояние связок больного.

Для жизни человека нормальной считается относительная влажность воздуха в пределах от 40 до 60%.

Выдыхаемый человеком воздух имеет практически 100-процентную влажность. Количество пара, которым насыщается воздух в легких, зависит от абсолютной влажности вдыхаемого воздуха. При увеличении абсолютной влажности атмосферного воздуха потеря воды организмом в процессе дыхания уменьшается. Хорошее самочувствие сохраняется при последующих сочетаниях температуры и влажности воздуха:

Температура воздуха (°С)	Относительная влажность (%)
20	85
25	60
30	44
35	33

Из этой таблицы мы видим, что высокие температуры легче переносить при сухом воздухе. Однако все имеет предел. Если влажность меньше 20%, испарение влаги со слизистых оболочек дыхательных путей увеличивается. Это вызывает неприятное ощущение сухости во рту и в носу, растрескивание губ. Нарушение целостности слизистой оболочки уменьшает ее защитное действие как фильтра, преграждающего путь микробам и пыли. Однако при некоторых заболеваниях сухой воздух имеет лечебное значение. Так, в одном из самых сухих районов страны — Байрам-Али в Средней Азии, где количество осадков не превышает 200 мм в год, лечат заболевания почек. В таком климате почки в значительной степени освобождаются от работы и их функцию принимает на себя кожа, обильно испаряющая влагу.

При повышенной влажности воздуха жара переносится значительно тяжелее. При температуре 25—35° в безветренную погоду пот не успевает испаряться с поверхности тела в насыщенный влагой воздух. Он стекает вдоль тела, как говорят, льет ручьем. Спасительного эффекта охлаждения кожи не наблюдается. В таких условиях может возникнуть тепловой удар — значительное перегревание организма.

При низких температурах повышенная влажность воздуха тоже вредна. Так, при температуре воздуха, близкой к 0°С, и высокой относительной влажности происходит резкое повышение тепло-

отдачи организма за счет дополнительных затрат не только на обогревание тела, но и на просушивание отдельных открытых поверхностей кожи. Это приводит к дальнейшему охлаждению организма, что может привести к простуде, обморожению, рецидивам ревматизма, бронхиальной астмы.

Повышенная влажность воздуха замедляет заживление переломов. Наблюдения показывают, что при высокой относительной влажности тормозится развитие первичной костной мозоли, замедляется прорастание сосудов первичной костной мозоли и в ряде случаев это приводит к образованию несросшихся переломов.

КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ЖИДКОСТИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

Их жизнь связана с поверхностным слоем воды

Для жизнедеятельности многих животных большое значение имеют свойства поверхностного слоя жидкости.

Водомерки живут только на поверхности воды, никогда в нее не погружаясь и не выходя на сушу. Они не способны нырять или плавать и умеют лишь скользить по водной глади на своих широко расставленных лапках, как на лыжах. Воды касаются только самые кончики лапок, густо покрытые волосками, не смачиваемыми водой. Поверхностная пленка прогибается под тяжестью водомерок, но никогда не рвется.

Личинки комаров, водяные жучки, различные улитки подвешиваются к водяной пленке снизу. Улитки не только держатся за нее, но могут по ней ползать не хуже, чем по поверхности любого твердого тела.

Поверхностный слой и удивительные свойства жидкостей

Из курса физики вы помните, что поверхностный слой жидкости находится в специфическом состоянии натяжения и оказывает на жидкость громадное давление, делая ее практически не сжимаемой. Эти обстоятельства придают жидкостям вообще и воде в частности некоторые удивительные свойства: так, чтобы разорвать столбик воды диаметром 2,5 см, нужно приложить силу около 9000 н. Примерно такая же прочность у некоторых сортов стали! Однако и это не предел. Подсчитано, что для разрыва такого же столбика абсолютно чистой воды нужна сила 950 кн.

Поверхностный слой жидкости является причиной закупорки сосудов, по которым движется жидкость, если в сосуд попадает воздушный пузырек (воздушная пробка). Небольшой пузырек воздуха в капиллярах может остановить поток крови. Не трудно себе представить исход, если «закупоренным» окажется сосуд головного мозга: может наступить смерть.

Чем объяснить, что пузырек воздуха, попав в кровеносный сосуд, способен остановить поток крови? «Виновны» в этом силы поверхностного натяжения крови.

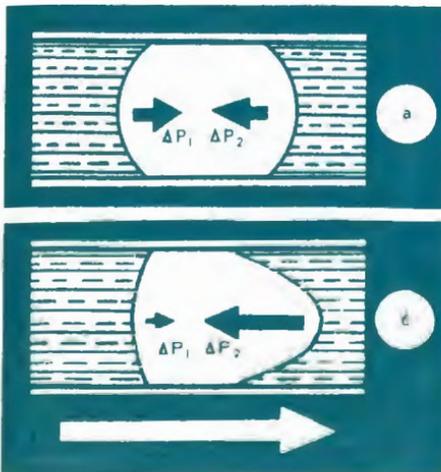
Рассмотрим воздушный пузырек в сосуде в случае неподвижной жидкости (рис. 40, а). Сферичность поверхности жидкости вызовет добавочные давления Δp_1 и Δp_2 , равные по величине и противоположные по направлению, т. к. $\Delta p = \frac{2\sigma}{r}$, а σ и r одинаковы с обеих сторон пузырька.

Что изменится, если жидкость будет двигаться? Ведь кровь не может не двигаться по сосудам! Из рис. 40, б видно, что кривизна поверхностей изменилась: левая сторона пузырька под напором жидкости выравнивалась, кривизна уменьшилась, радиус кривизны увеличился; правая сторона под действием давления газа искривилась сильнее: кривизна увеличилась, радиус кривизны уменьшился. Коэффициент

поверхностного натяжения жидкости слева и справа одинаков, но слева радиус кривизны больше, поэтому $\Delta p_1 < \Delta p_2$. Однако Δp_2 направлено против тока жидкости и поэтому в капиллярах, где радиус сосуда мал, этой силы окажется достаточно, чтобы остановить движение жидкости. Особенно опасно это в местах разветвлений капилляров (рис. 41), так как здесь в каждом разветвлении возникает давление Δp_2 , направленное против тока крови.

Газ может попасть в кровеносную систему несколькими путями — травма сосудов, внутривенные вливания (если перед инъекцией не

Рис. 40. Силы поверхностного натяжения, действующие на пузырек газа в капилляре.



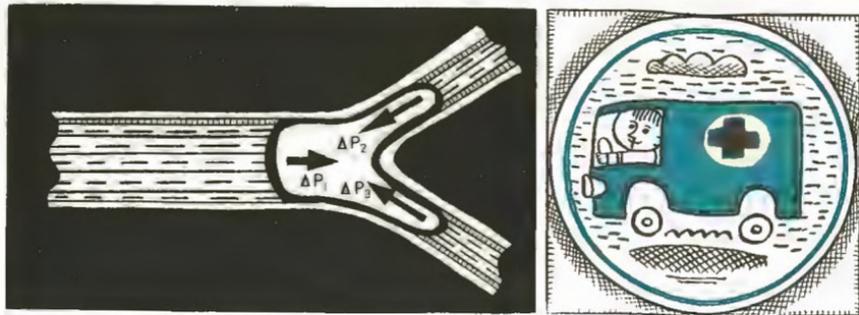


Рис. 41. Пузырек газа на разветвлении капилляров.

удалить из иглы газ), резкое уменьшение давления (при быстром подъеме водолаза газ, растворенный в крови, выделяется и может образовать пузырьки).

Некоторые примеры капиллярных явлений в природе

Не менее важными для жизни животных, растений, человека являются капиллярные явления. Как известно, стволы деревьев, ветви растений пронизаны огромным количеством капиллярных трубочек, по которым питательные вещества поднимаются до самых верхних листочков.

Все тело удивительной колючей ящерицы молох (рис. 42),

Рис. 42. Ящерица молох.



жительницы жарких безводных пустынь Австралии, покрыто острыми выростами и шипами. Долгое время считали, что колючки служат ящерице лишь для защиты от врагов. Теперь выяснилось, что они имеют и другое, очень важное назначение. Роговой слой молоха пронизан бесчисленными порами, которые открываются наружу в бороздах между колючками. Если на кожу ящерицы капнуть каплю воды, она тотчас же впитывается в поры.

Система капиллярных пор заканчивается в небольших подушечках в уголках рта ящерицы, куда и собирается вода. Молоху стоит подвигать челюстями, и из каждой подушечки прямо в рот выдавится по капле влаги. Пить ящерице не нужно. Даже если ящерица встретит в пустыне источник, ей достаточно окунуться. Так быстрее, и в кожу воды попадает больше, чем ящерица могла бы выпить. В коже создается как бы склад воды. К тому же колючки молоха значительно холоднее кожи, поэтому на них оседают мельчайшие капельки росы, тотчас же впитываясь в кожу. Молох «сосет» воду прямо из воздуха!

ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ И ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Все стороны деятельности клетки осуществляются на основании энергетических затрат. Единственным источником жизни в организме является энергия, заключенная в химических связях молекул жиров, белков и углеводов, поступающих в организм с пищей. В результате окислительных процессов происходит ступенчатое освобождение этой энергии, а затем часть ее рассеивается в виде тепла, а часть — накапливается в виде микроэргетических связей (это происходит в молекулах АТФ — адезинтрифосфорной кислоты).

Энергетические процессы живого организма происходят в строгом соответствии с первым началом термодинамики.

Первое начало термодинамики

Из курса физики известно, что работа и теплота являются единственно возможными формами передачи энергии от одного тела к другому, а выполненная работа и переданное телу количество теплоты однозначно определяют изменение энергии тела в любом процессе. Иначе говоря, если мы сообщим телу (системе) некоторое количество теплоты ΔQ , то оно может пойти только на увеличение внутренней энергии ΔE тела (системы) и на совершение телом (системой) работы ΔA против внешних сил, т. е. $\Delta Q = \Delta E + \Delta A$.

Первое начало термодинамики является законом сохранения энергии и поэтому всеобщим законом природы, т. е. законом, действие которого распространяется и на живые организмы.

Рассмотрим первое начало применительно к некоторым изо-процессам. Так, при изотермическом процессе, когда $T = \text{const}$, внутренняя энергия не изменяется ($E = \text{const}$), поэтому $\Delta E = 0$. В этом случае $\Delta Q = \Delta A$, т. е. при изотермических процессах вся подведенная к телу (системе) теплота идет на совершение телом (системой) работы против внешних сил.

При адиабатическом процессе не происходит теплообмена — $\Delta Q = 0$, тогда $\Delta A = -\Delta E$. При адиабатическом процессе тело (система) совершает работу за счет уменьшения своей внутренней энергии.

Живой мир и первое начало термодинамики

Благодаря терморегуляции температура тела человека и теплокровных животных поддерживается постоянной (в определенных пределах). Существенной частью терморегуляции является теплообмен с окружающей средой. Теплообмен, как любая передача теплоты, осуществляется с помощью теплопроводности, конвекции, испарения и лучеиспускания (поглощения). Очень многие факторы влияют на теплообмен человека с окружающей средой: состояние окружающей среды (влажность, температура, ветер и др.), состояние самого человека (покой или подвижность, возбужденность), наличие и качество одежды и др.

Многочисленные эксперименты, проведенные физиологами, убедительно доказали: живые организмы подчиняются первому началу термодинамики — закон сохранения энергии справедлив и для живого мира. Биофизические опыты над собакой в биокалориметре описаны в школьных учебниках, поэтому мы на этом останавливаться не будем, а приведем данные, иллюстрирующие приход и расход энергии человеческим организмом в одном из экспериментов. В левом столбике — приход, в правом — расход энергии:

56,8 г белка	— 995,4 дж	Потеря тепла	— 5770,8 дж
137,0 г жира	— 5489,4 дж	Испарение	— 1713,6 дж
79,9 г углеводов	— 1407,0 дж	С выдыханием воздуха	— 180,6 дж
		С испражнениями	— 96,0 дж
Итого	7891,8 дж	Итого	7761,0 дж

При изотермическом процессе внутренняя энергия организма должна быть постоянной, это условие выполняется в организме достаточно хорошо, если пренебречь ростом организма. Но тогда и теплопродукция организма — приток энергии — должна равняться потере энергии в различных ее формах.

Теплопродукция обусловлена биохимическими реакциями, в результате которых освобождается энергия, связанная в пище. Необходимо, однако, учесть, что энергетически используемая доля пищи никогда не приближается к 100% — часть продуктов заменяет ткани, другая затрачивается на рост, третья откладывается в организме (жир, гликоген в печени и т. д.). Поэтому нельзя считать, что вся усваиваемая организмом пища идет только на покрытие текущих энергетических расходов. С этими оговорками проиллюстрируем теплоотдачу (потерю тепла) организма с помощью данных, полученных в лабораторных условиях:

на дыхание и испарение воды	1,3%	тепла
на работу внутренних органов и систем	1,88%	»
на нагревание выдыхаемого воздуха	1,55%	»
на испарение воды с поверхности кожи	20,67%	»
на нагревание окружающего воздуха	30,85%	»
на лучеиспускание	43,75%	»

Как видно из этой таблицы, организм теряет тепло главным образом через кожу. Если температуру, свойства кожи и некоторые другие факторы считать неизменными, то потеря теплоты окажется прямо пропорциональной величине поверхности организма. Энергия, получаемая за счет поглощаемой пищи, должна восполнять в основном как тепло, потерянное через поверхность, так и энергию, которую мы расходует при движении. Таким образом, минимальное количество пищи должно быть прямо пропорциональным поверхности.

Мы уже путешествовали с вами в сказочную страну великанов, созданную Джонатаном Свифтом. Теперь наш путь в не менее интересную страну — Лилипутию. Если размеры живого организма уменьшаются в 12 раз (как это было бы в стране Лилипутии), то лилипуту с такой же температурой, как у обычного человека, потребуется пища в объеме, составляющем $(1/12)^2$ обычного рациона человека (пропорционально поверхности). Однако объем самой пищи уменьшится в $(1/12)^3$ раз, поэтому лилипуту понадобится в 12 раз больше пищи (по отношению к своим размерам), чем человеку нормальных размеров. Обитатели страны Лилипутии всегда должны были бы испытывать чувство голода и жажды.

Нечто подобное мы можем встретить у мелких млекопитающих например у мышей. Указанные выше причины объясняют тот факт, что совсем маленьких теплокровных животных нет — они не смогли бы запастись и переварить необходимое для их суще-

ствования количество пищи. Многие животные имеют очень небольшие размеры (например, насекомые), но температура их тела не выше температуры окружающей среды—в этом случае не нужно компенсировать пищей потерю тепла через кожу в окружающую среду.

Теплопроводность. Теплопроводность биологических тканей

Теплопроводность характеризуется уравнением

$$Q = k \frac{t_2 - t_1}{l} S \tau.$$

Это уравнение легко понять, если представить себе причины, от которых зависит количество теплоты, передаваемое из комнаты на улицу через стенку дома в зимнее время. Здесь Q —количество теплоты, переданной телом (стенкой). Оно, естественно, зависит от теплопроводных свойств материала, из которого изготовлена стенка, — кирпич, бетон, дерево и т. п. В формуле это отражено коэффициентом теплопроводности k . Количество переданной теплоты также будет зависеть от разности температур $t_2 - t_1$, где t_2 — температура в комнате, t_1 — на улице. Естественно, что чем больше $t_2 - t_1$, тем больше будет передаваться теплоты; если же окажется, что $t_2 = t_1$, т. е. $t_2 - t_1 = 0$, то $Q = 0$. Чем толще стенка, тем меньше передается теплоты, поэтому l — толщина стены — стоит в знаменателе. Однако чем больше площадь стены S и время τ , в течение которого происходит теплопередача, тем больше тепла передает стенка из комнаты на улицу.

Мы рассмотрели пример со стенкой комнаты. Эти рассуждения остаются справедливыми для любого тела, передающего тепло.

Величина $\frac{t_2 - t_1}{l}$ называется температурным градиентом, обозначается $\text{grad } t$ и показывает перепад температуры, приходящийся на единицу толщины теплопроводящего тела. Коэффициент теплопроводности

$$k = \frac{Q}{\frac{t_2 - t_1}{l} \cdot S \cdot \tau}, \quad \text{или} \quad k = \frac{Q}{\text{grad } t \cdot S \cdot \tau}$$

численно равен количеству теплоты, которое проходит за единицу времени через площадку тела, равную единице, при температурном градиенте, равном единице. Размерность k в системе СИ:

$$[k] = \left[\frac{Q}{\frac{t_2 - t_1}{l} \cdot S \cdot \tau} \right] = \frac{\text{дж}}{^\circ\text{К} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}}$$

Очень часто пользуются относительным коэффициентом теплопроводности: он равен отношению коэффициента теплопроводности данного вещества к коэффициенту теплопроводности воз-

духа. Относительный коэффициент теплопроводности $\frac{k_{\text{вещества}}}{k_{\text{воздуха}}}$ показывает, во сколько раз теплопроводность данного вещества больше теплопроводности воздуха. В приведенной ниже таблице указаны относительные коэффициенты теплопроводности биологических тканей.

Ткань	$\frac{k_{\text{ткань}}}{k_{\text{воздуха}}}$
Кости	4,45
Мышцы	2,83
Сухожилия	1,92
Жировая клетчатка	1,38

Теплопроводность играет существенную роль в жизнедеятельности организма, в частности способствует выравниванию температур в различных его частях, оставляя небольшой градиент между поверхностью кожи и внутренними органами и тканями. Как видно из таблицы, жировая клетчатка обладает малой теплопроводностью, что ограничивает потерю тепла организмом в окружающую среду. Здесь большое значение имеет уменьшение обмена в поверхностном слое, что достигается у животных с помощью волосяного покрова, у человека — применением одежды. Такие покрытия образуют воздушную прослойку, обладающую низким коэффициентом теплопроводности.

Из сказанного ясно, что тепловой баланс организма поддерживается с высокой точностью и в полном соответствии с законом сохранения энергии (первым началом термодинамики). Разумеется, при этом следует учитывать, что, во-первых, часть производимой организмом тепловой энергии может превращаться в другие виды энергии (например, в механическую) и, во-вторых, поскольку организм принимает пищу с известной периодичностью, энергетический баланс может испытывать некоторые отклонения от среднего значения. Колебания такого рода незначительны, и в целом организм не переохлаждается и не накапливает теплоту.

Терморегуляция организма обеспечивает относительное постоянство температуры тела теплокровных животных и человека. Химическая терморегуляция в основном связана с теплообразованием, физическая — с отдачей теплоты в окружающую среду.

Физическая терморегуляция осуществляется путем теплопроводности, конвекции, излучения и потери теплоты при испарении. Соотношение между ними зависит в основном от параметров среды, окружающей тело, — температура, влажность, движение воздуха и др.

Потеря теплоты путем теплопроводности и конвекции в обычных условиях происходит через воздух. И хотя воздух обладает очень малой теплопроводностью, количество отдаваемой через воздух теплоты значительно увеличивается за счет конвекции. Кроме того, конвекция способствует потере тепла за счет испарения влаги с поверхности кожи.

Потеря теплоты путем излучения происходит главным образом с наружной поверхности одежды и некоторых открытых участков поверхности тела. Больше всего тепла человек теряет путем излучения с открытых частей тела. Так, при температуре 18°C раздетый человек теряет каждую секунду путем излучения около 20 кал, если же он одет в хлопчатобумажную ткань, то потери уменьшаются до 8 кал/сек.

Испарение происходит с поверхности кожи и легких. В среднем в сутки человек выделяет с выдыхаемым воздухом около 350 г водяного пара. С поверхности кожи (при температуре воздуха 16—18°C) в сутки испаряется в среднем около 500 г пота. Это составляет в целом потерю $2 \cdot 10^6$ дж (433 ккал) теплоты.

Капля пота, испарившаяся на коже, поглощает такое количество тепла, которого было бы достаточно, чтобы нагреть две другие капли до температуры кипения. Следовательно, испарение пота охлаждает тело. Поверхность кожи усеяна отверстиями потовых желез. На 1 см² поверхности кожи приходится около 90 потовых желез, на подошве ног и на ладонках рук их гораздо больше. Потовые железы, подобно кровеносным сосудам, контролируются центральной нервной системой. Если кровь, снабжающая эти нервные центры, становится теплее, чем нормальная температура тела, то нервные клетки этих центров возбуждаются и посылают приказы, которые приводят в действие потовые железы.

Чем горячее и суше воздух, тем быстрее происходит испарение и тем скорее охлаждается тело. Потеря жидкости из тела при потении вызывает чувство жажды: кочегар парохода потребляет за смену до 24 стаканов жидкости.

Если окружающий теплый воздух (около 37°C) содержит большое количество водяных паров, то: 1) пот не будет испаряться и поэтому не будет охлаждать тело; 2) в горячем, насыщенном водяными парами воздухе тело будет поглощать тепло гораздо сильнее, чем в сухом, т. к. влажный воздух является лучшим проводником тепла, чем сухой. Очень скоро наступает момент, когда теплорегулирующий механизм человека расстраивается и происходит «тепловой удар». Ткани мозга перестают работать, когда температура повышается до 40,5°C; если температура поднимается еще выше — жизни человека грозит смертельная опасность, ибо мозг при такой температуре может подвергнуться деструктивным изменениям.

Некоторые животные научились регулировать количество получаемого тепла. У многих земноводных и пресмыкающихся в коже есть специальные пигментные клетки, способные изменять свой размер. Когда пигментные клетки малы, цвет кожи остается светлым и она отражает солнечные лучи. При расширении пигментных клеток окраска кожи резко темнеет и тело животного нагревается только до чувствительного предела. При малейшем перегреве пигментные клетки вновь уменьшаются. Иначе этот процесс регулируется у перламутровки. Бабочка живет при температуре 35°C. Основной тепловоспринимающей поверхностью ей служат крылья. Наиболее сильное нагревание происходит, когда крылья полностью раскрыты и направлены перпендикулярно к солнечным лучам. Чем меньше угол облучения, тем нагревание меньше.

Все живое значительно легче приспосабливается к холоду, чем к теплу. Чтобы не замерзнуть, у теплокровных есть много приспособлений. Когда температура воздуха понижается, начинают действовать механизмы, усиливающие теплоизоляцию организма. В первую очередь сжимаются кожные сосуды, кожа становится холодной и меньше отдает тепла. Шерсть и перья встопорщиваются, между шерстинками задерживается больше воздуха, и теплоотдача уменьшается. Кстати, «привычка» животных топорщить перья и волосы сохранилась и у человека: когда он мерзнет, у него появляется «гусиная» кожа, причем остатки волос, сохранившиеся еще на коже тела человека, становятся дыбом (но теплее от этого, конечно, не становится).

Если принятые меры не дали результатов и охлаждение продолжается, возникает дрожь. Она совсем не бесполезна: мышечные сокращения сопровождаются выделением значительного количества тепла. Дрожать умеют только теплокровные, зато к работе мышц прибегают многие. Насекомые не могут летать, пока не согреются. Бабочка Ванесса в этом случае машет крыльями и даже в прохладную погоду при температуре 10°C за несколько минут согревается до 35°C, а во время полета — до 37°C, совсем как теплокровные.

При работе мышц выделяется значительное количество тепла,

но этого мало. Природе необходимо было позаботиться и о сохранении тепла в организме.

Тело китов и тюленей, например, завернуто в слой жира, в котором кровеносные сосуды развиты очень плохо. Через слой жира эти животные почти не отдают тепла. Совсем другое дело плавники и ласты. Жиром они не защищены, а кровеносная система здесь развита очень сильно. Горячая кровь, поступая в конечности, выносит через эти естественные проходы большое количество тепла.

Ластоногие не могли бы существовать, не будь у них одного замечательного приспособления. Крупные артерии оплетены густой сетью мелких вен, по которым охлажденная на периферии кровь возвращается обратно в сердце. Благодаря этому артериальная кровь еще до того, как попасть в мышцы, отдает венозной большую часть своего тепла и в дальнейшем почти не охлаждается.

Легкие — еще один путь проникновения холода в организм. Холодный воздух соприкасается там непосредственно с кровью. Внутренняя поверхность легких очень велика. У человека среднего роста она приблизительно равна 90 м², это, как уже указывалось, почти в 50 раз больше всей поверхности кожи. Можно ожидать, что кровь в них сильно охладится, что в свою очередь вызовет переохлаждение организма. Но этого не происходит. При высоких температурах окружающей среды температура оттекающей от легких крови становится ниже, чем притекающей, а на холоде, наоборот, выше. Правда, изменения очень незначительны, не больше 0,03°, но этого оказывается достаточно, чтобы зимой и летом поддерживать постоянную температуру тела. Почему оттекающая от легких кровь в жаркую погоду оказывается охлажденной, понятно: тепло расходуется на испарение. Каким образом она в холодную погоду нагревается, удалось узнать сравнительно недавно.

О том, что воздух, проходя через дыхательные пути, еще в носовых пазухах, гортани, трахее и бронхах частично подогревается, знали давно. И все-таки приходящий зимой воздух даже после этого остается значительно холоднее крови и должен ее охлаждать. Наблюдающийся в действительности подогрев объясняется тем, что легкие у человека и теплокровных животных выполняют функцию теплопродукции, являясь одним из основных источников тепла в организме. В легочной ткани много высококалорийных жиров. В холодную погоду (только в холодную!) они «сгорают», выделяя большое количество тепла и создают защитный тепловой барьер, препятствующий охлаждению организма. Физическая терморегуляция происходит в полном соответствии с первым началом термодинамики.

Температура, как термодинамический параметр, и законы термодинамики играют важнейшую роль в обеспечении жизнедеятельности организма. Прежде всего температура оказывает значительное влияние на кинетику биохимических реакций, протекающих в организме: рост скорости движения молекул приводит к увеличению среднего числа столкновений и, как следствие, к росту скорости реакции. От температуры зависит также и химическое равновесие, а в некоторых случаях и направление реакций. Кроме того, от температуры тела зависит характер теплообмена, температурного равновесия тела, ощущение тепла и холода. Наконец, температура тела является важным диагностическим признаком.

Температурные пределы жизни определяются затвердеванием клеточной жидкости (нижний предел при охлаждении) и свертыванием в ней белка (верхний предел при нагревании). Отметим, что если верхний предел ограничивается довольно четко — порядка 100°C — и лишь у некоторых бактерий несколько выше, то нижний предел изменяется весьма широко, так как во многих случаях замораживание приводит к прекращению лишь деятельности жизни (анабиозу). Например, некоторые простейшие способны возвращаться к жизни после охлаждения до температуры жидкого воздуха (-192°C) — обстоятельство, весьма важное с точки зрения космогонических теорий возникновения жизни на Земле.

Наша Земля имеет очень неоднородный климат. В Антарктиде температура падает до -88°C , зато в Африке она нередко поднимается до $+55^{\circ}\text{C}$.

Есть водоросли, которые живут и размножаются в горячих источниках с температурой $70-90^{\circ}\text{C}$. Среди вечных полярных льдов также существует жизнь. Экспедиция полярного исследования севера обнаружила районы, где лежал кроваво-красный снег! Причиной необычайной окраски снега были одноклеточные микроскопические водоросли — «хламидомонада снежная». Позже было открыто еще 140 видов растений, постоянно живущих на льдах и снегах. Многие из них окрашены в фиолетовый, красный, коричневый или зеленый цвет и придают снегу соответствующую окраску. Хламидомонада исключительно морозостойка (выдерживает температуру -90°C) и гибнет при нагревании до $+4^{\circ}\text{C}$. Организмов с более сильной термобоязнью на Земле, видимо, нет.

Противоположными свойствами обладают рачки, живущие в озерах Аравийского полуострова. Они ужасно «мерзнут» при 35°C , а при дальнейшем понижении температуры гибнут от «холода». Споры и примитивные животные (коловратки и тихоход-

ки) выживают при температуре, близкой к абсолютному нулю. Даже в таких высокоразвитых организмов, как насекомые, их яйца и куколки могут переносить значительное охлаждение. Многие из них в наших северных условиях зимуют открыто, выдерживая морозы -35° — 50° С. А в условиях лабораторий они переносили холод до -250° С.

На Земле существуют пойкилотермные, «холоднокровные» животные, температура тела которых зависит от температуры окружающей среды. Высшие животные (гоймотермные, или теплокровные) приобрели универсальный способ поддержания постоянной температуры своего тела, специально вырабатывая тепло.

Температура тела животных и человека приблизительно одинакова и несколько выше окружающей среды. Температура человека различна в разных точках тела ($36,8^{\circ}$ С — в подмышечной впадине, $37,2^{\circ}$ С—в полости рта и может подниматься до $42,0^{\circ}$ С). Температура тела холоднокровных животных несколько выше температуры окружающей среды. Причем, чем крупнее животное, тем больше заметна эта разница. Так, маленькая форель всего на $0,012^{\circ}$ теплее воды, а температура тела крупного тунца или макайры уже на 6° выше температуры воды.

Теплолечение с помощью нагретых сред

Все жизненно важные процессы протекают в нашем организме в определенном интервале температур: 36 — 41° С. Повышение температуры тела в пределах этого интервала увеличивает скорость биологических реакций и, наоборот, с понижением температуры происходит их заметное торможение.

Тепловая энергия не распространяется от поверхности кожи внутрь организма. Происходят бесчисленные реакции: волнообразные движения между капиллярами, нервами, внеклеточными жидкостями, клеточными мембранами — изменение физических и химических потенциалов, циркуляции в кровеносных и лимфатических сосудах оживляются, токи внеклеточных жидкостей становятся активнее, плазма крови и спинномозговая жидкость обновляются скорее, доставка питательных веществ и выделение отбросов значительно облегчается.

В связи с этим в медицине достаточно широко распространены тепловые методы лечения. Подвод тепловой энергии к телу может быть осуществлен тремя путями: контактное приложение нагретых сред, светотепловое облучение, прогревание высокочастотным током.

Для теплолечения с помощью нагретых сред пригодны только такие среды, в которых можно создавать значительные запасы внутренней энергии и затем ее медленно передавать организму,

т. е. тела с достаточно большой удельной теплоемкостью и малым коэффициентом теплопроводности — воздух, вода, торф, парафин, лечебные грязи и т. д., что позволяет создать в них (за исключением воздуха и воды) значительную концентрацию теплоты. Чем больше удельная теплоемкость и меньше коэффициент теплопроводности, тем при более высоких температурах можно применять теплолечебное средство. Воздух применяется только в суховоздушных ваннах. Вода имеет наибольшую теплоемкость и, следовательно, может обладать значительными запасами внутренней энергии. Но у воды сравнительно высокий коэффициент теплопроводности и очень сильная конвекция, вследствие чего она быстро охлаждается. Однако, несмотря на это, вода широко используется благодаря своей общедоступности в различных водотеплолечебных процедурах (грелки, ванны, души и пр.).

Теплопроводность парафина примерно в 2,5 раза меньше, чем воды; он имеет достаточно высокую удельную теплоемкость и отличается отсутствием конвекции. Благодаря этим свойствам парафин получил широкое применение в лечебной практике. Предварительно расплавленный парафин нагревают до $60\text{--}65^{\circ}\text{C}$ и с помощью плоской кисти наносят толстым слоем (0,8—1 см) на сухую чистую кожу. Парафин быстро застывает, образуя на границе с кожей тонкую защитную пленку с очень малой теплопроводностью, которая медленно, в течение 30—40 минут, передает тепло организму от верхних более нагретых слоев. Весьма близок к парафину по своему тепловому воздействию на организм озокерит (горный воск).

Тепловые свойства торфа и лечебных грязей близки к свойствам воды, но отсутствие конвекции создает более благоприятные условия для длительного прогревания тканей. Торф и лечебную грязь (ил) предварительно измельчают, нагревают в водяной бане до температуры $40\text{--}45^{\circ}\text{C}$ и накладывают на подлежащий лечению участок тела толстым слоем. Там, где нет иловых и торфяных грязей, весьма эффективными и доступными теплолечебными средствами являются глина и песок

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР В МЕДИЦИНСКОЙ ПРАКТИКЕ

Немного о получении низких температур

Рассматривая первое начало термодинамики, мы уже говорили, что при адиабатном процессе ($\Delta Q = 0$) идеальный газ совершает работу за счет убыли его внутренней энергии ($\Delta A = -\Delta E$). Уменьшение внутренней энергии газа равнозначно понижению его температуры. Идея охлаждения газа при его быстром

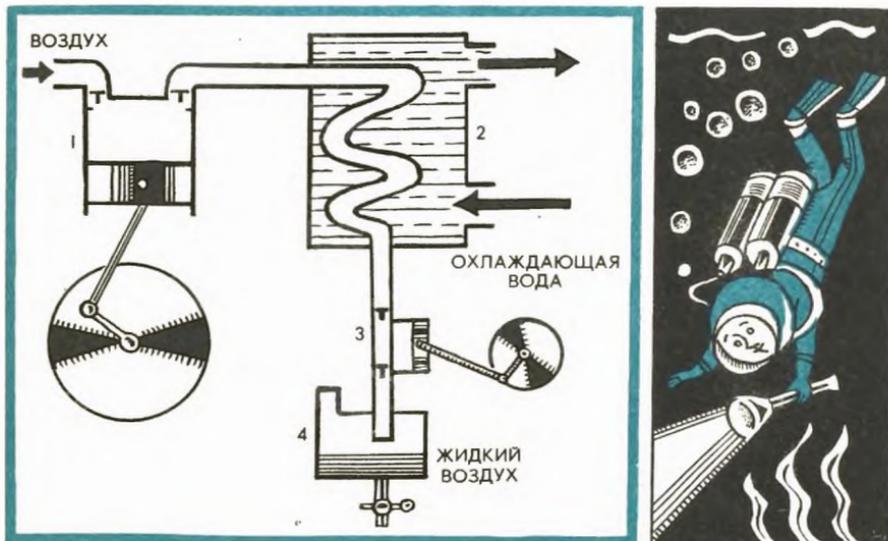
(адиабатном) расширении лежит в основе действия машин для получения сжиженных газов.

На рис. 43 приведена схема машины для получения жидкого воздуха. Воздух поступает в компрессор 1, здесь его сжимают до давления в несколько десятков атмосфер. При этом сжатии он нагревается. Из компрессора 1 воздух поступает в теплообменник 2, где он охлаждается проточной водой до первоначальной температуры и затем идет в детандер 3 (расширитель). Детандер представляет собой цилиндр с поршнем, в нем воздух расширяется и при этом совершает работу — выталкивает поршень. Внутренняя энергия воздуха расходуется на эту работу, и температура его понижается настолько сильно, что он конденсируется в жидкость. Сжиженный воздух собирается в сосуде 4.

Иногда детандеры изготавливаются не в виде цилиндра с поршнем, а в виде турбины, на вращение которой газ затрачивает работу. Такая схема была предложена академиком П. Л. Капицей. Его машина была названа турбодетандером; она отличается от других машин очень высокой производительностью: за одно и то же время дает жидкого газа в 100 раз больше, чем машины других конструкций.

Высокая производительность машин, сжижающих газы, позволила решить очень важную медицинскую проблему — теперь каждая больница, каждое отделение, каждая аптека имеет жидкий кислород практически в неограниченном количестве.

Рис. 43. Схема машины для получения жидкого воздуха.



При понижении температуры скорость биологических реакций уменьшается. Природа дает много подтверждений этой мысли. Зимняя спячка животных является защитой от вредных воздействий: холода, отсутствия пищи. При спячке обмен веществ, сердцебиение и дыхание резко замедляются. Температура тела теплокровных животных может понизиться от $+19^{\circ}\text{C}$ до -4°C , а у сурка, хомяка, летучих мышей — от $+3^{\circ}\text{C}$ до -7°C .

Температура тела медведя в берлоге понижается на 10° . Интересен опыт, проделанный с сусликом. В состоянии зимней спячки его охладили до -16°C . Он совершенно ооченел, пробыв в таком состоянии 75 мин. После того как его отогрели, к нему вернулись все признаки жизни. На следующий день он уже передвигался.

Может ли человек переносить охлаждение, как животные? Еще в начале XIX века русский физиолог П. И. Бахметьев высказал идею создания у человека состояния замедленной жизни — анабиоза. Первые опыты он ставил на животных, вызывая летом зимнюю спячку летучих мышей снижением температуры их тела до 0°C .

Охлаждение человека

Только в последнее время удалось понизить активность жизненных процессов у человека и вызвать состояние, подобное зимней спячке животных. При этом притупляются болевые ощущения, снижается ритм дыхания, скорость обменных процессов. В последнее время метод охлаждения, или гипотермии, нашел применение в хирургии. Больного перед операцией или во время операции подвергают общему наркозу и одновременно помещают в специальные аппараты — «холодовые одеяла», через двуслойные прорезиненные ткани которых пропускают охлажденную воду. Температуру воды можно быстро менять, поэтому удается легко и быстро охладить больного. Большой на операционном столе не отвечает даже на довольно сильные раздражения и не чувствует боли. Все жизненные процессы становятся менее активными: пульс замедляется, дыхание становится редким, давление крови понижено. Снижается деятельность мозга, центры которого приходят в тормозное состояние. Приведем интересные сведения о сохранении жизнеспособности людей при их «размораживании». В книге «Тысяча и один вопрос о погоде» Франк Форрестер пишет: «В феврале 1951 г.

произошел удивительный случай. В Чикаго была подобрана двадцатитрехлетняя женщина, почти совсем замерзшая, в бессознательном состоянии, но живая... Через полтора часа после того как она была доставлена в больницу, температура ее тела составляла 18°C. Она выжила, но ей пришлось ампутировать ноги выше лодыжек».

Осенью 1967 г. в газете «Известия» промелькнуло сообщение о том, что в Японии шофер машины-рефрижератора, развозящий мороженое, желая отдохнуть, влез в нее и заснул. При этом тело его замерзло. Однако медикам удалось вернуть его к жизни. В пояснении советского врача к этой заметке сказано, что известную положительную роль при этом мог сыграть находящийся в машине сухой лед, т. е. сухая углекислота.

Если факты оживления человека, тело которого подвергалось весьма сильному охлаждению, подтвердятся, то перед современной медициной откроются новые горизонты и понятия о приспособительных возможностях организма человека будут значительно расширены.

Гипотерм

Оригинальным усовершенствованным методом охлаждения организма является прибор *гипотерм*, примененный впервые в клиниках Ярославля. Прозрачный колпак из пластмассы одевают на голову больного, охлаждению подвергается только мозг. Кора мозга очень слабо реагирует на боль в условиях холода. Операции, проведенные при охлаждении этим аппаратом, показали его большое преимущество. Он прост, удобен, позволяет проводить такие хирургические операции, которые при других методах почти невозможны.

Холод и глаз

Всем известно, что если приложить палец к сильно охлажденному металлу, то палец примерзает. Медики из этого неприятного явления сумели извлечь пользу.

Польский окулист Крвавич предложил использовать замороженный металл при операциях по удалению катаракты (бельма). Такую операцию называют *криоэкстракцией* («крио» — от слова «холод», «экстракция» — извлечение).

Катаракта — помутнение хрусталика глаза. Это серый диск, расположенный против зрачка и мешающий проникновению света в глаз. Еще древние ассирийцы и египтяне знали: если удалить помутневший хрусталик, слепой способен видеть снова, правда, ему потребуются особые толстые стекла.

Надо очень осторожно через тонкий разрез роговицы вынуть хрусталик из глаза. Сделать это не легко. Хрусталик скользкий и хрупкий. Вот тут-то и пришел на помощь мороз. Для охлаждения врач помещает в углекислоту металлический стержень, а потом быстро переносит его к оперируемому глазу и прикасается к хрусталику. Мокрый хрусталик прилипает к металлу. Ловкое движение,— и он удален. Важно только точно попасть в нужное место.

Но у криоэкстракции есть один минус: ее надо выполнять очень быстро, иначе тонкий металлический стерженек нагреется от окружающего воздуха и рук врача и хрусталик к нему уже не прилипнет. А неточное прикосновение может повредить живую, здоровую ткань.

Новосибирский врач И. Плотников предложил пользоваться при криоэкстракции каким-либо постоянным источником холода. Нужно было создать такой холодильник, который бы позволил быстро получать на острие металлического стерженька мороз не менее -20 — -25° . Этого можно было достигнуть только с помощью полупроводников. В лаборатории термозлементов Института полупроводников в Ленинграде сконструировали полупроводниковый криоэкстрактор. Этот прибор состоит из рукоятки-карандаша и блока управления, соединенного с ним шлангами. Сам карандаш весит всего 65 г. На его острие достигается температура -35°C , которую обеспечивает термозлемент, смонтированный внутри карандаша. Когда меняется направление тока, холодильник сразу же превращается в нагреватель и температура на острие карандаша поднимается до $+20^{\circ}$. На охлаждение и нагревание требуется несколько секунд. Поэтому в случае неточного попадания карандаша легко исправить ошибку.

Первый экземпляр прибора ленинградцы подарили Плотникову. Его опыты на кроликах были поразительными. Все прошло успешно. Потом врач подготовил первую операцию. Больной прожил во мраке 15 лет, а в результате операции опять увидел мир. С помощью подобных криоэкстракторов сделано много сотен успешных операций.

Сегодня криохирургия — хирургия холода — взята на вооружение и нейрохирургами, и гинекологами, и травматологами.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО НА СЛУЖБЕ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА

ВВЕДЕНИЕ

Кто стоит у источников науки об электричестве? Конечно же, физики, скажете вы. И будете правы, если добавите: и врачи. Ведь даже термин «электричество» придумал не физик, а именно врач — Гильберт. Еще в 1745 году электрическими «ударами» пытался лечить параличи медик Краценштейн. Жан Поль Марат, врач и физик по профессии, революционер по призванию, в годы, предшествовавшие Великой французской революции, лечил электричеством. Знаменитые ученые Гальвани, Юнг, Эрстед, Гельмгольц были физиками, физиологами и врачами. В 1802 г. Альдини, племянник Гальвани, его верный ученик и последователь, сделал первую попытку вернуть к жизни электрическим током сердце умершего. Он раздобыл труп казненного человека и через 2 часа после казни тщетно пытался оживить сердце обезглавленного преступника. Альдини не знал, что причина его неудачи—опоздание. Эту ошибку исправил Вассали из Турина. Под действием электрических разрядов сердце одного казненного стало сокращаться. В 1922 г. хирург Бостон применил гальванический ток и вернул к жизни пациента, находившегося в состоянии клинической смерти.

В настоящее время электричество широко используется в медицинской практике: с его помощью устанавливают диагноз, лечат, осуществляют санитарно-профилактические мероприятия.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА И В МЕДИЦИНСКОЙ ПРАКТИКЕ

Биопотенциалы

Электрические потенциалы, которые возникают в клетках, тканях и органах живого организма, называются биопотенциалами. Они образуются вследствие различной концентрации положительных и отрицательных ионов внутри и снаружи клет-

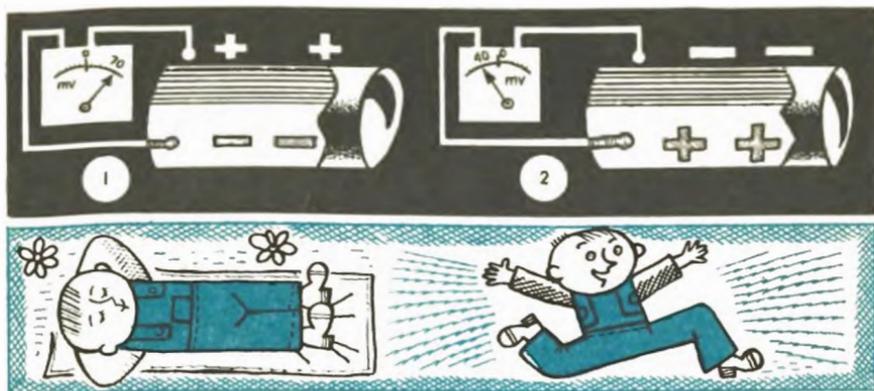
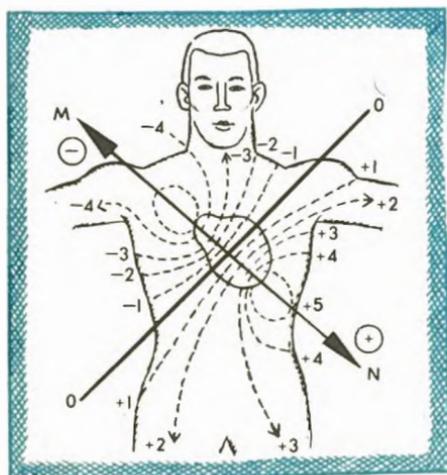


Рис. 44. Биопотенциалы нервного волокна в покое [1] и при возбуждении [2].

ки. При возбуждении клетки или ткани изменяется величина и знак биопотенциалов (рис. 44). Эти изменения называются потенциалами действия. Они представляют собой импульс постоянного или переменного знака. На рис. 45 в условных единицах показаны относительные потенциалы различных участков тела человека. Часть тела, расположенная влево от оси OO , имеет отрицательные потенциалы, а вправо от нее — положительные.

Рис. 45. Эзипотенциальные поверхности электрического поля, образующегося при работе сердца.



Как и поле, созданное неподвижным электрическим зарядом, электрическое поле человеческого организма можно характеризовать эквипотенциальными поверхностями (рис. 45). Всем известно, какие неприятные ощущения вызывает зубная боль. Исследования показали, что боль связана с понижением потенциала болезненной области. Боль всегда «отрицательна»! Отсюда и метод борьбы с ней: если фрезу бормашины соединить с положительным полюсом источника тока и прикоснуться ею к больному зубу, потенциалы уравниваются и боль уменьшится.

В атмосфере действуют довольно сильные электрические поля. В нормальных условиях поверхность Земли имеет более высокий потенциал, чем облака. Поэтому электрическое поле Земли \vec{E} ориентировано снизу вверх (рис. 46).

Как известно, основной силовой характеристикой электрического поля является напряженность E , энергетической — потенциал φ или разность потенциалов $\Delta\varphi$. Они связаны между собой следующим соотношением:

$$E = - \frac{\Delta\varphi}{r},$$

т. е. напряженность характеризует изменение разности потенциалов с расстоянием. Изменение какой-либо физической величины с расстоянием, как уже говорилось, называется градиентом (grad):

$$E = - \text{grad}\varphi.$$

В среднем градиент потенциала для электрического поля Земли составляет $100 \frac{\text{В}}{\text{м}}$. При грозах, метелях, бурях grad φ может достигать $1000 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Влияет ли это на самочувствие и здоровье людей? Не счесть предгрозовых симптомов, известных врачам испокон веков. В 1960 году врач Ж. К. Жардель опубликовал интересные сведения о влиянии изменений электрического потенциала на больных. Он установил на основании двухлетних наблюдений за больными связь между ухудшением самочувствия их и резкими, продолжительными колебаниями земного электрического потенциала. Замечалось учащение приступов бессонницы, усиление болей, приступов астмы, мигрени и т. п. Что же при этом происходит в человеческом организме? Биологи полагают, что при вторжении большего, чем обычно, количества электрических частиц в организме нарушается процесс обмена, причем положительные и отрицательные электрические заряды оказывают различное действие.

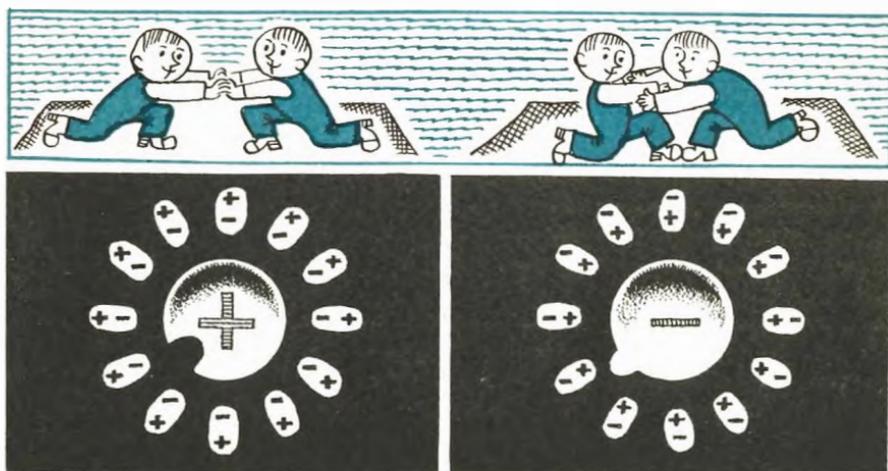


Рис. 46. Ориентация электрического поля Земли.

В атмосферном воздухе всегда находится определенное количество ионов. Это является следствием действия естественных ионизаторов. Ими могут быть космические лучи, ультрафиолетовое излучение Солнца, излучение радиоактивных веществ, которые в незначительном количестве находятся в грунте, воде, окружающих предметах.

Положительные и отрицательные ионы своим электрическим полем поляризуют молекулы воздуха, которые их окружают. Эта поляризация состоит в определенном смещении зарядов внутри молекулы. Такие поляризованные молекулы притягиваются к ионам вследствие взаимодействия электрических зарядов (рис. 47). Один ион задерживает 10—15 молекул, образуя комплекс, имеющий заряд иона. Эти комплексы называются легкими ионами или легкими аэроионами, если это ионы воздуха атмосферы. На открытом воздухе при среднем дневном освещении образуется около 1000 пар таких разноименно заряженных ионов в 1 см^3 . Если сравнить число генерированных ионов в 1 см^3 с числом молекул в 1 см^3 (число Лошмидта $n = 2,68 \cdot 10^{19}$ молекул), можно увидеть, что процент их очень невелик. Легкие аэроионы могут оседать на мелких пылинках, капельках воды, передавая им свой заряд. Твердые или жидкие частицы, которые находятся в воздухе и имеют электрический заряд, называются тяжелыми аэроионами.

Рис. 47. Схема поляризованных молекул газа [аэроионов].



Легкие аэроионы имеют диаметр порядка 10^{-7} см, т. е. в десять раз больше диаметра молекул (10^{-8} см); средний диаметр тяжелых аэроионов 10^{-5} см. Количество ионов, находящихся в атмосфере, зависит от геологических (радиоактивность грунта) и метеорологических (ветер, влажность, облачность, дождь) условий. В воздухе, загрязненном пылью или дымом (крупные города), количество легких аэроионов уменьшается до 150 в 1 см^3 , а тяжелых — возрастает до нескольких тысяч. Воздух в сельской местности менее загрязнен тяжелыми аэроионами: здесь на 1 см^3 приходится единицы тяжелых аэроионов. Специальные исследования показали, что отрицательные, особенно легкие, ионы благоприятно, а положительные, особенно тяжелые, вредно действуют на организм человека.

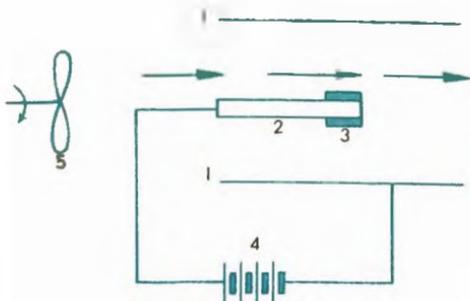


Рис. 48. Аэроионизатор проф. А. Б. Вериго.

Созданы специальные приборы для искусственного получения отрицательных аэроионов. Рассмотрим один из них (рис. 48), предложенный проф. А. Б. Вериго. Главной его частью является металлический цилиндр 1, внутри которого находится металлический стержень 2, покрытый радиоактивным веществом 3. С помощью батареи 4 (или выпрямителя) между цилиндром 1 и стержнем 2 образуется разность потенциалов, причем стержень 2 соединяется с положительным полюсом. Вентилятор 5 продувает воздух через цилиндр 1 в направлении, указанном стрелкой.

Излучения радиоактивного вещества ионизируют воздух внутри цилиндра 1. Положительные ионы двигаются к отрицательно заряженному цилиндру, а отрицательные — к положительному стержню. Так как цилиндр 1 длиннее стержня 2, то положительные ионы успевают дойти до стенок цилиндра и нейтрализуются его отрицательным зарядом. Отрицательные ионы вследствие малой длины стержня 2 не попадают на стержень, и, увлеченные потоком воздуха от вентилятора, выходят из цилиндра.

Как уже говорилось, положительные ионы отрицательно действуют на здоровье человека. Большое скопление их в атмосфере вызывает неприятные ощущения. Одно из самых первых наблюдений было сделано московским профессором А. Л. Чижевским. Он описал угнетающее влияние положительных ионов. С тех пор его открытие было неоднократно подтверждено. Недавно Т. Уионсор и Дж. Бакетт (США) доказали вредное действие положительных ионов следующим экспериментом: добровольцам давали дышать в течение 20 минут воздухом, содержа-

щим 32 миллиона положительных ионов на 1 см^3 . К концу опыта все жаловались на головокружение и затрудненное дыхание, появились признаки раздражения слизистой оболочки носа, голос стал хриплым. Исследования, проводившиеся в СССР, установили связь избытка положительных ионов с сердечными приступами и операционными осложнениями.

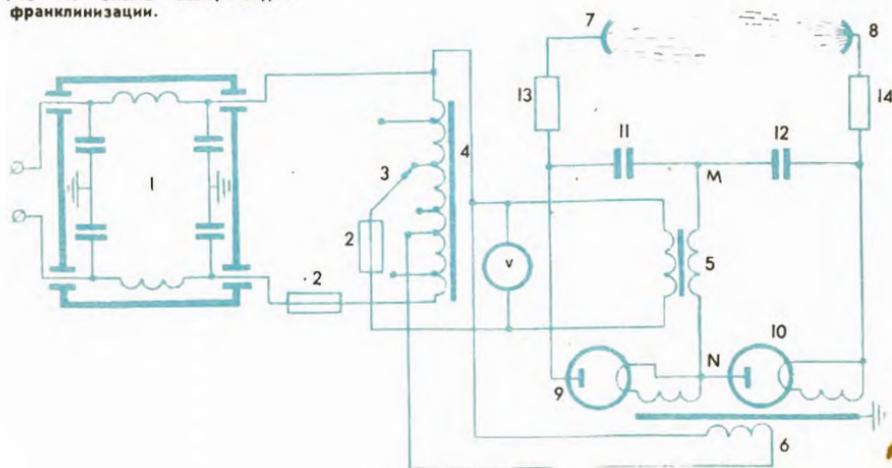
В противоположность положительной ионизации обилие в атмосфере отрицательных ионов действует на человеческий организм благоприятно: облегчает дыхание, стимулирует биологические процессы, улучшает настроение.

Города являются настоящими генераторами избыточных положительных аэроионов. В результате скопления выхлопных газов автомашин, дыма и пыли положительные ионы объединяются и оседают на мелкие частицы пыли, образуя тяжелые аэроионы. Открытие их принадлежит французскому физику Ланжевену.

Отрицательные ионы — одно из недавно открытых средств защиты здоровья человека от вредного влияния загрязнения атмосферы. Интересны наблюдения Фрица Гаана из Гейдельберга (ФРГ). Он открыл, что бактерии гибнут в электрическом поле напряжением 2000 в. Людям, больным гриппом, достаточно побыть в помещении, где установлены в потолке и полу электроды с напряжением между ними 2000 в, около пяти часов, чтобы почувствовать себя значительно лучше. Мясо и масло, обработанные таким способом, не поражаются бактериями или грибами в течение 40 дней.

Электрическое поле — арсенал врачей

Рис. 49. Схема аппарата для франклинизации.



Применение постоянного электрического поля высокой напряженности с лечебной целью называется франклинизацией, или статическим душем. В физиологических лабораториях электрическое поле высокой напряженности получают с помощью электростатической машины или аппаратов для франклинизации. На рис. 49 изображена принципиальная электрическая схема такого аппарата, который по существу является высоковольтным выпрямителем, собранным по схеме удваивания напряжения.

Автотрансформатор 4 питает высоковольтный трансформатор 5 и трансформатор 6 накала кенотронов. Напряжение, подаваемое на трансформатор 5, регулируется переключателем 3. Для устранения радиопомех, возникающих во время работы аппарата и распространяющихся по городской сети, аппарат включается в сеть через фильтр 1 и предохранители 2.

В течение одного полупериода, когда в точке *N* создается положительный потенциал, а в точке *M* — отрицательный, правая обкладка конденсатора 12 заряжается через кенотрон 10 положительно до амплитудного значения напряжения высоковольтного трансформатора. В течение второго полупериода, когда полярность высоковольтного трансформатора изменится на обратную, произойдет зарядка (отрицательным зарядом) левой обкладки конденсатора 11 и через кенотрон 9 также до амплитудного значения напряжения высоковольтного трансформатора.

Рис. 51. Электростатический душ.

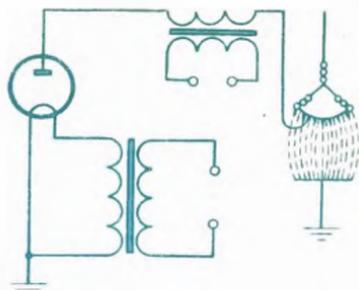


Рис. 50. Аэроионизатор системы А. Л. Чижевского.

Поскольку оба конденсатора соединены последовательно, то между внешними пластинами, к которым присоединена цепь пациента, будет действовать напряжение, равное удвоенному амплитудному напряжению высоковольтного трансформатора.

Пациент помещается между ножным 8 и головным 7 элект-

тромами. При случайном соприкосновении пациента одновременно с двумя электродами большие сопротивления 13 и 14 ограничат ток.

Частным случаем использования электрических полей является система, которая называется аэроионизатором. Она предназначена для получения ионизированного воздуха, в частности ионов кислорода, оказывающих сильное биологическое действие. Аэроионизатор системы А. Л. Чижевского (рис. 50) подает высокое выпрямленное напряжение на «электроэфлювиальную люстру», снабженную большим количеством острых окончаний — игл. Вследствие высокой неоднородности электрического поля вокруг игл возникает тихий разряд, являющийся источником ионов. Такая процедура называется электростатическим душем (рис. 51).

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК И ЕГО ДЕЙСТВИЕ НА ОРГАНИЗМ

Строго хранит свои тайны организм. Многие века понадобились для их разгадки. Вот история одной из них.

Открытие Гальвани

Рассказ можно начать с того времени, когда было открыто «животное электричество». Это случилось в тот день, когда врач из Болоньи Алоизий Гальвани обнаружил действие электричества, вырабатываемого электрической машиной, на тело лягушки. Когда к обезглавленному телу лягушки подводили электрическое напряжение, лапки сокращались. Пытаясь обнаружить появление атмосферного электричества, Гальвани повесил отпариванную лягушку на железную решетку балкона. Медный крючок был воткнут в спинной мозг. Как только крючок коснулся перил, лапка лягушки судорожно сжалась. То же повторилось и в комнате. Зная о существовании э. д. с., создаваемых животными (электрический скат), Гальвани считал, что это и есть животное электричество. Результаты своих исследований Гальвани описал в «Трактате о силах электричества».

Соотечественник и современник Гальвани физик Алессандро Вольта показал, что в опытах Гальвани лягушка была лишь биологическим индикатором электричества, возникающего, когда два разнородных металла помещают в электролит. Электролитом служило тело лягушки. Вольта первый правильно истолковал опыт Гальвани. Гальвани поставил новый опыт, названный им «вторым опытом» или «опытом сокращения без металла».

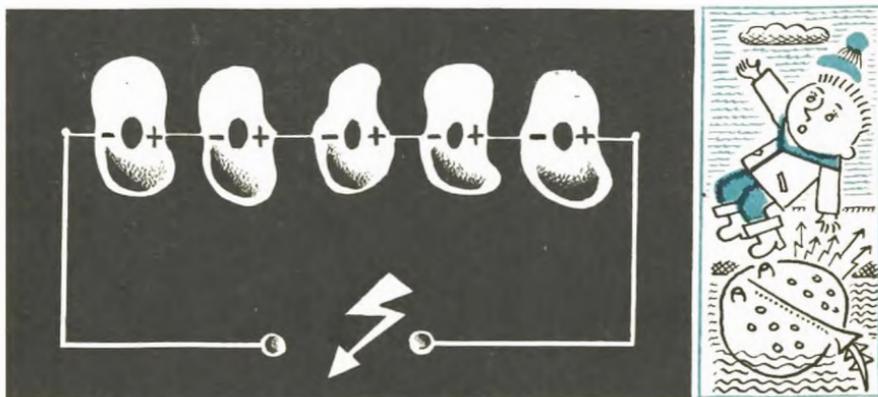
Нерв одной лягушечьей лапки Гальвани изолировал, перерезал и согнул наподобие дуги; на этот нерв набрасывался нерв другой препарированной лягушки так, что он соприкасался с первым в двух точках — в месте разреза и на неповрежденной поверхности. В момент соприкосновения нервов мышца второго препарата сокращалась. Существование животного электричества было доказано. Но не все ученые того времени его признали. Натуралисты — Гумбольдт, Альдини, Маттеучи — были сторонниками Гальвани. Противоположного мнения придерживались физики — последователи Вольты, имя которого тогда было очень авторитетно.

Только работы физика Маттеучи (через 30 лет после открытия Гальвани) убедили самых упрямых в существовании животного электричества. Суть его опыта состояла в следующем. Были изготовлены два нервно-мышечных препарата. Нерв первого помещался на мышцу второго; нерв второго препарата раздражался. При этом обе мышцы сокращались. Объяснить это явление можно было только так: при раздражении нерва второго препарата его мышца сокращается и в ней возникает разность потенциалов, вызывающая электрический ток в нерве первого.

Живые электростанции

Еще древние римляне знали удивительную способность скатов добывать себе пищу. Эти рыбы не гоняются за добычей, не выскакивают на нее из засады. Если вблизи скатов, спокойно плывущих в толще воды, оказываются крабы или осьминоги, у не-

Рис. 32. Последовательное соединение клеточных генераторов ската.



осторожных животных начинаются конвульсии и они гибнут. Оказывается, что скаты — живые электростанции, способные вызвать разряд такой силы, что находящиеся вблизи мелкие животные гибнут.

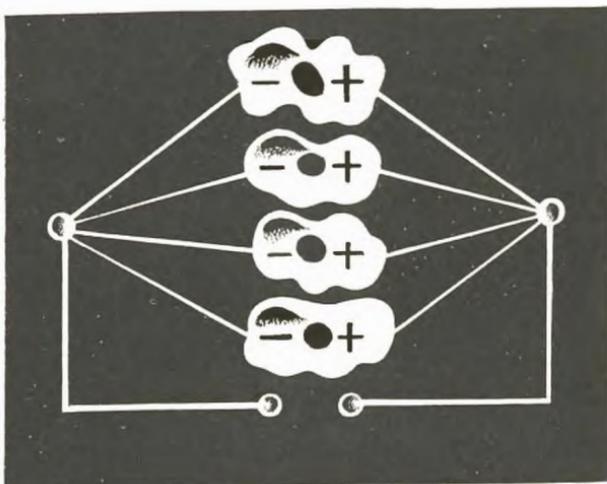
Таковыми же свойствами обладают и электрические угри и африканские сомы. На языке индейцев-томанаксов угри называются «арима», что значит «лишающий движения». Их мясо, а также вызываемые ими электрические разряды у многих местных племен считаются лечебными.

Напряжение, создаваемое сомами, достигает 400 в, а угрями — до 600 в! При этом мощность «электростанции» угря равняется 1000 вт. Высокое напряжение электрическому угрю необходимо, потому что пресная вода — плохой проводник электричества. Ток меньшего напряжения был бы опасен только на очень близком расстоянии. Напряжение, создаваемое электрическим скатом, значительно меньше, оно не превышает 60 в (морская вода — электролит, хороший проводник), зато сила тока достигает 60 а!

Что же такое животное электричество? Отличается ли оно от электричества в неживой природе?

Фарадей своими опытами над электрическим скатом установил, что электричество, создаваемое специальным органом этой рыбы, совершенно тождественно электричеству, получаемому от химических или физических источников, хотя и является продуктом деятельности живой клетки. Позже было установлено, что элементарным источником биоэнергии — биогенератором — является живая клетка. Потенциал части клетки, находящейся в возбужденном состоянии, ниже относительно другой ее части,

Рис. 53. Параллельное соединение клеточных генераторов ската.



находящейся в покое. Эта разность потенциалов очень мала: порядка 50 мв. При последовательном соединении источников электроэнергии общая э. д. с. равна сумме э. д. с. каждого источника:

$$E = \Sigma E_n.$$

В электрическом органе ската возбуждающиеся клетки соединены последовательно (рис. 52), поэтому суммарная генерируемая здесь э.д.с. может достигать значительной величины — около 450 в. Это редкий случай. Во всех других клетках и тканях, в том числе и в тканях человека, клеточные генераторы соединены параллельно (рис. 53).

При параллельном соединении общая э. д. с. равна э. д. с. одного элемента, поэтому клеточные генераторы человека не дают таких больших напряжений:

$$E = E_1 = E_2 = E_3 = \dots = E_n.$$

Организм рассказывает

Выясним, как работает биогенератор. Мышца состоит из множества двигательных единиц — функциональных элементов. Такой элемент включает в себя нервную клетку — мотонейрон, идущий от него нервный проводник и мышечное волокно, в котором находится окончание нерва — двигательные пластинки. Изменение разности потенциалов в мышечных волокнах происходит под влиянием импульсов, приходящих от мотонейронов продолговатого и спинного мозга.

Импульс вызывает сокращение мышц, а при сокращении возникает электрическая активность, которую можно регистрировать, например, накожными электродами, соединенными с усилителем и осциллографом. Полученная электромиограмма будет отражать суммарную активность многих моторных единиц. Чем сильнее сокращение мышцы, тем большее число двигательных единиц вовлекается в работу. Механизм суммарной электрической активности других органов более сложен и еще недостаточно выяснен.

Разность потенциалов, возникающая в живых тканях, имеет очень малые амплитуды — тысячные и сотысячные доли вольта. Иногда это практически постоянные напряжения (например, кожные потенциалы), иногда переменные, с низкими и очень низкими частотами, обычно не превышающими сотен герц (биотоки мышц). Внутреннее сопротивление биогенераторов велико. Суммарную электрическую активность тканей или клеток проще всего, конечно, регистрировать, накладывая электроды прямо на изучаемый орган. В экспериментах на животных так и

делают. Но, оказывается, электрическую активность сердца можно записать, накладывая электроды на кожу животного, не вскрывая его. Биогенератор — сердце создает на поверхности кожи биопотенциалы, электрокардиограмма которых тождественна электрокардиограмме, записанной непосредственно с поверхности сердца.

По суммарной электрограмме врач может узнать о функциональном состоянии органа или организма в целом, выяснить его возможности и отклонения от нормы.

Электрографический метод все шире применяется сейчас при клинических исследованиях. Он позволяет получить информацию о таких тонких процессах, в раскрытии которых другие методы оказались беспомощны.

Проникать в тайны биоэлектрических процессов, получать сведения об интимных сторонах физиологических процессов помогает электроника.

До недавнего времени при исследовании электрических процессов в тканях использовались электроды, имеющие относительно большую площадь соприкосновения с исследуемым объектом. Ими регистрировалась лишь суммарная электрическая активность ткани. Электрическую активность отдельных клеток удавалось непосредственно регистрировать только при хирургической изоляции особых гигантских клеток. Но этот способ требовал исключительной тонкости эксперимента. Чаще об электрических явлениях в клетках приходилось судить по различным косвенным данным.

Развитие микроэлектродной техники позволило применить необычно тонкие электроды, которые вводятся в живую ткань. Таким путем можно изучать электрическую активность не только самых маленьких клеток организма, но и отдельных частей этих клеток. Теперь объектами исследования с помощью микроэлектродов служат все возбудимые ткани. Диаметр микроэлектродов доходит до нескольких микронов, а в некоторых случаях он бывает и менее одного микрона.

«Разрешающая способность» микроэлектродной методики находится теперь на одном уровне с разрешающей способностью лучших оптических и даже электронных микроскопов. Точно так же как микроскоп позволил увидеть клетку, микроэлектроды вместе с электрографической установкой позволили определить характер изменения ее электрической активности. Сопротивление таких тонких электродов, конечно, очень велико. При этом электрические потенциалы, генерируемые клеткой, требуют регистрации широкой полосы частот. Поэтому биопотенциалы клетки удается зарегистрировать с достаточной степенью точности, без искажений лишь с помощью современной сложной электронной аппаратуры.

Итак, живой организм, каждая его клетка являются источником информации о происходящих в них процессах. Эта информация

находится, в частности, в биотоках — в малоамплитудных и низкочастотных изменениях разности потенциалов. Чтобы изучить информацию организма, ее нужно уметь точно регистрировать. Сейчас электрофизиологи располагают целым арсеналом различных регистрирующих приборов, способных учитывать и записывать все формы биоэлектрической активности. В этих приборах электрическая энергия преобразуется в механическую (движение пера регистратора, поворот зеркала вибратора и т. д.), затем электрограмма заносится на ленту. Существуют фоторегистраторы, в которых фотолента засвечивается лучом, отраженным от зеркала вибратора или светящимся пятном на экране электронно-лучевой трубки. Но обычная фоторегистрация не дает сразу видимого изображения: требуется фотообработка ленты.

Для видимой записи существует несколько типов регистраторов: струйные, перьевые, вычерчивающие кривые с помощью пера и чернила, и тепловые. Тепловой регистратор очень похож на перьевой, только на конце пера у него вместо капилляра находится проволочная петля, нагреваемая током и снимающая легко расплавляемый белый слой, помещенный на специальную черную бумагу. Многие из современных регистраторов могут записывать высокочастотные процессы без искажений, но все они так малочувствительны, что не в состоянии регистрировать биоэлектрические процессы без предварительного их усиления. Таким образом, в электрографической установке, кроме регистрирующих приборов, должны быть и специальные усилители.

Если среди современных регистрирующих аппаратов есть только один электронный прибор — электронно-лучевая трубка, то в усилителях бионапряжений все усилительные элементы — электронные или полупроводниковые приборы. Они позволяют усиливать бионапряжение с амплитудой 5—10 мкв до сотен вольт. Эти аппараты дают возможность регулировать усиление и устранять некоторые помехи. Число регистрирующих приборов, иначе говоря, каналов регистрации, должно быть равно числу одновременно изучаемых процессов.

Третий непрерывный элемент электрографической установки составляют электроды. Это металлические пластинки или иглы, предназначенные для создания надежного электрического контакта с живой тканью биологического объекта (о них речь шла несколько выше).

На рис. 54 подана принципиальная схема электрографической установки. Здесь 1 — биогенератор (биологический объект), 2 — электроды, 3 — коммутатор электродов, 4 — усилители, 5 — регистрирующие приборы, 6 — автоматический анализатор электрограммы, 7 — стимулятор.

Для анализа электрограммы на ней наносятся два масштаба: масштаб времени и масштаб напряжения. На ленте получается

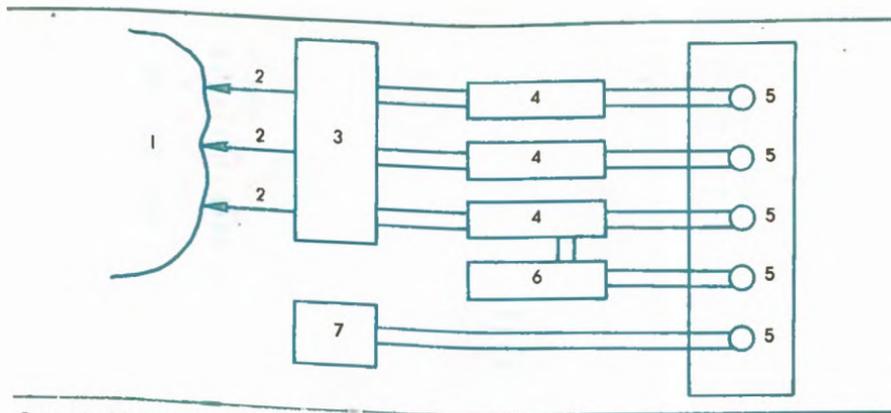


Рис. 54. Блок-схема электрографической установки.

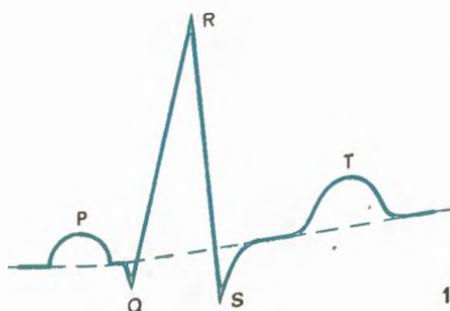
четкая графическая картина зависимости биопотенциалов от времени.

Современная практическая медицина использует электрографический метод регистрации биопотенциалов в трех направлениях: а) для диагностики, б) для получения экспресс-информации о состоянии больного во время операции и в) для управления с помощью биотоков различными аппаратами.

В любой современной больнице и поликлинике есть электрокардиограф — один из самых распространенных электрографических аппаратов. Он записывает биотоки сердца — электрокардиограмму. У здорового человека электрокардиограмма имеет свою характерную форму (рис. 55). Зубец *P* отражает сокращение предсердий, комплекс зубцов *Q*, *R*, *S*, *T* — сокращение желудочков. Изменения формы зубцов электрокардиограммы указывает на отклонения от нормы; они могут служить показателями заболеваний даже в тех случаях, когда внешне заболевания не проявляются.

Электрокардиография важна не только для распознавания заболеваний сердца. Во время сложных операций бывает необходимо иметь сведения о состоянии сердца больного. Электрокардиоскоп стал сейчас необходимым прибором в операционной. Электронно-лучевая трубка его в этом случае имеет большой экран с послесвечением. Анестезиолог-нарколог постоянно наблюдает за электрической активностью

Рис. 55. Электрокардиограмма.



сердца больного и учитывает все ее изменения. Это дает возможность в случае необходимости принять соответствующие меры: усилить или ослабить наркоз, ввести сердечное лекарство и т. д.

С помощью электрографической техники можно записывать также и работу мышц. Электрическая активность мышцы и при нарушении ее деятельности резко изменяется. Поэтому электромиография получила заслуженное признание; она дает врачу ценную диагностическую информацию при всевозможных двигательных нарушениях — параличах, парезах.

Постоянный ток — лекарь

Уже более 150 лет в медицине с лечебной целью используют постоянный ток напряжением 60—80 в и силой 40—50 ма.

Рассмотрим первичное действие постоянного тока на ткани организма, обусловленное в первую очередь перемещением ионов электролитов. Введем понятие подвижности ионов. Так как скорость движения ионов мала, то для их движения в вязкой среде справедливым оказывается закон Стокса:

$$F_1 = 6\pi\eta r v,$$

где F_1 — сила сопротивления, с которой жидкость противодействует движению иона.

При постоянной температуре коэффициент вязкости η — величина постоянная, поэтому произведение $6\pi\eta r = k$ также является величиной постоянной, следовательно, со стороны жидкости на ион действует сила $F_1 = kv$.

Электрическое поле действует на ион с силой $F_2 = qE$. При условии равенства этих сил ион будет двигаться равномерно:

$$F_1 = F_2; kv = qE; v = \frac{q}{k} E.$$

Отношение $\frac{q}{k}$ обозначим буквой b , тогда

$$v = bE.$$

Если напряженность поля $E = 1 \frac{в}{м}$, то величина b численно равна скорости движения иона. Эта величина называется подвижностью иона. У различных ионов подвижность не одинакова. Установлено, что подвижность ионов водорода равна 12 см/час, ионов гидроксильной группы ОН 6,5 см/час, ионов калия 0,02 см/час.

Поскольку подвижность ионов различна, в электрическом поле происходит разделение и изменение концентраций ионов, а также образование местных пространственных зарядов. Эти электрокинетические процессы и определяют физиологическую реакцию организма на ток. П. П. Лазарев развил ионную теорию

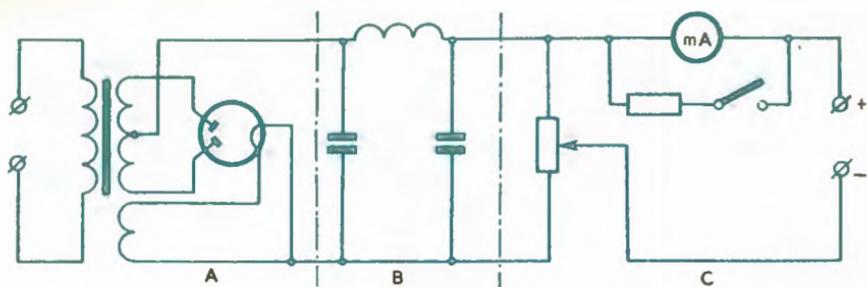


Рис. 56. Схема аппарата для гальванизации.

возбуждения, объясняющую раздражающее действие тока. Другой подход был предложен В. Ю. Чаговцем в его конденсаторной теории: незначительное смещение ионов через пористую перегородку образует противоположные по знаку поляризационные заряды — систему, напоминающую конденсатор. Эта теория успешно объясняет действие кратковременных импульсов тока.

Постоянный электрический ток вызывает в тканях сложные электрохимические и биофизические процессы. Прежде всего происходит местное раздражение током многочисленных нервных окончаний, имеющих в коже. Человек ощущает покалывание, легкое жжение под электродами. (Электроды контактируют с кожей через марлевую салфетку, смоченную лекарством или физиологическим раствором).

Под действием постоянного тока наблюдается также снижение чувствительности тех участков кожи, которые соприкасаются с электродом, соединенным с положительным полюсом источника. Это свойство постоянного тока используется для изменения и снижения чувства боли.

Физиологический эффект, производимый постоянным током, зависит от ряда причин, в том числе от плотности тока, проходящего по тканям организма, и времени его прохождения. Необходимая плотность тока достигается путем подбора силы тока, пропускаемого по тканям данной области организма, и площади электродов.

Лечение постоянным током называется гальванизацией. Аппарат для гальванизации (рис. 56) — это двухполупериодный выпрямитель А с фильтром В, к которому добавлен терапевтический контур С — потенциометр, зашунтированный миллиамперметр, дающий возможность измерять токи от 5 до 50 ма, и выводы к пациенту.

Под действием электрического поля ионы и любые заряженные частички раствора перемещаются. Это явление называется ионофорезом, или ионогальванизацией, и ис-

пользуется для введения в организм лекарственных веществ. Их вводят в организм с помощью прокладок, смоченных раствором этих веществ и подложенных под электроды. Для проведения ионогальванизации нужно учитывать полярность электродов, ибо от анода вводятся ионы металлов, стрептомицина и других веществ, а от катода — кислотные радикалы солей, пенициллин и др.

Лекарства, введенные в организм методом инфореза, не подвергаются разрушению, дольше задерживаются в тканях, постепенно поступая в ток крови.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В МЕДИЦИНЕ

С самого рождения человек буквально «купается» в море электромагнитных волн. Некоторые из этих волн не опасны и даже благожелательны для нас, другие — определенно вредны. Часть радиации имеет естественное происхождение, часть — искусственное.

Получение электромагнитных колебаний

Электромагнитные колебания можно получить с помощью колебательного контура, состоящего из емкости и индуктивности. Если зарядить конденсатор, то в процессе его разрядки в контуре образуются затухающие электромагнитные колебания.

Незатухающие колебания можно получить в колебательном контуре с помощью трехэлектродной лампы. На рис. 57 подана элементарная схема лампового генератора с самовозбужде-

Рис. 57. Простейшая схема генератора незатухающих колебаний.

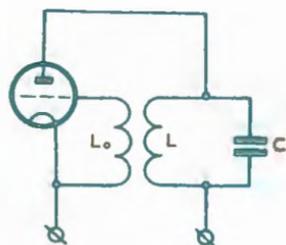
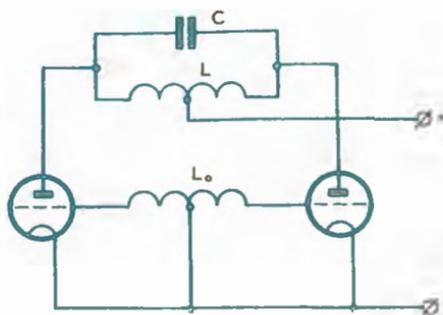


Рис. 58. Схема двухтактного генератора незатухающих колебаний.



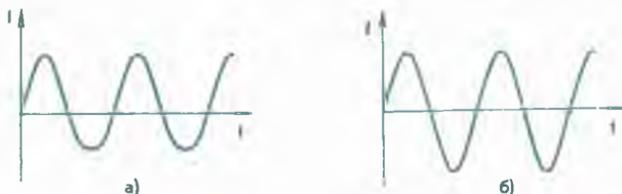


Рис. 59. Графики токов, соответствующие схемам на рис. 57 и 58.

нием. В катушке обратной связи L_0 возникает индукционный ток всякий раз, когда в катушке L происходит изменение тока. Возбужденная в катушке L э. д. с. подается на сетку триода, и в цепи возникают колебания анодного тока с той же частотой, что и колебания в контуре. Это обеспечивает поступление электрической энергии в колебательный контур один раз за каждый период колебания и тем самым возбуждение незатухающих колебаний.

Можно также составить схему двухтактного генератора, т. е. генератора, в котором энергия в колебательном контуре будет пополняться два раза за период, что обеспечивает получение колебаний большей мощности. На рис. 58 изображена схема двухтактного генератора, в котором лампы попеременно питают колебательный контур: в то время, когда одна лампа заперта, другая — открыта. На обкладках конденсатора C заряды будут два раза на период изменяться. Пусть в первую половину периода левая обкладка будет положительная, правая — отрицательная, тогда соответственно на аноде левой лампы будет плюс, на аноде правой — минус. Следовательно, в первую половину периода будет работать левая лампа, а правая будет заперта (если на аноде минус, то ток через лампу пройти не может). Во вторую половину периода знаки на обкладках конденсатора поменяются, соответственно поменяются знаки на анодах триодов и работающей лампой станет правая, левая же будет заперта. Таким образом, в двухтактном генераторе подзарядка конденсатора происходит два раза в период. Это приводит к тому, что величина тока в контуре в течение двух полупериодов одинакова (рис. 59, б), в то время как у однотактного генератора во второй полупериод сила тока меньше, чем в первом, за счет потери части энергии в первом полупериоде (рис. 59, а). Период колебания в колебательном контуре определяется по формуле Томсона: $T = 2\pi \sqrt{LC}$. Для ультравысоких частот величина периода T должна быть достаточно мала, а для этого нужно соответственно уменьшить L и C . Внутриламповые емкости и индуктивности вводов в лампу суммируются с емкостью колебательного контура. Это дает возможность использовать

емкость лампы (междуэлектродные емкости) как емкость колебательного контура.

Следовательно, чтобы получить колебания ультравысокой частоты (УВЧ), нужно в схеме, изображенной на рис. 58, убрать конденсатор из колебательного контура (рис. 60). Принципиальная схема аппарата УВЧ дана на рис. 61.

В этой схеме с двухтактным генератором незатухающих колебаний УВЧ связан терапевтический контур L_1C_1 . Связь — индуктивная, позволяющая избежать проникновения в терапевтический контур постоянной составляющей тока, опасной для больного. В терапевтическом контуре (это колебательный контур) имеются электроды E , расположенные у облучаемого органа пациента, миллиамперметр mA и конденсатор переменной емкости C_1 для настройки контура пациента в резонанс с контуром генератора.

Схема аппарата УВЧ значительно сложнее (рис. 62): она содержит выпрямительное устройство (контур A), двухтактный генератор на тетрадах (контур B) и терапевтический контур (контур C).

Таким образом, в основе аппаратов, обеспечивающих получение токов средних, высоких и ультравысоких частот, лежит генератор электрических колебаний. Медицинские методы, связанные с использованием токов средних, высоких и ультравысоких частот — дарсонваль, диатермия, ВЧ (КВ)* и УВЧ (УКВ)-терапия, — отличаются только параметрами колебаний: частотой, рабочим напряжением, мощностью и т. п., а также методом воздействия на пациента.

При общей дарсонвализации, когда пациент помеща-

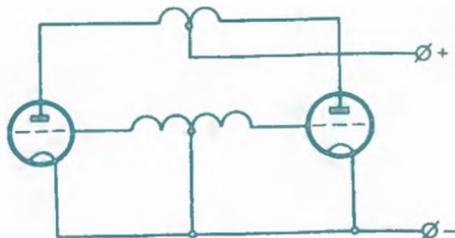
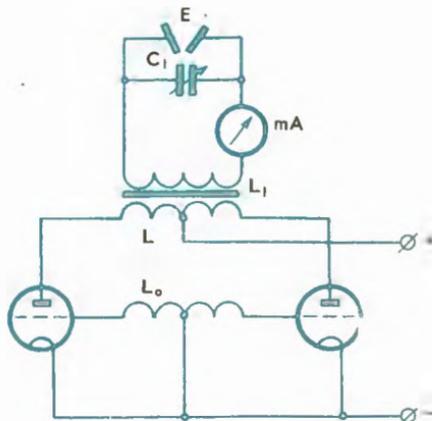


Рис. 60. Принципиальная схема для получения УВЧ колебаний.

Рис. 61. Простейшая принципиальная схема аппарата УВЧ.



* Диапазон волн может быть определен либо частотой: ВЧ (высокая частота), УВЧ (ультравысокая частота), либо длиной волны: КВ (короткие волны), УКВ (ультракороткие волны).

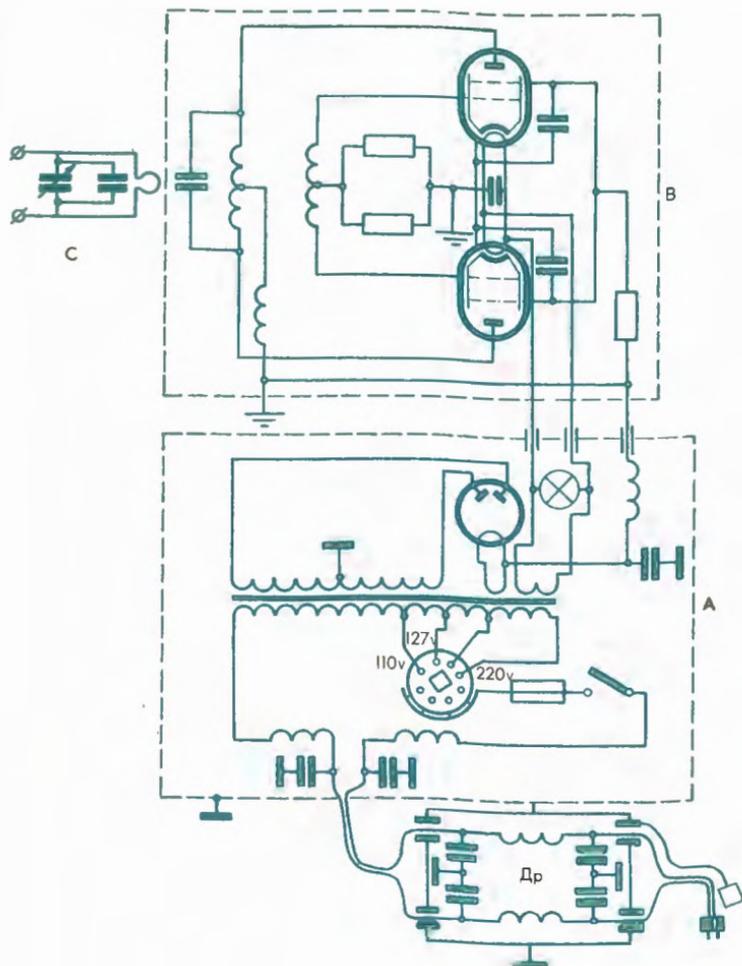


Рис. 62. Схема аппарата УВЧ.

ется внутрь большого соленоида, по которому проходит переменный ток высокой частоты, лечебное действие приписывается индукционным токам, возникающим в пациенте. При местной дарсонвализации электрический ток подводится к пациенту с помощью специального электрода (вакуум-электрод), от которого искра проскакивает к коже человека. Действующим на организм фактором в этом случае является высокочастотный электрический разряд, возникающий между электродом и телом больного. При терапевтической диатермии ток к пациенту подводится с помощью свинцовых электродов и производится прогревание глуболежащих тканей организма. При хирургической диатер-

мий электродом является тонкий проводник или лезвие, которое дает узкий ровный разрез без капиллярного кровотечения. При ВЧ-диатермии, как и при общей дарсонвализации, ток проходит по специальной катушке, которая устанавливается вблизи тела больного, и поэтому в тканях больного возникают индукционные (вихревые) токи, под действием которых происходит нагревание тела (или части тела). Этим и обусловлено название метода — индуктотермия (рис. 63). Ток УВЧ к больному непосредственно не подводится: больной помещается между обкладками конденсатора терапевтического контура в электрическом поле ультравысокой частоты (рис. 64). Ввиду того, что во время работы генератора излучаются в пространство электромагнитные волны и вызывают радиопомехи, необходимо принимать меры к ликвидации радиопомех. Наиболее удобным способом устранения радиопомех оказалось выделение для работы медицинских физиотерапевтических аппаратов специальных узких диапазонов волн, которыми радиовещание не пользуется. В настоящее время для этой цели приняты следующие диапазоны.

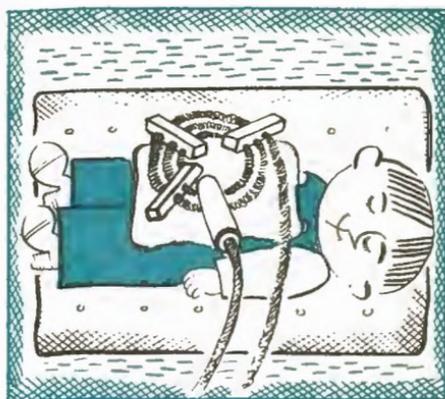


Рис. 63. Процедура индуктотерапии.

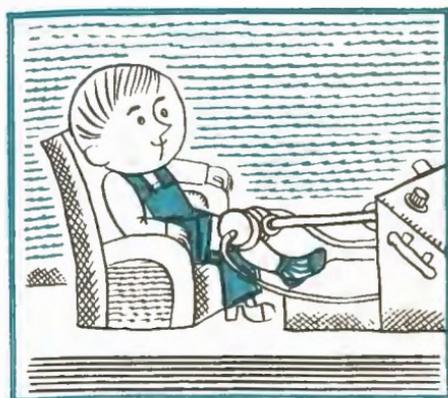


Рис. 64. УВЧ-процедура.

Метод	Частота	Допустимые предельные отклонения	Длины волн
Диатермия	1625 кгц	0,05%	185 м
Индуктотермия	13,56 Мгц	0,05%	22 м
УВЧ-терапия	39 Мгц	2,5 %	7,7 м

Для ограждения электросети от введения в нее токов УВЧ, создающих помехи при пользовании электрической сетью для питания приемников и телевизоров (в непосредственной близости), ставится специальный фильтр — см. рис. 49 и 62 (у вилки приборов).

Остановимся на влиянии электромагнитных волн радиодиапазона на живые организмы.

Радиоволны в медицине

С самого начала появления радио медиков заинтересовали два вопроса: как действуют радиоволны на человека, и если они оказывают вредное действие, то как от него защититься. Над первым вопросом трудятся в содружестве физиологи, биофизики, биохимики, специалисты по профпатологии и др. Второй — забота врачей — специалистов по гигиене труда и инженеров. Попробуем разобраться в этом сложном вопросе. Сложен он потому, что применяются самые разнообразные радиоволны. По длине они охватывают диапазон от долей сантиметра до нескольких километров. Это, в свою очередь, определяет их распространение в пространстве, они пронизывают человеческое тело, способны отражаться от окружающих предметов.

Все радиоволны условно подразделяются на несколько диапазонов:

Название диапазона	Частота	Длина волны
Длинные волны (ДВ)	30—300 кгц	10^4 — 10^3 м
Средние волны (СВ)	0,3—3,0 Мгц	10^3 — 10^2 м
Короткие волны (КВ)	3—30 Мгц	10^2 —10 м
Ультракороткие волны (УКВ):		
метровые	30—300 Мгц	10—1 м
дециметровые	300—3000 Мгц	10—1 дм
сантиметровые	3—30 Ггц	10—1 см
переходные	30—300 Ггц	10—1 мм
миллиметровые	300—3000 Ггц	1—0,1 мм

Длинные и средние волны распространяются на сравнительно большие расстояния — до 1000—1500 км, огибая земную поверхность. Для них совершенно прозрачны и стены, и человеческое тело. Короткие волны и частично ультракороткие не огибают земную поверхность, а, достигая верхних ионизированных слоев

земной атмосферы, отражаются от них, как от зеркала, и возвращаются на Землю. Вот почему прием КВ и УКВ станций возможен или в зоне прямой видимости, или в зоне появления отраженного сигнала. Короткие волны позволяют осуществлять сверхдальние связи со странами другого полушария. На человеческое тело ВЧ, УВЧ и СВЧ производят наиболее сильный эффект, так как поглощаются тканями гораздо интенсивнее, чем ДВ или СВ.

Волны СВЧ распространяются подобно свету; уходя за линию горизонта, они покидают Землю. Это их свойство используют для проведения радиолокационных исследований Луны и других планет. Зато сверхвысокие частоты значительно сильнее поглощаются и отражаются наземными предметами, стенами, растительностью и человеческим телом. В диапазоне от 50 до 10 см практически из всей падающей на тело человека мощности половина отражается, а другая почти полностью поглощается тканями и органами тела. Таким образом, биологическая активность радиоволн (как следствие большего поглощения) возрастает с уменьшением длины волны. Правда, следует отметить, что дальнейшее уменьшение длины волны от 10 до 1 см несколько снижает биологический эффект, поскольку излучение поглощают не все ткани организма, а только самые поверхностные (кожа, подкожная клетчатка). Приблизительно можно считать, что микроволны проникают на глубину, равную $1/10$ длины волны.

Проследим путь поглощаемой тканями энергии радиоволн. Значительная часть ее превращается в тепло, что объясняется возникновением колебаний ионов и дипольных молекул воды, содержащихся в тканях. Поэтому наибольшей эффективностью поглощения и отмечаются ткани со значительным содержанием воды: кровь, мышцы, легкие, печень и т. д. В этих тканях и был в первую очередь обнаружен так называемый «тепловой эффект облучения». Например, для волн длиной 10 см на тепловыделение расходуется около $1/2$ всей энергии излучения, а для 3 см — 98%. Такое большое выделение тепла особенно опасно для органов и тканей, имеющих плохую систему кровообращения. Кровеносную систему можно сравнить с механизмом водяного охлаждения в автодвигателе. Протекая через нагреваемый орган, кровь уносит часть тепла, охлаждая ткани. В случае плохого кровоснабжения перегрев может достичь довольно больших размеров. Так, облучение глаза, где имеется малое количество сосудов, длиной волны 10—12 см может повысить температуру в задней части хрусталика на 20°. Это вызывает его помутнение (катаракту). Как правило, катаракта развивается не сразу, а через несколько недель после облучения и может прогрессировать даже при отсутствии дополнительного облучения. Наблюдения и опыты, поставленные на животных, показали, что минимальная плотность потока, вызывающего гибель животно-

го, зависит от его вида и размеров. Так, собаки в поле с плотностью потока мощностью 100—150 мвт/см² (длина волны 10—12 см) гибнут после 6—10 ч непрерывного облучения, а мыши и крысы — через 10—30 мин.

Было установлено, что наиболее активным является дециметровый диапазон колебаний. Метровые и сантиметровые волны оказались наименее опасными. Гибель животных наступала от перегрева организма. Измерение температуры в различных органах и тканях подопытных животных показало, что нагревание происходит не только в поверхностных слоях тканей (кожа, подкожная клетчатка, как это имеет место при инфракрасном облучении), но и в более глубоких слоях организма. Оказалось, что тепловой эффект поля СВЧ примерно в 7 раз больше, чем инфракрасных лучей. Прерывистое облучение в 6 раз менее эффективно, чем непрерывное. Это можно объяснить тем, что компенсаторные механизмы успевают отвести часть тепла, вследствие чего нарастание гипертермии замедляется.

Действие радиоволн на живые организмы не ограничивается тепловым действием. Опыт показал, что при определенных частотах простейшие организмы — амебы, инфузории, бактерии и вирусы — начинают ориентироваться в жидкой среде соответственно силовым линиям поля. В частности, установлено, что частоты от 5 до 40 Мгц «управляют» поведением амев, стафилококков и т. д. Частота 6 Мгц заставляет их двигаться вдоль силовых линий, а 15 Мгц — изменять направление движения на 90°. Весьма возможно, что подобное воздействие испытывают и хромосомы клеток, что приводит к изменению генетического кода и, в свою очередь, к изменению наследственных свойств. Такое влияние на живые и неживые организмы, при котором не наблюдается заметной температурной реакции, называется атермическим, или «специфическим» действием микро-

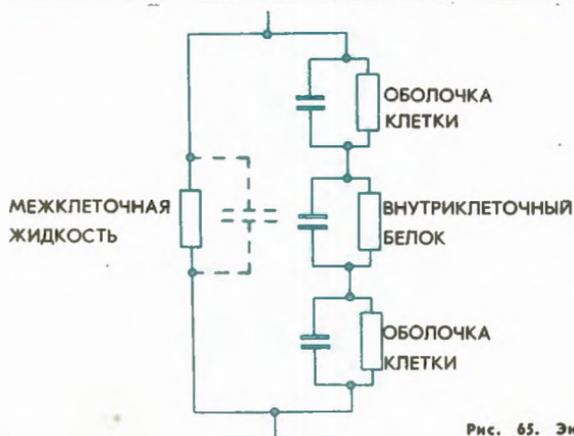


Рис. 65. Эквивалентная электрическая схема клетки.

волн. Оно было обнаружено и при клиническом обследовании людей, занятых на производстве и связанных с постоянным облучением персонала радиоволнами малой интенсивности.

Анализируя полученные результаты, ученые предложили различные возможные механизмы первичного действия радиоволн. Если рассматривать живые ткани как резисторно-емкостную цепь, то на низких частотах межклеточная жидкость как электролит шунтирует большую емкость клетки в целом (рис. 65). С увеличением частоты емкостное сопротивление уменьшается и ток начинает проходить через клетку. Для ВЧ и СВЧ реактивное сопротивление весьма незначительно, и электрические свойства тканей определяются проводимостью внутриклеточного белка (протеина).

Как только экспериментаторы установили активное действие радиоволн на живой организм, сразу возникла задача применения этого фактора в качестве лечебного средства.

В первую очередь наиболее подробно были изучены и внедрены в клинику радиоволны КВ и УВК диапазонов. Еще в 30-е годы появились многочисленные аппараты (например, «Ультра терм»), где использовалось свойство УВЧ поля вызывать нагрев тканей. При целом ряде заболеваний было невозможно прогреть глубоко лежащие ткани (например, гаймориты и лобные пазухи в костях черепа) только подведением тепла к поверхности тела. С развитием радиоволновой аппаратуры на восстановительные процессы в глубинах суставов и костей, в различных полостях организма, теперь можно было воздействовать извне.

Недостатком этого метода явилось лишь то, что прогрев захватывал иногда слишком широкие участки соседних тканей и органов. Только в 50-е годы бурное развитие микроволновой техники позволило создать аппаратуру, лишенную этого недостатка. СВЧ-терапия с успехом применяется при заболеваниях опорно-двигательного аппарата (например, при воспалениях суставов, заболеваниях мышечного аппарата), нервной системы, внутренних органов (воспаление плевры, мочевого и желчного пузырей), органов малого таза и др.

В последние годы очень часто появляются сообщения о терапевтических возможностях СВЧ-терапии. Так, имеются данные о положительном влиянии радиоволн при язвенной болезни. Особенно благоприятна СВЧ-терапия при острых травмах (ушибах мышц, костей и суставов, разрывах сухожилий, связок, суставных сумок). Эффективна СВЧ-терапия при гайморите и воспалении среднего уха.

Очень интересные данные представляют исследования сверхдлинных радиоволн ($\lambda = 30\text{---}300$ км), начатые в последние годы. Весьма возможно, что эти радиоволны помогут раскрыть многие особенности нервно-психической деятельности человека. Это дело будущего, залогом его является бурное развитие радиоэлектроники.

Мы уже говорили, что деятельность нашего организма основана на определенных ритмах: бодрствование сменяется сном, ритмично работают сердце, легкие, мышцы и другие системы и органы. Иногда эта ритмичность нарушается. Вот тогда-то и приходят на помощь врачу импульсные токи.

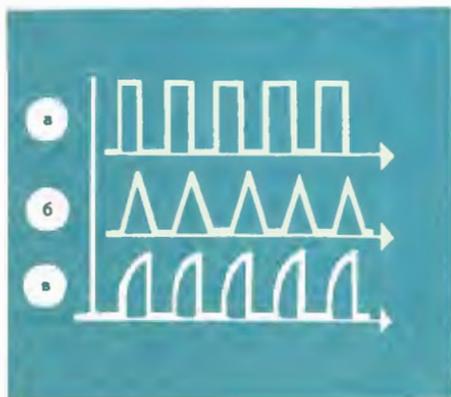
Основные характеристики импульсных токов

Нервная система, особенно нервно-мышечный аппарат, реагирует на изменения силы постоянного тока (на импульсы), поэтому в медицинской практике для терапии и диагностики широко используются импульсные токи.

Импульсные токи характеризуются: а) частотой повторения импульсов, измеряемой в герцах, б) длительностью каждого импульса, или «скважностью», т. е. отношением периода к длительности импульса, в) формой импульса. По форме импульса, они делятся на прямоугольные (а), тетанизирующие (б), экспоненциальные (в) и др. (рис. 66). Длительность прямоугольных импульсов, применяемых для лечебных целей, составляет 0,1—1 мкс (микросекунд), а частота 10—100 гц. Длительность тетанизирующих импульсов 10—15 мкс при постоянной частоте 100 гц. В отличие от этого частота экспоненциальных импульсов плавно изменяется от 10 до 100 гц, их продолжительность может изменяться в значительном диапазоне — от 2 до 60 мкс. Бывают и другие импульсы — с другой формой, частотой, периодом.

Рис. 66. Форма импульсных токов.

Получение импульсных токов



Для получения импульсного тока можно использовать газонаполненный триод — т и р а т р о н, который в отличие от вакуумного триода может пропускать значительные токи: наличие газа делает его внутреннее сопротивление относительно небольшим.

На рис. 67 изображена схема установки, с помощью

которой можно получать импульсные токи. На сетку тиратрона T подается отрицательный потенциал, который запирает тиратрон до тех пор, пока конденсатор C не зарядится через резистор R_7 от анодной батареи B_a . Как только конденсатор C зарядится до потенциала, достаточного для ионизации газа в тиратроне, произойдет разряд конденсатора C через тиратрон. В момент разряда сетка не будет влиять на анодный ток, ибо

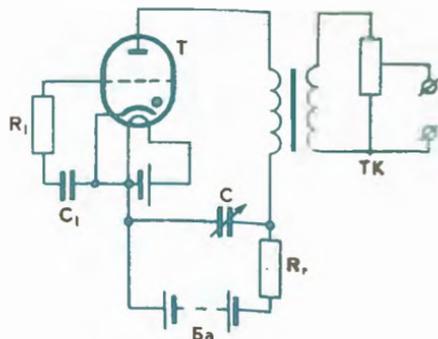


Рис. 67. Схема установки для получения импульсных токов.

газ в тиратроне ионизирован. Разряд быстро прекращается, поскольку напряжение на конденсаторе C падает ниже разрядного. Сетка снова запирает тиратрон, и конденсатор C опять заряжается от анодной батареи. Изменения потенциала на сетке должны быть сдвинуты по фазе относительно изменений потенциала на конденсаторе C ; для этого используют регулировочный мостик, состоящий из резистора R_1 и емкости C_1 . Таким образом, через тиратрон будет проходить ток в момент разряда конденсатора C . Эти импульсы тока возбуждают по индукции соответствующие импульсы напряжения в терапевтическом контуре TK . Основным преимуществом таких схем является возможность изменять частоту импульсов тока (за счет изменения R и C) в пределах от 0,1 до 20 000 гц. В настоящее время довольно широко используются мультивибраторы — электронные устройства, дающие возможность получать импульсы, у которых в широких пределах можно изменять любые характеристики.

Физиологическое действие импульсных токов

Под действием электрического тока в нервных тканях происходят физико-химические изменения, характер которых зависит от параметров тока. При действии импульсных токов реакция организма зависит от параметров импульсных токов, в особенности от частоты импульсов. Так, при частотах 5—50 гц, пропускаемых через головной мозг, наступает состояние сна — электросон, а при частотах порядка 100 гц — наркотическое состояние — электронаркоз. Одиночные импульсы тока достаточной интенсивности, воздействуя на двигательный нерв или мышцу, вызывают быстрые кратковременные ее со-

кращения. Если же частота импульсов достигает, например, 100 гц, то наступает продолжительное, удерживающееся в течение всего времени прохождения тока, тетаническое сокращение мышцы (от греческого tetanos — напряжение, судорога).

Эти свойства импульсных токов используются с лечебной целью, в частности для электростимуляции, или электрогимнастики, мышц. Этот метод применяется, когда необходимо поддержать работоспособность и питание мышц в период восстановления поврежденного нерва, по которому из центральной нервной системы не могут поступать сигналы. Электростимуляция с успехом используется также для предупреждения атрофии во время вынужденного бездействия мышц — после операции на суставах, наложения гипсовых повязок или шин при переломах.

Импульсные токи пришли также на помощь сердцу, которое при всех своих несомненных достоинствах — один из наиболее ранних органов человека. Так, например, вместо периодических сокращений мышц желудочков и предсердий может наблюдаться беспорядочное поверхностное сокращение. Это явление, называемое фибрилляцией, является следствием нарушения синхронности сокращений волокон сердечной мышцы.

В конце XIX века швейцарские исследователи Прево и Бателли в опыте на собаке впервые электрическими разрядами устранили беспорядочное сокращение сердечной мышцы. Однако прошли многие десятилетия, прежде чем удалось создать специальный аппарат — дефибрилятор. Ток силой 0,1 а грозит человеку гибелью. Но спрессованный в мгновения (несколько микросекунд), он при большой силе в 25—30 а — способен побороть фибрилляцию и вырвать человека из рук смерти.

Сердце — не только превосходный насос, но и прекрасный образец автономной системы автоматического регулирования. Однако есть заболевания, при которых командные биоэлектрические импульсы центральной нервной системы не достигают сердечной мышцы.

Тысячи людей обязаны жизнью электрокардиостимуляторам. Эти приборы через специальные электроды слабыми электрическими импульсами навязывают сердцу нужный режим, задавая программу деятельности сердечной мышце. Как бы ни были совершенны электростимуляторы сердца, у них есть один существенный недостаток — энергии батарей, питающих их током, хватает лишь на несколько лет. Затем больного приходится оперировать — удалять электростимулятор и заменять его батареею. Сейчас ведутся работы по созданию электростимулятора, который можно периодически подзаряжать, не вторгаясь в организм, — через кожу.

Система подзарядки основана на передаче электромагнитной энергии с помощью специальных магнитных контуров. Требуе-

мый режим зарядки автоматически регулируется электронной схемой. Как известно, ритм сердца меняется в зависимости от физической, эмоциональной, умственной нагрузки человека. Новая система в этом смысле гибка: она наиболее эффективна для биоуправляемых стимуляторов.

Электрический ток в роли скальпеля

Неотъемлемым атрибутом хирурга считают скальпель. Электрический ток и здесь внес поправку. Оказалось, что токи высокой частоты довольно успешно могут конкурировать с хирургическим ножом.

В настоящее время очень широко распространена электрохирургия. При значительной силе высокочастотного (1—1,5 Мгц) тока нагрев ткани достигает 60°C и наступает свертывание (коагуляция) белковых тканей с последующим образованием струпа (некроза). Это явление называется диатермокоагуляцией. Оно используется в хирургии для электрокоагуляции — прижигания при помощи тупого электрода и электротомии — разреза при помощи игольчатого электрода.

Электроразрез обладает рядом важных преимуществ по сравнению с обычным: не кровоточит (кровь свертывается при нагреве), стерилен (бактерии погибают), окружен относительно малопроницаемой зоной, что особенно важно при онкологических операциях. Применение современной электронной техники дает возможность получить зону коагуляции толщиной всего лишь несколько микрон, что резко снижает побочные вредные явления, обусловленные свертыванием белков.

Электрохирургические приемы особенно перспективны (кроме онкологии) при операциях на легких, печени и т. д., где возможны обильные кровотечения. В некоторых случаях электрохирургия избавляет от необходимости вскрывать брюшную полость. Так, удаление опухолей в мочевом пузыре с помощью токов высокой частоты может быть осуществлено через мочеиспускательный канал. В этом случае электрод вводится через специальный канал цистоскопа и хирург удаляет опухоль, видя операционное поле.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

Немного истории

Из седых глубин древности до нас доходят сведения о лечебных свойствах магнитных полей. Для лечебных целей магнит стал употребляться, вероятно, раньше, чем для определения сторон света. Каждый известный врач прошлого предлагал собственный рецепт использования магнитов. Магнит окутывался плотным мистическим ореолом, о нем слагали стихи, ему приписывали сотни самых невероятных свойств.

Древние халдеи, евреи и египтяне смотрели на магнит как на средство достижения бессмертия. Для некоторых магнит был ядом, в таком случае противоядием считался чесночный сок. Как местное наружное средство магнит пользовался большим успехом у китайцев, индусов, египтян, арабов, греков, римлян и т. д.

Двадцать его лечебных свойств упоминали в своих трудах Аристотель и Плиний. В более позднее время в разные эпохи на первый план выступали различные стороны лечебных свойств магнита. Диоскрид (I век) рекомендовал его для избавления от дурного расположения духа. Гален (III век) хвалил магнит как слабительное средство и прописывал его от водянки. Марцелл из Бордо (IV век) считал, что при ношении на шее магнит успокаивает головную боль. Азций д'Амида (V век) использовал магнит при конвульсиях и болях в суставах. Знаменитый Авиценна (XI век) отмечал облегчение болей под влиянием магнита при болезнях селезенки. Альберт Великий (XIII век) говорил, что при ношении магнита на левой руке магнит разгоняет сновидения, удаляет яд из организма, излечивает безумие.

Активным проповедником лечебных свойств магнита был великий немецкий врач Парацельс (XIV век). Вот как писал он о магните: «...Я утверждаю, ясно и открыто, на основании произведенных мною опытов с магнитом, что в нем сокрыта тайна высокая, без которой против множества болезней ничего сделать невозможно. Он излечивает истечения из глаз, ушей, носа и из наружных покровов.

Тем же способом излечиваются раскрытые раны на бедрах, фистулы, рак, истечения крови у женщин. Кроме того, магнит оттягивает грыжу, исцеляет переломы, он вытягивает желтуху, оттягивает водянку, как я неоднократно убедился в этом на собственной практике»^{*}.

Вот еще одно высказывание не менее авторитетного лейбмедика королевы Елизаветы Вильяма Гильберта: «Наилучшее железо, атома, или халиос, сталь или ациарит превращают с помощью пил в мелкий порошок, этот порошок обливают очень едким уксусом, сушат на солнце, снова обливают уксусом и сушат, а после этого промывают ключевой или какой-нибудь другой подходящей водой и сушат. Затем оно, снова превращенное в порошок и размельченное на порфире, процеживается через мелкое сито и хранится для употребления.

Дают его при болезнях расширенной и слишком влажной печени, при увеличенных селезенках. Оно возвращает здоровье и красоту некоторым девушкам, страдающим бледностью и дурным цветом лица, так оно сильно сушит и оттягивает, не причиняя вреда».

Но Гильберт предостерегал против использования магнита в качестве универсального средства при лечении всех болезней. Он считал, что «природа магнита двойственна и пагубна». И если иногда в чистом виде магнит может быть не только безвредным, но и «иметь» способность привести в порядок слишком влажные и гниющие внутренности и улучшить их состав, то в большинстве случаев магнит оказывается бессильным.

В России первые сообщения о лечаемом действии магнита относятся к 1881 году. В книге известного врача Григорьева «Металлоскопия и металлотерапия» подводятся итоги работам Боткина и Шарко в этом направлении. Они пришли к выводам, что магнит может вызывать в месте действия ощущения зуда, ползания мурашек, покалывания или боли; восстанавливать нарушенную чувствительность кожи и сетчатки или осуществлять «перенос» анестезии с больной половины тела на здоровую; уничтожать или выявлять параличи и судороги; успокаивать боли различного происхождения или вызывать прошедшие боли; вызывать общую слабость, головную боль и сонливость.

Современная медицина, отбросив мистическое представление о магнитах, продолжает исследовать влияние магнитного поля на организм человека и ищет в магнитном поле союзника для лечения и диагностики.

^{*} С. Цвейг, *Врачевание и психика*. Собр. соч. т. II. М., «Время», 1932, стр. 45.

Очень интересной является ориентация птиц по геомагнитному полю. Каждой весной стаи птиц летят на север, а каждой осенью они повторяют свой полет в обратном направлении. Как птицы находят путь в этом многокилометровом странствии? В 1885 году русский академик А. Т. Миндендорф, изучая сроки весенних перелетов некоторых птиц Сибири, высказал предположение об их ориентации по магнитному полю Земли. За норму напряженности геомагнитного поля принято 0,5 эрстеда (э). Поведение животных изучалось при отклонении значения напряженности от этой величины.

Оказалось, что голуби с закрепленным на спине магнитом весом 0,7 г, создающим в области головы поле напряженностью 0,15—0,20 э, возвращаются домой гораздо позже контрольных. При наблюдении за траекторией полета голубей их дезориентация была отмечена как раз в местах магнитных аномалий. Наблюдения показывают, что, кроме доминирующей звездной ориентации при миграции, существует и дублирующая ориентация по геомагнитному полю. Последняя используется птицами только в том случае, если нет звездных ориентиров.

Интересное объяснение этому явлению дал Ж. Барриотти в 1964 г. Суть его заключается в том, что птицы способны воспринимать индукционный ток, который они создают, пересекая силовые линии геомагнитного поля и превращая постоянный ток в переменный благодаря взмахам своих крыльев. При различном направлении полета индуцированный переменный ток не обязательно будет синхронным в обоих крыльях. Соответственно птица должна иметь какой-то орган для восприятия этих различий.

Умение ориентироваться по геомагнитному полю не является только птичьей привилегией. Если использовать юридический прием «кому это выгодно?», то вслед за птицами кандидатами на обладание чувствительности к геомагнитному полю будут рыбы. Некоторые представители этого класса позвоночных животных (угорь, лососевые, осетровые) переплывают огромные расстояния без всяких видимых ориентиров. Партия молодых угрей длиной 9—10 см в апреле 1970 г. была выловлена в реках Западной Франции и самолетом переправлена в Калининград. Там их поместили в аквариум. При движении угрям приходилось выбирать один из двух поворотов. Угри предпочитали направление 60—240° и избегали 0—180°, т. е. направления магнитного меридиана. Если исследуемые рыбы помещались в уменьшенное (по сравнению с геомагнитным) поле, ориентация не проявлялась: угри с одинаковым «удовольствием» посещали различные участки лабиринта. Когда же над лабиринтом

помещались постоянные магниты, создающие магнитные поля в дополнение к геомагнитному, ориентация угрей изменялась. Наконец, если рыб помещали на 1 ч в сильное магнитное поле (2700 э), они «забывали» о действии геомагнитного поля и на некоторое время теряли способность к ориентации.

Значит, не только птицы знают секрет компаса!

Немецкий энтомолог Г. Беккер с 1963 г. публикует данные об исследовании ориентации насекомых в магнитном поле. Оказалось, что при посадке в конце полета и при отдыхе жуки, сверчки, кузнечики, пчелы, мухи и другие насекомые предпочитают направление север—юг и запад—восток. Если в лабораторных условиях с помощью колец Гельмгольца — специальных соленоидов — на 95% скомпенсировать геомагнитное поле, т. е. довести его почти до нуля, то отмеченная ориентация не наблюдается. Другие немецкие ученые наблюдали в таких «немагнитных» условиях нарушения в танцах пчел, с помощью которых рабочая пчела обычно информирует своих собратьев по улью о местонахождении взятка.

При создании увеличенного (по сравнению с земным) магнитного поля Г. Беккер, швейцарский энтомолог Ф. Шнейдер и советский энтомолог В. Б. Чернышев отмечали нарушения ориентации и увеличение двигательной активности насекомых. Кроме того, В. Б. Чернышев обнаружил такой же эффект во время геомагнитных бурь. Уменьшение до нуля напряженности геомагнитного поля может привести к гибели даже кроликов.

Магнитное поле в ботанике

Советский физиолог растений А. В. Крылов провел серию очень интересных опытов. Он изучал влияние магнитного поля Земли на прорастание семян. Результаты эксперимента показали, что скорость прорастания семян кукурузы меняется с изменением ориентации их в магнитном поле Земли.

Суть явления заключалась в том, что семена кукурузы или пшеницы, ориентированные корешком зародыша к южному магнитному полюсу Земли (ориентироваться должны сухие семена, а не влажные!), в темноте при температуре 18—25°C прорастают на сутки раньше; рост корневой системы и стеблей более интенсивный, чем у семян, ориентированных противоположным образом. Корешки семян, ориентированных к северному магнитному полюсу Земли, изгибались на 180° и росли в сторону южного магнитного полюса. Это явление, наблюдавшееся и в искусственных магнитных полях, было названо **магнитотропизмом**.

Данные А. В. Крылова об ориентационном влиянии геомагнитного поля на растения подтверждаются последующими исследова-

дованиями. Так, при ориентированном севе семян (зародышем к северу) канадский агроном У. Питманн наблюдал, что прорастание семян пшеницы происходило на 8—12 часов раньше. По данным советских и зарубежных исследований, корни редиса и свеклы располагаются преимущественно в направлении север—юг и запад—восток, т. е. напоминают поведение насекомых. Подобную ориентацию отмечали и у хвойного растения туи. Значит, и животные, и растения, возможно, обладают своеобразным живым компасом. А есть ли он у человека?

Человек и его магнитное поле

Наблюдения показывают, что магнитное поле есть у каждого человека. Правда, оно очень слабое. Так, сгибая и разгибая руку, человек создает на ее поверхности магнитное поле с индукцией в одну стотысячную долю тесла. Сердце человека — тоже магнит. Напряженность магнитного поля сердца очень мала. Ее максимальное значение составляет 10^{-6} напряженности магнитного поля Земли. Магнитное поле сердца является переменной величиной, возникающей одновременно с его электрической активностью.

Запись изменяющегося магнитного поля сердца — магнитокардиограмма — может быть произведена при помощи специальных приборов — магнитокардиографов. Обследуемого человека и датчик помещают в магнитоэкранируемую камеру (стальной экран). Меняя позицию датчика, можно регистрировать магнитные поля отдельных участков сердца. Преимуществом этого метода перед электрокардиографическим является то, что при его помощи можно получить сведения об электрически «немых» областях сердца. Прибор состоит из индуктивного датчика, усилителя и регистрирующего устройства. Вокруг биотока, как и возле любого тока, создается магнитное поле. Частота изменения этого поля 8—12 гц. Датчик представляет собой катушку, число витков которой превышает миллион. При изменении магнитного поля сердца в обмотках датчика индуцируется ток. Этот ток усиливают специальными усилителями и подают на регистрирующее устройство.

При помощи индукционных датчиков удалось зафиксировать магнитное поле возбужденного нерва и магнитное поле вокруг головы человека. Это было особенно трудно, ведь магнитное поле мозга в 1000 раз слабее магнитного поля сердца. Надо было изолировать прибор от внешних воздействий поля Земли, полей промышленных установок, электросети: изучать биологический магнит мозга можно лишь в абсолютной «тишине».

Магнитокардиограммы позволили получить принципиально новые сведения о работе сердца, открыв путь ранней диагностики

целого ряда заболеваний: дистрофии миокарда, гипертрофии сердечной мышцы и т. п. Развивая идею биоэлектрического управления, ученые построили систему, в которой биотоки сердечной мышцы использованы для управления рентгеновскими аппаратами. Система позволяет сделать рентгеновский снимок сердца в любой момент его сокращения.

Итак, магнитное поле пришло на службу человеку. Но, естественно, возникает вопрос: «Не таит ли магнитное поле опасности для человека?»

Какие эрстеды безвредны?

Исследования показывают, что у людей, подвергшихся длительному воздействию магнитных полей (руки находились в поле напряженностью 350—3500 э, а голова — не выше 150—250 э), на протяжении 20—60% рабочего времени, чаще всего отмечались отклонения со стороны нервной и сердечно-сосудистой системы. Неврологические отклонения характеризовались возникновением головных болей (во второй половине дня и после работы), болей в области сердца, утомляемости, головокружения, снижением и неустойчивостью аппетита, бессонницей, повышенным потоотделением, появлением ощущения зуда и жжения на кистях. При исследовании электроэнцефалограмм (ЭЭГ) у этих людей преобладал процесс торможения в головном мозгу. На неприятные ощущения в области сердца жаловались 19 из 32 обследованных. В 11 из 43 случаев обнаруживали изменения звучности сердечных тонов. Замедление частоты сердцебиения (б р а д и к а р д и я) отмечалось у 5 из 43 обследованных. Причем брадикардия встречалась тем чаще, чем интенсивнее магнитное поле было на производстве. У 34 из 43 лиц обнаружено снижение максимального артериального давления на 10—18 мм рт. ст. Интересно, что уровень заболеваемости гипертонической болезнью у работающих в магнитном поле ниже, чем по Союзу. Как тут не вспомнить магнитные браслеты! Тем более, что частота гипертонической болезни у обследованных была обратно пропорциональна напряженности магнитного поля. У людей, работающих в магнитных полях, наблюдали повышенное содержание в крови гамма-глобулина и понижение содержания нуклеиновых кислот и некоторых ферментов. Кровь характеризовалась снижением числа лейкоцитов и снижением скорости оседания эритроцитов.

Большинство изменений, возникающих в организме человека под влиянием магнитных полей, носит функциональный, т. е. обратимый, характер, если не считать стойких патологических поражений кистей рук. На кистях рук у 36 из 41 рабочих были

обнаружены своеобразные сосудисто-вегетативные нарушения. Кисти на ощупь были теплые, будто только что вынуты из горячей воды, иногда наблюдалось истончение кожи на ладонях, почти полное отсутствие ее рисунка. Замечено некоторое уменьшение подвижности в межфаланговых суставах. Болевая чувствительность часто была пониженной.

Следовательно, нельзя не учитывать вредное действие магнитного поля на организм. В производственных условиях напряженность магнитного поля не должна превышать 300 э.

Магнит лечит

Медицинская специальность электромагнита — удаление ферромагнитных осколков из ран или глаза. Для этого один из полюсов электромагнита изготавливается в форме спицы.

Используют электромагниты и для магнитного массажа желудка. Больной принимает какой-нибудь магнитный порошок, например Fe_2O_3 , после чего к области желудка подносят электромагнит. При замыкании тока порошок притягивается к магниту и фиксируется слизистой оболочкой желудка. Меняя ток, можно производить массаж с внутренней стороны желудка.

Сейчас в СССР очень широко исследуют магнитное влияние на течение различных заболеваний до и после оперативного вмешательства. В частности, накоплен интересный опыт наблюдений рассасывания рубцов, образовавшихся после операций, под действием магнитного поля.

Исследования дают возможность надеяться, что недалек тот день, когда можно будет уверенно прогнозировать степень замедления оседания эритроцитов (оседание эритроцитов — важная диагностическая проба).

Ю. А. Холодов впервые доказал, что постоянное магнитное поле, влияя на мозг, вызывает торможение коры. Это приводит к понижению порога болевой чувствительности. Концентрируя в небольшом объеме достаточно большие поля, можно применять электронаркоз при меньших дозах наркотических веществ и даже надеяться на успешное применение магнитных полей для местного обезболивания. Не исключено, что пациент стоматологического кабинета завтрашнего дня будет спокойным, т. к. чувствительность его зубного нерва под действием магнитного поля уменьшится в 2—3 раза.

По сути взаимодействие постоянного магнитного поля с живыми организмами нужно рассматривать как взаимодействие со средой, на 60—70% состоящей из воды. Интересными являются данные о том, что предварительное «омагничивание» биологических объектов снижает их смертность при радиоактивном поражении.

ОПТИКА В ПРИРОДЕ И МЕДИЦИНЕ

СВЕТ И ГЛАЗ

Как это начиналось?

Можно предположить, что жизнь возникла при участии света. На нашей планете почти нет существ, безразличных к свету. Даже одноклеточные животные, у которых нет глаз, и те отличают свет от темноты.

Начало органу зрения дало появление специальных светочувствительных клеток. До сих пор на Земле сохранились живые существа, фиксирующие свет при помощи пигментных клеток. Среди них хорошо известен дождевой червь. У него нет глаз, зато в коже много светочувствительных клеток. С их помощью он улавливает незначительное изменение освещенности. Из таких вот разбросанных по всей поверхности тела клеток и возникли в процессе эволюции глаза. Сначала это были просто пятнышки, скопление светочувствительных клеток. Такие глаза хорошо отличают свет от темноты, но направление света определить не могут.

Дальнейшая история развития глаз такова: светочувствительные клетки уходят под прозрачные покровы, появляются экраны из пигментных клеток, которые делают невозможным освещение со всех сторон. Затем светочувствительные пятнышки превращаются в ямки или даже пузырьки — первые настоящие глаза. Они могут улавливать только свет, идущий в определенном направлении, поэтому очень легко определяют направление падающих лучей. Затем появляются светопреломляющие системы, аккомодационные устройства, изменяющие степень преломления световых лучей, и, наконец, глазодвигательный аппарат, который позволил вести активный поиск зрительной информации.

Глаз человека устроен ничуть не хуже современного фотоаппарата. Он имеет специальные устройства, преломляющие световые лучи и фокусирующие их на внутренней поверхности задней стенки глаза, диафрагму, регулирующую количество проникающего внутрь света, и светочувствительные элементы, воз-

буждение которых по волокнам зрительного нерва транслируется в затылочные области мозга, где, как на экране телевизора, происходит своеобразная развертка, возникают зрительные образы.

У кого какие глаза?

Чтобы отчетливо видеть окружающие предметы, необходимо очень точно сфокусировать их изображение на воспринимающих элементах. В современных фотоаппаратах это достигается перемещением объектива. Точно такую же конструкцию можно встретить в глазах некоторых позвоночных. Хрусталик, прозрачное чечевицеобразное тело, является одной из главных преломляющих сред глаза. У рыб и амфибий хрусталик может передвигаться вдоль оптической оси глаза. У рептилий, птиц и некоторых млекопитающих имеется приспособление, позволяющее им осуществлять фокусировку, изменяя кривизну хрусталика, а следовательно, и его оптическую силу:

$$\frac{1}{F} = (n_{21} - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Интересно, что у хрусталика изменяется главным образом кривизна его передней поверхности, радиус которой колеблется между 6 и 10 мм. Радиус задней поверхности изменяется не больше, чем на полмиллиметра.

Рис. 68. Разрез глаза.

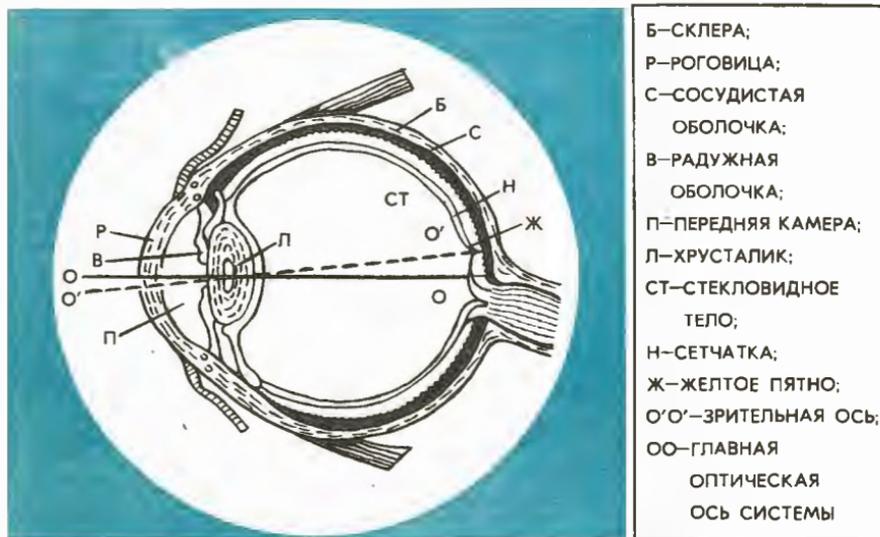




Рис. 69. Жук-ветрячок имеет две пары глаз: одну для воды, а другую — для воздуха.

В преломлении света в основном принимают участие роговица и хрусталик (рис. 68). Показатели преломления роговицы и находящейся за ней жидкости почти такие же, как у воды. Поэтому под водой зрение человека нарушается. Световые лучи, попадающие в глаз, проходят сквозь роговицу не преломляясь, а один хрусталик не в состоянии сфокусировать световой поток. В воде человек становится очень дальновзорким. Для водолазов и аквалангистов изображение получается вполне отчетливым, только предметы кажутся на треть больше, чем на самом деле. (Между глазом и водой слой воздуха и стекло).

Роговица рыб, как и человека, неспособна в воде преломлять световые лучи. Она у них плоская, зато хрусталик шаровидный. У китов роговица выпуклая, показатель ее преломления велик, в фокусировке принимают участие и роговица, и хрусталик. Жуки-ветрячки живут в воде, но являются частыми гостями на суше. Природа снабдила их двумя парами глаз: одной для воды, второй — для воздушной среды (рис. 69). Аналогично устроены глаза у четырехглазки, обитающей в водоемах Центральной и Южной Америки. Фактически у нее два вполне обычных глаза, только зрачки их вытянуты в вертикальном направлении и разделены на две части специальной перегородкой. Преломляющие среды верхней части глаза приспособлены для зрения в воздушной среде, нижние — в водной.

Бакланы могут очень значительно менять кривизну хрусталика. У бакланов оптическая сила хрусталика составляет 40—50 диоптрий, поэтому они одинаково хорошо видят и очень близкие, и очень далекие предметы.

Глаза животных иногда достигают прямо-таки гигантских размеров: у глубоководных моллюсков до 20 см в диаметре, у глубоководных рыб и моллюсков глаза имеют телескопическую, удлиненную форму и очень большой зрачок. Все это направлено на то, чтобы собрать внутри глаза как можно больше света.

У глубоководных рыб и наземных хищников внутренняя поверхность глаза имеет блестящий слой, так называемое зеркальце, которое отражает падающий на него свет. Благодаря этому зеркальцу светятся по ночам и кошачьи глаза. Такие глаза способны максимально полно использовать попадающий в них свет. Человеческий глаз способен сохранять на сетчатке изображение в течение $1/18$ сек. Благодаря тому, что во время демонстрации фильмов отдельные диапозитивы сменяются с частотой 24 кадра в секунду, мы видим непрерывное изображение. Птицы и летающие насекомые так долго зрительный образ на сетчатке не сохраняют. Это помогает им видеть окружающий мир при быстром полете. Зато они лишены удовольствия смотреть кинофильмы. Чтобы насекомые увидели единое изображение, потребовалось бы пропускать не менее 200 кадров в секунду.

Глаз как оптический прибор

Рассмотрим подробнее физику человеческого глаза. На рис. 68 изображен схематический разрез глаза. Его устройство рассматривается в школьных учебниках.

С оптической точки зрения глаз представляет собой темную камеру приблизительно сферической формы диаметром порядка 2,5 см, в которой преломляющими средами являются роговая оболочка (показатель преломления $n=1,38$), хрусталик ($n=1,44$) и жидкости передней камеры и стекловидного тела ($n=1,33$). Радужная оболочка играет роль апертурной диафрагмы. Суммарный оптический эффект преломляющих сред глаза соответствует центрированной системе линз, главная оптическая ось которой проходит через центры роговицы, зрачка и хрусталика (см. рис. 68).

Прямая, соединяющая центр хрусталика с центром сетчатки (желтое пятно), называется зрительной осью глаза ($O'O'$); она определяет направление, по которому глаз обладает наибольшей чувствительностью при дневном зрении. Передний фокус глаза находится на расстоянии 13,3 мм от вершины роговицы, задний — на расстоянии 22,6 мм.

В дальнейшем для простоты центрированная оптическая система глаза рассматривается как эквивалентная одной линзе. Такая рабочая модель глаза называется редуцированным глазом. Оптический центр редуцированного глаза (по Вербицкому) находится на расстоянии 6,8 мм от вершины роговицы, заднее фокусное расстояние 16 мм. Это соответствует оптической силе редуцированного глаза около 63 диоптрий.

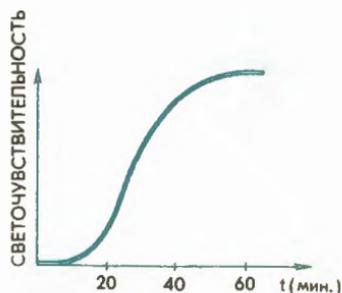
Оптическая система глаза создает на сетчатке действительное, обратное и уменьшенное изображение. Проектирование изображения на область желтого пятна сетчатой оболочки глаза является основным условием отчетливого видения. Для выполнения этого условия при рассмотрении предметов, находящихся на различных расстояниях, глаз должен изменять фокусное расстояние хрусталика, что достигается изменением кривизны его поверхностей под действием так называемой ресничной мышцы. Такой процесс называется аккомодацией глаза.

При отсутствии мышечного усилия глаз аккомодирован на бесконечность (практически свыше 8—10 м). Предел напряжения аккомодации ограничивает до наименьшее расстояние предмета от глаза, при котором на сетчатке еще получается резкое изображение. Оно у разных людей весьма различно и увеличивается с возрастом, вследствие постепенной потери хрусталиком эластичности. Это расстояние называется расстоянием наилучшего зрения; в среднем оно принимается равным 25 см.

Вторым условием отчетливого видения является достаточная освещенность предмета. Поскольку в основе физиологического восприятия света лежат фотохимические реакции, протекающие в окончаниях светочувствительных клеток сетчатки (палочки и колбочки), необходимо, чтобы энергия светового потока превосходила некоторое пороговое значение. Поскольку практически человек всегда имеет дело с самыми различными освещенностями, в процессе эволюции выработалась и соответствующая регулирующая функция глаза — адаптация, которая осуществляется прежде всего изменением диаметра зрачка в пределах от 2 до 8 мм. Кроме того, светочувствительность глаза регулируется перемещением пигмента в клетках сетчатки, экранирующих светочувствительные элементы зрительного нерва, а также химическим путем. Совокупность перечисленных факторов изменяет светочувствительность глаза до 200 000 раз. На рис. 70 показано изменение светочувствительности глаза в зависимости от времени при переходе от высоких освещенностей к низким; из рисунка видно, что процессы адаптации существенно зависят от времени (почти полная адаптация наступает в пределах 1 часа).

Как и в обычных оптических системах, размер изображения на сетчатке глаза пропорционален углу зрения. Если две точки предмета рассматриваются глазом под углом зрения, меньшим $50''$, то на сетчатке

Рис. 70. Зависимость светочувствительности глаза от времени адаптации.



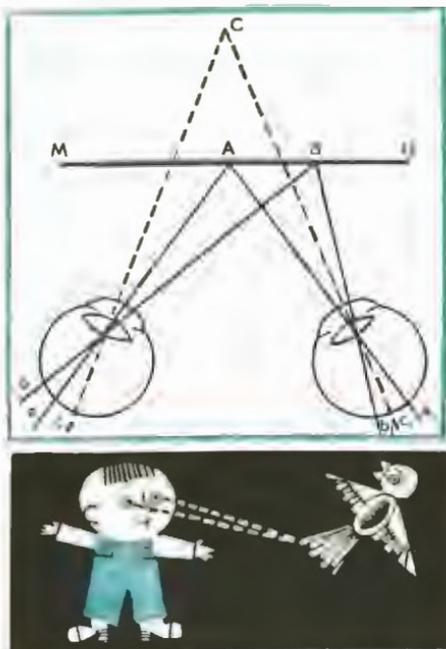


Рис. 71. К объяснению бинокулярного зрения.

расстояние между изображениями этих точек будет соизмеримо с размером светочувствительной клетки (2,5—3 мкм): изображения точек предмета не могут быть восприняты раздельно и сольются в одну точку, контуры предмета будут нечеткими. Наименьшее расстояние между двумя точками, воспринимаемыми глазом раздельно, составляет приблизительно 0,25 мм на расстоянии наилучшего зрения и называется разрешающим расстоянием глаза, а соответствующий ему угол зрения $50''$ — предельным углом зрения.

Третье условие отчетливого видения: угол зрения должен быть больше предельного угла зрения. В увеличении угла зрения и заключается назначение оптических приборов.

Важной особенностью зрительного анализатора является способность воспринимать рассматриваемый предмет двумя глазами — бинокулярное зрение, которое обеспечивает стереоскопичность видения и дает возможность определить (оценить) расстояние до рассматриваемого предмета. На рис. 71 подана схема, поясняющая бинокулярное зрение.

Пусть рассматриваются точки предмета, лежащие в одной плоскости MN . Изображения точек A, B, \dots на сетчатке — a_1, b_1, \dots (правый глаз) и a, b, \dots (левый глаз) соединим с точками A и B предмета прямыми линиями. Полученные углы — бинокулярный параллакс — будут одинаковы для всех точек предмета, находящихся на определенном расстоянии от глаз, бинокулярный параллакс уменьшается при удалении предмета C и возрастает при приближении; именно так и возникает информация о «глубине» и расстоянии до рассматриваемого предмета. Минимальная разница расстояний, обнаруживаемая за счет бинокулярного зрения, соответствует бинокулярному параллаксу порядка $10''$. Поэтому бинокулярное зрение имеет значение при оценке расстояний, не превышающих 1 км; при больших расстояниях бинокулярный параллакс столь мал, что физио-

логически не воспринимается глазом как источник информации. Дефекты зрения, присущие глазу, также легко интерпретируются методами геометрической оптики. Изображение может не попадать на сетчатку как вследствие деформации глазного яблока, так и из-за сокращения пределов аккомодации, которые легко устраняются применением очков. Возможны и другие дефекты зрения, обусловленные общеизвестными недостатками линз, однако все они не сказываются существенно на зрении. В самом деле, поскольку зрачок пропускает в глаз узкий центральный пучок лучей, то практически исключается сферическая аберрация. Несущественна и хроматическая аберрация, ибо глаз обладает избирательной спектральной чувствительностью.

Физическая оптика глаза

Основным вопросом физической оптики глаза является оценка глазом энергии и спектрального состава света. Эта оценка производится прежде всего сетчатой оболочкой глаза, в которой расположены основные элементы зрительного восприятия — палочки и колбочки — в количестве соответственно около 100 и 7 миллионов. При помощи колбочек осуществляется так называемое дневное зрение — при больших освещенностях. При дневном зрении мы различаем цвета, хотя максимальная чувствительность колбочек относится к определенному цвету — желто-зеленому с длиной волны 550 нм. Палочки максимально чувствительны к зеленым лучам ($\lambda = 510$ нм) и ответственны за так называемое сумеречное зрение — при малых освещенностях. Цвета при этом не различаются (ночью все кошки серые).

Палочки и колбочки содержат светочувствительные пигменты, соответственно именуемые родопсином (зрительный пурпур) и иодопсином. При поглощении кванта света в пигментах возникают и развиваются фотохимические реакции, которые и обуславливают дальнейшую передачу зрительной информации в мозг.

Палочки и колбочки на сетчатке распределяются неравномерно: в центре сетчатки преобладают колбочки (максимум соответствует желтому пятну — месту наиболее отчетливого видения), а на периферии преобладают палочки. Место сетчатки, в котором отсутствуют палочки и колбочки, соответствует слепому пятну (в этом месте находится диск зрительного нерва).

Способность глаза к восприятию света называется светочувствительностью (белый свет) и спектральной чувствительностью, если речь идет о восприятии цветов или о лучах различной длины волны. Нижний предел светочувствительности глаза при су-

меречном зрении соответствует приблизительно $10^{-13} \frac{\text{дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}$, что свидетельствует о необыкновенно высокой чувствительности глаза.

Глаз практически не способен оценивать абсолютное значение энергии света, но весьма чувствителен к различию интенсивностей, называемому световым контрастом.

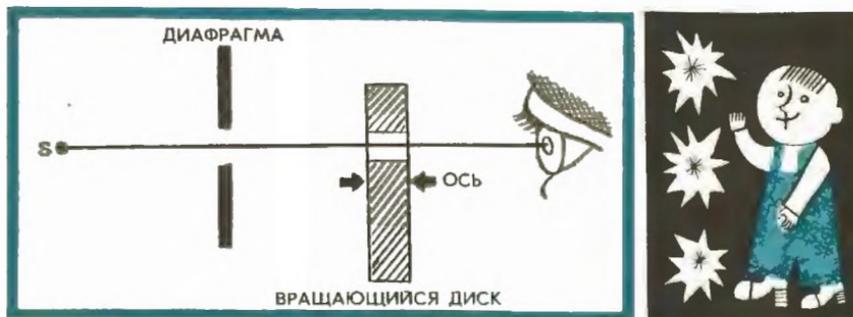
Высокую чувствительность человеческого глаза проверил на очень интересном опыте известный советский физик С. И. Вавилов. Глаз, полностью адаптированный на темноту (для этого нужно побыть в темноте около 60 мин), максимально светочувствителен. Порог зрительного ощущения в этом случае очень мал — ему соответствует мощность около $4 \cdot 10^{-17}$ вт, что составляет примерно 100 фотонов в секунду. Однако в глаз попадает то несколько больше среднего значения (например, 105), то несколько меньше (например, 95). Такие отклонения от среднего значения называются ф л у к т у а ц и я м и.

С. И. Вавилов располагал источник света, дающий свет на пороге видимости, диск, имеющий отверстие и вращающийся со скоростью 1 об/сек, и глаз так, как изображено на рис. 72. В течение 0,1 сек свет проходил через отверстие диска и попадал в глаз, а затем 0,9 сек свет не попадал в глаз, так как задерживался диском; зрительное впечатление, полученное в течение 0,1 сек, за 0,9 сек полностью исчезало.

Наблюдатель нажимал кнопку всякий раз, когда видел вспышку света, при этом на движущейся ленте наносилась отметка. На этой же ленте отмечался каждый поворот диска. Оказалось, что наблюдатель отмечает не все вспышки, что объясняется флуктуациями. Отмеченные им вспышки соответствовали отклонениям от среднего в сторону увеличения числа фотонов. Те же вспышки, в которых число фотонов оказывалось меньше среднего, глаз не наблюдал.

Этот опыт, проделанный над многими людьми, показал, что человеческий глаз обладает очень высокой светочувствитель-

Рис. 72. Схе́ма опыта Вавилова.



ностью и способен различать (при максимальной чувствительности) два световых потока, отличающихся друг от друга десятком фотонов. Относительная спектральная чувствительность глаза (рис. 73) имеет четкий максимум при 550 нм (колбочки — дневное зрение при высоких интенсивностях света), который при малых интенсивностях (пунктирная линия) лежит в области 510 нм (палочки — сумеречное зрение) и убывает к нулю при приближении к ультрафиолетовой и инфракрасной частям спектра.

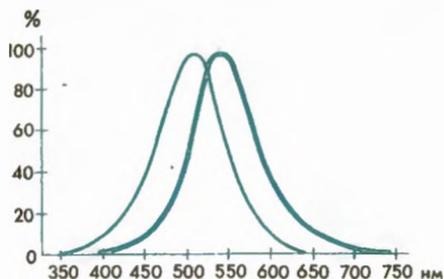


Рис. 73. График спектральной чувствительности глаза.

и убывает к нулю при приближении к ультрафиолетовой и инфракрасной частям спектра.

При очень больших яркостях светочувствительность снижается, появляется слепимость (ослепление). Способность ярких тел вызывать слепимость называется блескостью. Наименьшая яркость, различимая глазом, составляет 10 нит, а наибольшая, при которой возникают болевые ощущения, — 7000 нит. Таким образом, глаз может приспосабливаться к очень широкому диапазону яркостей, отличающихся примерно в 10^3 раз. Для этого существует несколько способов реакции глаза на изменение яркости: изменение диаметра зрачка и чувствительности сетчатки, использование защитного черного пигмента, ослабляющего свет, падающий на колбочки и палочки.

Известно, что глаз «видит» узкий участок спектра электромагнитных волн, лежащий между инфракрасным и ультрафиолетовым излучениями. Чем и как обусловлен этот выбор? Ультрафиолетовое излучение интенсивно поглощается озоном атмосферы. Хотя сетчатка глаза и чувствительна к ультрафиолетовой радиации, это излучение в глаз не попадает, целиком поглощаясь хрусталиком, играющим роль фильтра.

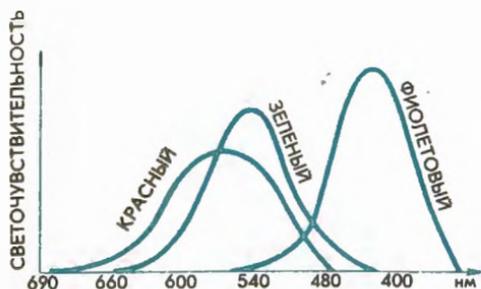
Если бы глаз мог воспринимать инфракрасное тепловое излучение, то мы были бы слепыми! Действительно, внутреннее тепловое излучение глаза соответствовало бы мощному источнику света, глаз перестал бы быть «темным ящиком» и «видел бы» только самого себя. Как избавляется глаз от этой мрачной перспективы ослепления в инфракрасных лучах? Для того чтобы началась фотохимическая реакция в пигментах светочувствительных клеток сетчатки, необходимо некоторое пороговое значение энергии поглощенного светового кванта. Энергия кванта, как известно, обратно пропорциональна длине волны света ($\epsilon = \frac{hc}{\lambda}$), поэтому энергия квантов длинноволнового инфракрасного излучения, попросту говоря, недостаточна для возбуждения фотохимических реакций в зрительном нерве.

Для того чтобы понять физические основы цветного зрения, следует указать, что для характеристики окраски недостаточно знать тон и цвет тела. Требуется ввести еще одну характеристику окраски — насыщенность цвета (чистота цвета) — так называют величину, зависящую от степени «разбавления» спектрального цвета белым. Например, насыщенность 0,7 означает, что цвет состоит на 70% из данного и на 30% из белого. Белый цвет можно синтезировать сложением не только всех семи цветов спектра, но и сложением двойных или тройных комбинаций цветов, называемых дополнительными (красный и голубовато-зеленый, зеленовато-желтый и синий и др.). Наконец, формирование цвета может быть осуществлено не только смешением цветов, но и путем поглощения определенных частей спектра светофильтрами. Таким образом, формирование и восприятие цвета — сложный процесс.

Каким образом глаз воспринимает цвет предмета? После открытия дисперсии света основной величиной, определяющей цвет, стала длина волны света. Отсюда определение цвета в классической оптике: цвет есть ощущение, которое возникает в сетчатой оболочке глаза при возбуждении световой волной определенной длины. Зная длину волны, можно наперед с высокой степенью точности сказать, какой цвет увидит глаз. При всей субъективности этой формулировки она тем не менее легла в основу классической трехкомпонентной теории цветного зрения Ломоносова — Юнга — Гельмгольца. Согласно этой теории, предполагается, что в зрительном анализаторе имеются три вида светочувствительных окончаний, каждое из которых реагирует на один из трех основных цветов.

Электронная микроскопия показала, что колбочки построены из пластинок, каждая из которых, возможно, реагирует на определенную длину волны. На рис. 74 показана зависимость светочувствительности от длины волны для каждого из трех видов нервных окончаний; из рисунка видно, что каждый рецептор имеет свою полосу длин волн, в которой происходит возбуждение. При освещении сетчатки возбуждаются все три вида элементов;

Рис. 74. К объяснению трехкомпонентной теории цветного зрения.



Электронная микроскопия показала, что колбочки построены из пластинок, каждая из которых, возможно, реагирует на определенную длину волны. На рис. 74 показана зависимость светочувствительности от длины волны для каждого из трех видов нервных окончаний; из рисунка видно, что каждый рецептор имеет свою полосу длин волн, в которой происходит возбуждение. При освещении сетчатки возбуждаются все три вида элементов;



Рис. 75. Строение локатора змеи:

1 — поперечная мембрана; 2 — нервные окончания; 3 — наружная камера.

если они возбуждаются в одинаковой степени, то глаз ощущает белый цвет, так как происходит сложение всех трех цветов; если же элементы возбуждаются в различной степени, возникает ощущение монохроматического цвета.

Может быть так, что в сетчатке глаза ослабляется или совсем выпадает восприятие одного из основных цветов, тогда у этого человека нарушается цветоощущение. Такой недостаток зрения назван цветослепотой (дальтонизмом) по имени английского ученого Д. Дальтона, который сам страдал таким расстройством цветового зрения и впервые описал его. Дальтоники не допускают к вождению транспорта. Очень важно хорошее цветоощущение для моряков, летчиков, хирургов, химиков, художников. Созданы специальные приборы — а н о м а л о с к о п ы — для исследования нарушения цветового зрения.

У животных цветовая чувствительность иная. Насекомые видят ультрафиолетовые лучи, а гремучая змея — инфракрасные. Чувствительность инфракрасного локатора гремучей змеи (рис. 75) гораздо больше, чем чувствительность подобной аппаратуры, созданной человеком. С его помощью змея даже в полной темноте легко обнаруживает добычу. Она способна фиксировать изменение температуры на $0,0001^{\circ}$!

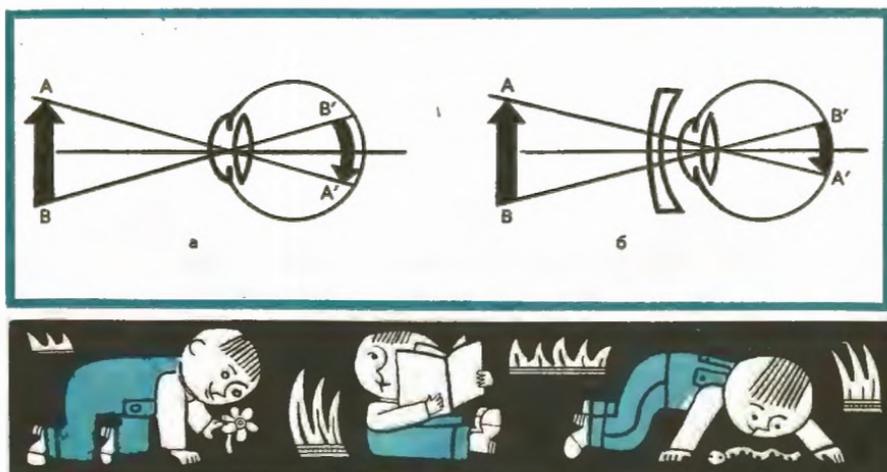
Восприятие цвета человеком глубоко эмоционально. Один из первых исследователей цвета, известный немецкий поэт В. Гёте, писал о способности цвета создавать настроение: желтый — веселит и бодрит; зеленый — умиротворяет; синий — вызывает грусть. Цвет делает вещи «тяжелыми», «легкими», «холодными», «горячими». Цвет имеет огромную силу воздействия на человека. Наиболее благоприятное влияние на производительность труда оказывают зеленые и желтые цвета. Они обостряют зрение, ускоряют зрительные реакции, понижают внутриглазное давление, обостряют слух. Красный цвет возбуждает; это цвет

революции, подъема, победы. «Желтое» окружение, однако, не всегда полезно. Английские психологи заметили, что желтая кабина самолета вызывает приступ «морской болезни» даже у самых опытных пилотов. Длительное действие красного цвета создает цветовую усталость. Зеленый цвет помогает быстро снять болевые ощущения, вызываемые красным цветом. Таким образом, цвет видит не глаз, а человек, и это значительно усложняет теорию цветового зрения, и прав был, вероятно, один из физиологов, писавший, что «...глаз — это часть мозга, вынесенная на периферию для осуществления связи с внешней средой». Цвет используют для лечения. Во Франции, вблизи Парижа, есть неврологическая клиника, где лечат цветом.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА В МЕДИЦИНСКИХ ПРИБОРАХ

Физика — одна из древнейших наук. Уже на заре человечества люди научились изготавливать первые оптические приборы — плоские зеркала. Гораздо позже появились зеркала сферические, позволяющие собирать световые лучи в один пучок или равномерно рассеивать их. Вначале зеркала делали из металла. Изобретение стекла открыло перед оптикой огромные возможности. Увеличительные стекла буквально захватили воображение образованных людей того времени. Через них рассматривались мелкие предметы, а наиболее изобретательные, прикрепив

Рис. 76. Схема близорукости [а] и ее устранения с помощью линзы [б].



их для удобства к шлему или иному головному убору, использовали как своеобразные очки.

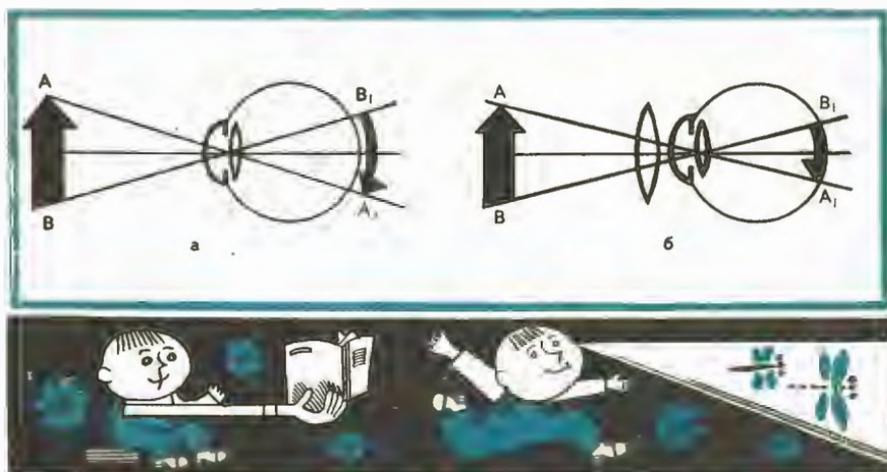
Потребовалось еще немало усилий, чтобы линзы превратились в современные бинокли, микроскопы и другие оптические аппараты. В этом разделе мы рассмотрим только некоторые оптические приборы. Медики, помимо рассмотренных, очень широко используют рефрактометры, сахариметры, фотоколориметры, диоптриметры, люксометры и очень много других оптических приборов.

Очки — простейший медицинский прибор

В процессе развития глаза могут возникнуть отклонения от нормы, вследствие чего нарушается условие хорошего зрения: изображение получается не на сетчатке. Из рис. 76 легко понять причину близорукости (а) и метод ее устранения (б), а из рис. 77 — причину (а) и устранение дальновзоркости (б).

Несколько сложнее устранить астигматизм органов зрения, возникающий за счет деформации хрусталика. В норме поверхности хрусталика очень близки к поверхности сферы. Однако иногда кривизна одной из поверхностей или одновременно обеих оказывается в различных плоскостях разной. Тогда при рассматривании предмета возникает астигматизм: все горизонтальные линии одного направления проектируются на экран и

Рис. 77. Схема дальновзоркости (а) и ее устранения с помощью линзы (б).

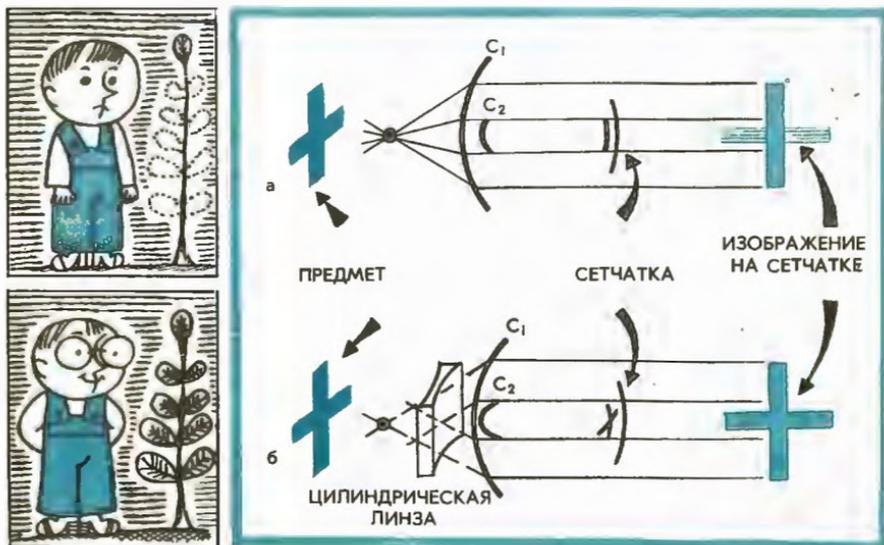


кажутся четкими, а линии в плоскости, перпендикулярной к этому направлению, кажутся размытыми (рис. 78).

Астигматизм исправляется с помощью так называемых цилиндрических линз. Преломляющая поверхность таких линз обладает резко выраженным астигматизмом: в зависимости от расположения по отношению к источнику света они дают изображение круглого отверстия S в виде горизонтальной или вертикальной линии (рис. 79). Поэтому цилиндрическая линза усиливает или ослабляет преломляющую способность хрусталика только в одной плоскости и «помогает» ему проецировать на сетчатку только линии, которые не получались резкими на сетчатке глаза (рис. 78, б).

В последние годы появляется все большее количество новых видов и типов медицинских очков — мениски, вставляемые непосредственно в глаз (контактные линзы), цилиндрические стекла, наконец, сферопризматические очки Утехиных. Эти очки представляют собой комбинации сферических стекол, изменяющих фокусное расстояние глаза, и призм, имитирующих работу той группы глазных мышц, которая «сводит» глаза на рассматриваемый предмет. Вследствие этого резко уменьшается нагрузка на все глазные мышцы и глаз меньше устает.

Рис. 78. Схема астигматизма (а) и его устранения с помощью линзы (б).



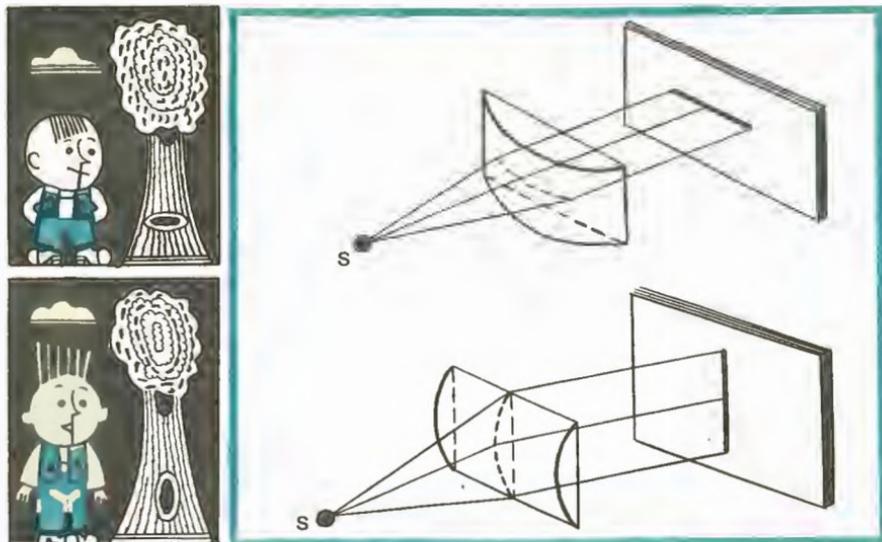


Рис. 79. Изображение в цилиндрической линзе.

От простого микроскопа к специальным видам микроскопии

Возможности человеческого глаза при рассматривании мелких предметов довольно ограничены. Для характеристики этих возможностей вводится понятие о разрешающей способности и разрешающем расстоянии. Разрешающее расстояние z_{min} — это расстояние между двумя ближайшими точками, которые глаз видит еще раздельно. Мы уже указывали, что для нормального глаза, если расстояние от предмета до глаза равно расстоянию наилучшего зрения (25 см), $z_{\text{min}} = 0,25$ мм. Точки, лежащие друг к другу ближе, чем это расстояние, глаз не различает, т. е. не видит раздельно.

Таким образом, если человеку необходимо рассмотреть детали предмета меньше разрешающей способности его глаза, он должен воспользоваться оптическими приборами — лупой, микроскопом. Эти оптические приборы увеличивают угол зрения на рассматриваемый предмет, уменьшают разрешающее расстояние и поэтому позволяют разрешить (увидеть) большее количество деталей (точек) предмета, т. е. увеличивают разрешающую способность.

Чем меньше разрешающее расстояние, тем больше разрешающая способность.

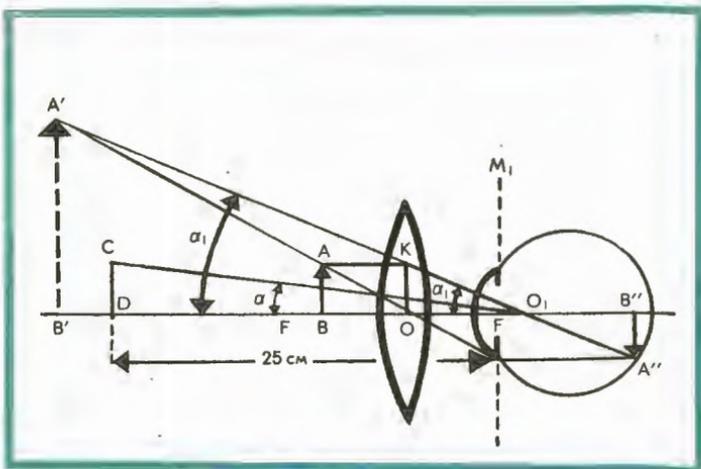


Рис. 80. Ход лучей через лупу и глаза.

На рис. 80 показан ход лучей, образующих изображение $A''B''$ на сетчатке глаза с помощью лупы. Рассматриваемый предмет AB расположен вблизи фокуса F линзы, его изображение $A'B'$ находится на расстоянии, близком к расстоянию лучей видимости (25 см).

Угол зрения, под которым глаз видит предмет без лупы, обозначим α ; в этом случае предмет располагается на расстоянии 25 см от глаза. Угол зрения через лупу — α_1 . Угловое увеличение лупы $k = \frac{\alpha_1}{\alpha}$. Из $\triangle OO_1K$ видно, что $\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{OK}{F}$, но $OK =$

$= AB = l$ — линейные размеры тела, поэтому $\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{l}{F}$. Из $\triangle O_1CD$

видно, что $\operatorname{tg} \alpha = \frac{CD}{O_1D} = \frac{AB}{25} = \frac{l}{25}$.

Угловое увеличение лупы

$$k = \frac{\alpha_1}{\alpha} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\frac{l}{F}}{\frac{l}{25}} = \frac{25}{F}$$

Увеличения, даваемые лупой, не удовлетворяют исследователей, в том числе биологов и врачей. Для получения больших увеличений применяют микроскоп. Ход лучей в микроскопе показан на рис. 81.

Рассматриваемый предмет AB располагается между фокусом $F_{об}$ и двойным фокусом объектива. В объективе получается действительное, обратное и увеличенное изображение A_1B_1 , кото-

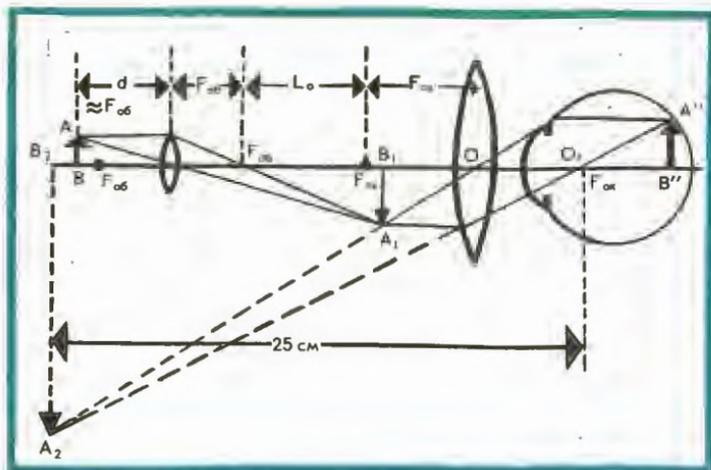


Рис. 81. Ход лучей в микроскопе.

рое рассматривается в окуляре, являющийся лупой. A_1B_1 располагается вблизи фокуса $F_{ок}$ окуляра, поэтому изображение A_2B_2 является мнимым, прямым (по отношению к A_1B_1) и увеличенным. Изображение расположено на расстоянии наилучшего зрения — при использовании биологического микроскопа изображение получается в плоскости стола, на котором установлен микроскоп. Действительное изображение $A''B''$ получается на сетчатке глаза.

Легко убедиться в том, что увеличение микроскопа равно произведению увеличения объектива $k_{об}$ на увеличение окуляра $k_{ок}$, т. е. $k_{м} = k_{об} \cdot k_{ок}$. В самом деле, $k_{об} = \frac{A_1B_1}{AB}$, $k_{ок} = \frac{A_2B_2}{A_1B_1}$,

их произведение $k_{об}k_{ок} = \frac{A_1B_1}{AB} \cdot \frac{A_2B_2}{A_1B_1} = \frac{A_2B_2}{AB}$, а это отношение и является увеличением микроскопа — отношение линейных размеров изображения A_2B_2 к линейным размерам предмета AB .

Увеличение линзы $k = \frac{f}{d}$, где f — расстояние до изображения, а d — расстояние до предмета от оптического центра линзы.

Увеличение объектива тогда будет равно $k_{об} = \frac{F_{об} + L_0}{F_{об}}$, так как предмет располагается вблизи от фокуса объектива, а изображение находится на расстоянии, равном сумме фокусного расстояния объектива $F_{об}$ и оптической длины тубуса L_0 . Однако $F_{об} \ll L_0$, поэтому можно считать, что $k_{об} = \frac{L_0}{F_{об}}$. Увели-

чение окуляра как лупы равно: $k_{ок} = \frac{25}{F_{ок}}$.



Рис. 82. Ход лучей в сухой и иммерсионной системах микроскопа.

Теперь можно получить формулу увеличения микроскопа:

$$k_{\text{м}} = k_{\text{об}} k_{\text{ок}} = \frac{L_{\text{м}}}{F_{\text{об}}} \cdot \frac{25}{F_{\text{ок}}}.$$

Увеличение объектива и окуляра указывается на их оправе. В биологических микроскопах увеличения объектива $8\times$, $40\times$ и $90\times$; увеличение окуляра $5\times$, $10\times$ и $15\times$. Очевидно, что максимальное увеличение такого микроскопа будет:

$$k_{\text{макс}} = 90 \times 15 = 1350 \times.$$

Микроскоп, как и глаз или любая оптическая система, обладает разрешающей способностью, предел которой обуславливается дифракционными явлениями, приводящими к потере резких очертаний контуров рассматриваемых объектов, к потере соответствия между формой предмета и его изображением, к потере изображения.

Разрешающее расстояние оптической системы (в том числе микроскопа) может быть определено по формуле: $z_{\text{min}} = \frac{\lambda}{2n \sin u}$,

где λ — длина волны, используемая в данном микроскопе; n — показатель преломления среды, находящийся между фронтальной линзой объектива и покровным стеклом, u — половина отверстного (апертурного) угла (рис. 82). На рис. 82 показан ход лучей через покровное стекло к фронтальной линзе микроскопа в том случае, когда между ними находится воздух или прозрачная жидкость — иммерсионная система.

Чтобы на данном объекте различить большее количество деталей, т. е. чтобы разрешающая способность была больше, разрешающее расстояние z_{min} должно быть как можно меньше. Для этого нужно уменьшить числитель (λ) или увеличить знаменатель ($2n \sin u$). В оптическом микроскопе используется видимый свет, поэтому уменьшить λ нельзя. Для увеличения знаменателя необходимо увеличить n и u . Как видно из рис. 82, это

го можно достигнуть в иммерсионной системе: если показатель преломления иммерсионной среды такой же, как у стекла, то с увеличением n до 1,5 увеличивается и u (в пределе до 90°). Можно рассчитывать z_{\min} для сухой и иммерсионной системы, если взять длину волны, к которой наиболее чувствителен глаз: $\lambda = 550 \text{ нм} = 0,00055 \text{ мм}$.

$$z_{\min}^{\text{сух}} = \frac{\lambda}{2n \sin u} = \frac{0,00055}{2 \cdot 1 \cdot 1} \approx 0,0003 \text{ мм};$$

$$z_{\min}^{\text{имм}} = \frac{\lambda}{2n \sin u} = \frac{0,00055}{2 \cdot 1,5 \cdot 1} \approx 0,0002 \text{ мм}.$$

Зная z_{\min} , можно рассчитать полезное увеличение микроскопа, т. е. такое увеличение, при котором в изображении появляются новые, до этого не просматривавшиеся детали. Увеличение размеров изображения, которое не дает возможность обнаружить (разрешить) новые детали, не является полезным.

Минимальные размеры изображения, которые может разрешить глаз человека, 0,25 мм, минимальные разрешимые расстояния в оптическом микроскопе, как мы только что видели 0,0002 мм, поэтому, учитывая, что увеличение — это отношение линейных размеров изображения к линейным размерам предмета, $k_{\text{м}}^{\text{полезное}} = \frac{0,25 \text{ мм}}{0,0002 \text{ мм}} = 1250$ раз, т. е. полезное увеличение оп-

тического микроскопа $1250\times$. Если изготовить микроскоп с большим увеличением, что технически легко осуществимо, то такой микроскоп не разрешит больше деталей, чем микроскоп с увеличением $1250\times$. Этим объясняется тот факт, что оптические микроскопы изготовляют с увеличением $1350\times$. (Нужно иметь в виду, что это число мы получили приближенным, так как взяли усредненную длину волны).

Специальные приемы микроскопии

1. Микропроекция и микрофотография. Чтобы спроектировать изображение, получаемое с помощью микроскопа, на экран или сфотографировать его, необходимо сделать это изображение действительным — мнимое изображение на экран спроектировать и, следовательно, сфотографировать нельзя. Для этого следует окуляр переместить так, чтобы изображение A_1B_1 находилось не между фокусом и окуляром, как это имеет место в микроскопе (рис. 81), а между фокусом и двойным фокусом окуляра; тогда окуляр даст действительное и увеличенное изображение, которое можно спроектировать и сфотографировать (рис. 83). К биологическим микроскопам придается специальная металлическая насадка в виде трубочки,

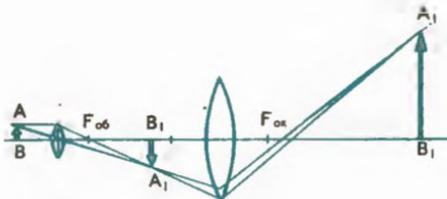


Рис. 83. Ход лучей в микроскопе.

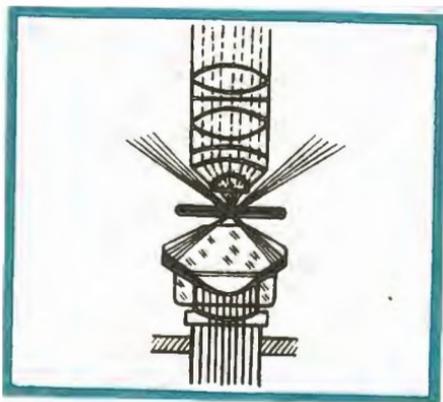
Он направляет световые лучи на объект под большими углами, поэтому предмет освещается, но световые лучи не попадают в объектив (рис. 84). Это делает объект видимым на общем, более темном поле зрения микроскопа. В этом случае можно заметить, что объект есть светящаяся точка, но рассмотреть его детали невозможно. Однако объект будет заметен, если он даже меньше z_{min} .

3. Ультрафиолетовая микроскопия. Использование ультрафиолетовых лучей, т. е. лучей с длиной волны, меньшей, чем для видимого света, приводит к уменьшению z_{min} , и, следовательно, к увеличению разрешающей способности, что, в свою очередь, дает возможность получить большее полезное увеличение (до 3000 раз). В ультрафиолетовых микроскопах вся оптика изготавливается из кварца или увиолевого стекла, пропускающего ультрафиолет. Освещение объекта производится с помощью ртутно-кварцевой лампы, дающей излучение, богатое ультрафиолетовыми лучами.

4. Флуоресцентная микроскопия. Некоторые вещества, входящие в состав живых тканей, светятся под действием ультрафиолетовых лучей. Свечение некоторых объектов можно вызвать с помощью специальных красителей. В таких микроскопах оптика остается обычной, надо только взять осветитель, дающий ультрафиолетовые лучи, и все стеклянные детали до покровного стекла заменить увиолевым стеклом.

Биологи используют и другие виды микроскопии—фазово-контрастную, интерференционную, поляризационную, электронную и др. Пожалуй, никто так широко не пользуется микроскопией, как медики и биологи.

Рис. 84. Ход лучей через конденсор темного поля.



Человеческий глаз при всем изумительно тонком и сложном устройстве далек от совершенства. Несмотря на то, что его сетчатка воспринимает зрительную информацию с помощью более чем 100 миллионов элементов — палочек и колбочек, несмотря на то, что в коре головного мозга при обработке этой информации участвуют миллиарды нейронов, мы вправе сказать, что природа все же в этой части не очень щедра к человеку.

Человеческий глаз не видит очень малых предметов (на помощь пришел микроскоп), не различает предметов, удаленных на большие расстояния (здесь помощником оказались зрительные трубы и телескопы). Не может взгляд проникнуть и сквозь непрозрачные предметы и среды.

Дать глазам возможность увидеть то, что недоступно им по природным свойствам, расширить окно, через которое человек воспринимает окружающий мир, — задача, от решения которой зависит развитие очень многих наук, в том числе биологии и медицины.

Рассмотреть состояние внутренних органов (пищевод, желудок и др.) — давнейшая мечта врачей. Первый человек, у которого медики попытались увидеть внутреннюю поверхность желудка, был шпагоглотатель. Более ста лет назад немецкий врач Куссмауль ввел ему в гортань металлическую трубку длиной 47 см и толщиной 13 мм. Но опыт не удался: аппарат был далек от совершенства и освещения от наружного источника явно не хватало.

Первый гастроскоп* сконструировал известный хирург Микулич в 1882 году. Ему удалось увидеть внутреннюю полость желудка. Позже были изготовлены приборы с внутренним освещением. Из рис. 85 видно действие гастроскопа. Аналогично устроены цистоскоп (для исследования мочевого пузыря), ректоскоп (для исследования кишечника) и другие приборы. Во всех этих приборах световые лучи передаются по гибким каналам — световодам. По такому каналу-световоду свет может идти по извилистому пути (рис. 86, а). Световой луч идет по очень тонкому стеклянному волокну, показатель преломления которого больше показателя преломления окружающей среды.

Световой луч испытывает полное внутреннее отражение, попадая на границу между стеклом и окружающей средой под углом больше предельного (рис. 86, б). Световод состоит из очень

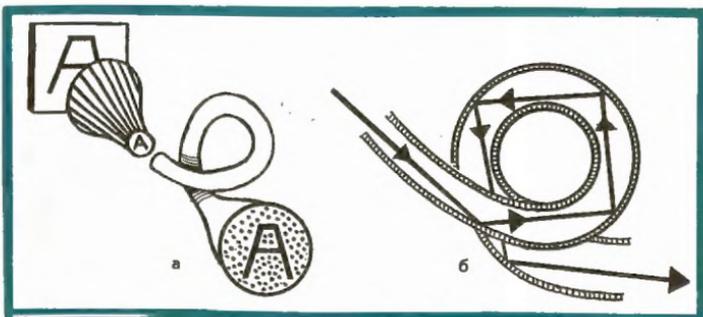
* Прибор, с помощью которого рассматривается желудок.



Рис. 85. Схема гастроскопии.

вид и схема его устройства показаны на рис. 87. Здесь 1, 2 — двенадцатиперстная кишка, 3 — желудок, 4 — манипуляционный конец фиброскопа, на котором имеется: 5А — отверстие для выхода воздуха или жидкости, 5Б — объектив, 5В — место выхода пучка света, 5Г — выходное отверстие для щипцов, 5Д — подъемник для щипцов, 6 — гибкая часть фиброскопа, 7 — принудительно изгибаемая часть, 8 — окуляр, 9 — фотоаппарат, 10 — источник света (осветитель), 11 — галогеновая лампа.

Рис. 86. Световод и ход лучей в нем.



большого количества таких волокон. Он может иметь изгибы, лимитируемые только предельным углом (или соотношением показателей преломления волокна и окружающей среды). Волоконная оптика — так называется раздел физики, занимающийся решением этих проблем (движение света по изгибающемуся световоду).

Недавно в клинику пришел еще один прибор, работающий на волоконной оптике, — фиброскоп. Он позволяет диагностировать заболевания желчных путей и поджелудочной железы. Внешний

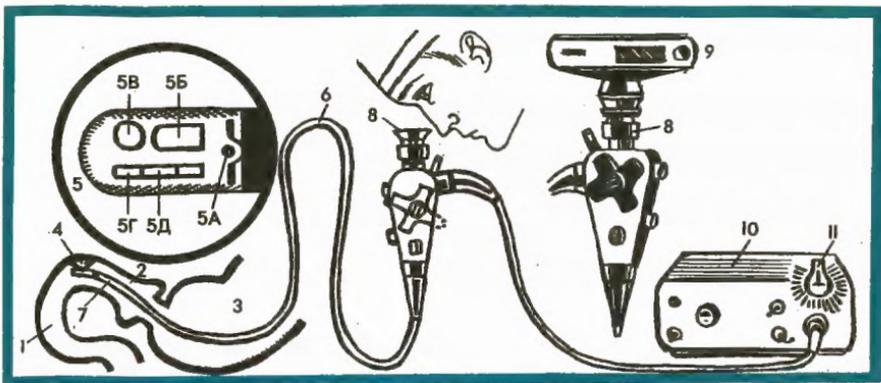
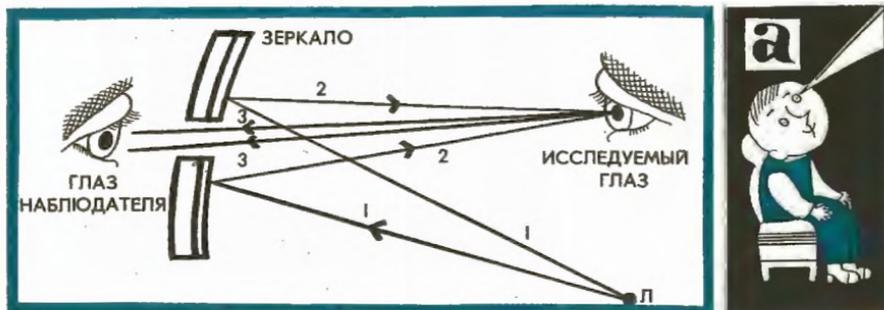


Рис. 87. Схема фиброскопа на волоконной оптике.

Сферические зеркала в арсенале медиков

По-видимому, одним из первых приборов такого рода был предложенный Гельмгольцем офтальмоскоп (рис. 88), применяемый для исследования глазного дна. Свет от источника *Л* направляется сферическим зеркалом на глаз больного, и через отверстие в центре зеркала диаметром около 2 мм врач наблюдает освещенное глазное дно. Поместив между глазом больного и зеркалом линзу, можно получить увеличенное изображение

Рис. 88. Ход лучей в офтальмоскопе.



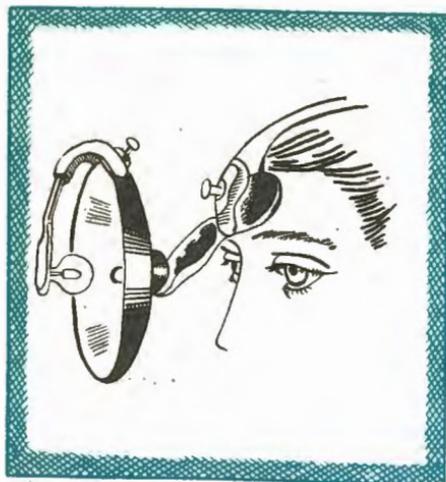


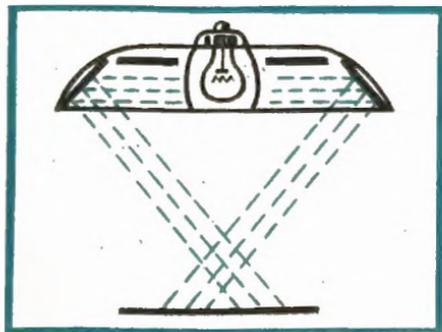
Рис. 89. Ларингоскоп.

глазного дна. Более удобен применяемый при исследовании полостей уха, горла, носа ларингоскоп (рис. 89). Здесь источник света может быть укреплен непосредственно в вогнутом зеркале, а сам прибор — на голове.

Важной физико-технической задачей медицины является освещение оперативного поля. Свет не должен искажать окраску тканей, утомлять хирурга, создавать тени; он должен обеспечить хорошую освещенность при минимальном тепловом эффекте и т. п.

Всем этим требованиям отвечает бестеневая лампа (рис. 90). Источник света мощностью 300—500 вт помещен в фокусе параболического отражателя, диаметром около 1 м. Отражение света на операционное поле происходит в основном от боковой кольцевой области рефлектора, что практически исключает образование тени на операционном поле. В последнее время в отражателях устанавливают несколько источников света. Тепловой эффект источника света исключается двумя путями: перекрытием прямого пучка специальным щитком и применением светофильтров, поглощающих тепловую (красно-желтую) часть спектра, что, кроме того, приближает спектральный состав света к естественному.

Рис. 90. Бестеневая лампа.



Новейшие конструкции бестеневых ламп предусматривают их установку на подвижных, перемещающихся на роликах шарнирах, что допускает осуществление боковой подсветки, приближение и удаление лампы и т. д. Использование в качестве источника люминесцентной лампы дневного света, наличие аварийного аккумуляторного питания и т. д. делают такие лампы чрезвычайно удобными для хирургической практики.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ И ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ В МЕДИЦИНЕ

Лечение солнечным светом — г е л и о т е р а п и я — применялось еще в глубокой древности и вплоть до сегодняшнего дня является важным и действенным физиотерапевтическим средством.

Тепловое действие инфракрасных лучей

Инфракрасные лучи были открыты в 1900 году. Это электромагнитные волны с длиной волны от 780 нм до $4,2 \cdot 10^5$ нм. Инфракрасные лучи не вызывают зрительного ощущения у человека. Глаза некоторых животных — змей, тараканов — чувствительны к этой области спектра.

Исследования показали, что более 70% электромагнитного излучения Солнца приходится на долю инфракрасных лучей. Падая на мягкие поверхности ткани организма, инфракрасные лучи проникают в них на довольно значительную глубину (8—12 мм) и почти полностью поглощаются. Это оказывает существенное влияние на течение всех биологических процессов.

Естественно, что в прошлом, когда еще не было надежных технических средств для получения инфракрасных лучей, медики в основном использовали для лечебных целей солнечный свет. Использование длинноволновой части солнечного света дало возможность, например, уменьшить нагноительный период при заболеваниях оспой, а коротковолновая часть спектра оказалась полезной при лечении волчанки и т. д.

В качестве лечебной тепловой процедуры применяются лампочки накаливания. На рис. 91 изображена лампа Минина, представляющая собой металлический рефлектор с лампой накаливания небольшой мощности (до 50 вт). Она используется в домашних условиях. На рис. 92 показана используемая в клинических условиях лампа большой мощности

Рис. 91. Лампа Минина.





Рис. 92. Лампа соллюкс.

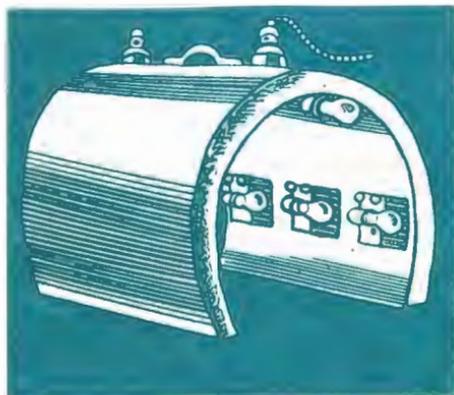
(до 1000 вт) с рефлектором — лампа соллюкс. На рис. 93 изображена световая ванна, интенсивно облучающая все туловище больного, — такой метод лечения применяется тогда, когда рекомендовано обильное потоотделение.

Для получения инфракрасных лучей используется лампа инфраруж (рис. 94), в рефлекторе которой установлен нагревательный элемент *H*. При температуре элемента порядка 400°С максимум энергии излучения размещен в инфракрасной части спектра.

Тепловизор

Человеческий глаз, как уже говорилось, слеп в инфракрасной области спектра. А между тем информация о температурной картине вокруг нас весьма необходима. Чтобы компенсировать «инфракрасную слепоту», люди вынуждены ориентироваться в мире теплового света буквально на ощупь. Мать, обеспокоенная болезненным видом ребенка, прикладывает к его лбу губы. Рабочие электро-

Рис. 93. Световая ванна.



машиностроительных заводов, собрав статор электрического генератора, нагревают его токами Фуко и принимают за ощупывание огромную деталь: ищут горячие участки — признак плохой изоляции между металлическими пластинами. Сделать человеческий глаз зрячим для тепловых лучей очень трудно. И все же после долгих поисков созданы

различные аппараты, среди них — тепловизоры.

Преодолеть трудности удалось следующим приемом. Искусственный инфракрасный глаз разглядывает не сразу всю тепловую картину, развертывающуюся перед ним, а словно читает ее буква за буквой, строка за строкой. Каждая «буква» — небольшой участок рассматриваемого объекта или природного ландшафта, практически — точка. «Черный» свет от этой точки, пройдя через оптическую систему, попадает на крохотную площадку, покрытую слоем фотосопротивления. Это и есть «сетчатка» искусственного глаза. Чтобы увеличить его

чувствительность и оградить от посторонних тепловых воздействий, ее непрерывно охлаждают жидким азотом.

Взглянет аппарат на точку — ее изображение спроецируется на «сетчатку». Если точка горячая, «черные» лучи, посланные ею, окажут более энергичное воздействие на чувствительный слой, в большей степени уменьшат сопротивление току, который проходит через него. Значит, в этот момент увеличится сила электрического сигнала. Меньше нагрета точка — через сопротивление пройдет ослабленный электрический ток.

Эти электросигналы усиливаются и подаются в электронно-лучевую трубку, примерно такую же, как и в телевизорах. Луч воспроизводит на экране трубки точку, видимую аппаратом, за ней другую, третью — всю строку, а затем строку за строкой всю открывающуюся перед инфракрасным глазом картину. Изображение на экране можно сфотографировать, а можно заставить электронный луч рисовать инфракрасные образы прямо на электрохимической бумаге.

Очень интересна область применения тепловидения — медицина. Дело в том, что тело человека, если взглянуть на него в инфракрасной области спектра, буквально светится, сияет, будто электрические огни ночью. Это и не удивительно: каждый квадратный сантиметр человеческой кожи непрерывно излучает около 40 вт лучистой энергии — столько же, сколько средней величины электрическая лампа. Но главное в том, что «сияние», а следовательно, и температура неодинаковы в разных участках тела и зависят от индивидуального анатомического строения,

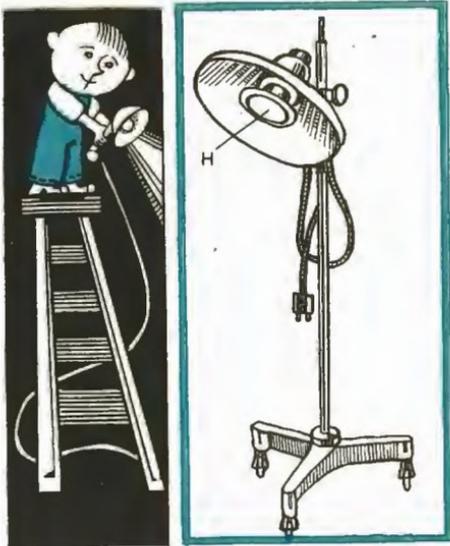


Рис. 94. Лампа инфракруж.

физиологических процессов, происходящих в данный момент. Если кожу человека протереть спиртом, вымазать черной краской (такая уж технология этих экспериментов) и сверху покрыть еще слоем так называемого жидкого кристалла — органического соединения на основе холестерина, то произойдет удивительное: человек превратится в живую радугу. В самых горячих местах жидкий кристалл будет светиться фиолетовым светом, там, где кожа прохладнее, — синим. И так до красного... Вот эти радужные переливы как раз и интересуют медиков: ведь еще Гиппократ говорил, что если одна часть тела теплее или холоднее обычного, то она больна. Следовательно, внося поправки на индивидуальные особенности теплового свечения тела человека, можно по инфракрасной картине кожи судить о состоянии здоровья пациента, о нарушениях в работе внутренних органов.

Но метод жидких кристаллов сложен и неудобен. Для подготовки же к тепловизионному обследованию пациенту достаточно раздеться. Сегодня с помощью ученых Государственного оптического института тепловизионные и термографические центры созданы в нескольких ленинградских медицинских учреждениях. Специалисты института помощи имени Джанелидзе используют черные лучи для исследования переломов, вывихов, ран, ушибов, нарушений периферического кровообращения и наблюдения за ходом заживления поврежденных тканей — все это отражается в виде тепловых узоров на коже.

Но особенно энергично развиваются исследования, связанные с использованием инфракрасных излучений для диагностики, клинической оценки и наблюдения за лечением злокачественных и доброкачественных опухолей. Некоторые виды опухолей теплее окружающих тканей на $1,5\text{--}2^\circ$, а иногда и на 4° . На экране тепловизора этот участок тела выглядит как яркое пятно. Тепловой глаз порой замечает такие мелкие опухоли (диаметром по несколько миллиметров), которые трудно выявить другим способом.

Эти приборы уже имеются в лабораториях. Установка внешне проста. Состоит она из передающей камеры, просмотрового устройства и блока питания. Обнаженный пациент минут десять «привыкает» к температуре лаборатории, затем становится в нескольких метрах от тепловизора. Инфракрасное излучение тела попадает на чувствительный элемент приемника лучистой энергии и преобразуется здесь в электрические сигналы. Пройдет усилитель, сигналы попадают в управляющий электрод электронно-лучевой трубки, как в обычном телевизоре. На экране кинескопа — четкая термографическая картина: у «теплых» участков тела светлый цвет, у менее «теплых» — серый, у нормальных — черный.

Ультрафиолетовые лучи — это электромагнитные волны длиной от 380 до 10 нм. Зрительного ощущения они, как и инфракрасные лучи, не вызывают, но обладают целым рядом очень интересных биологических свойств.

Ультрафиолетовая радиация играет решающую роль в основном биологическом процессе — фотосинтезе, процессе превращения световой энергии в химическую. Совсем недавно был в общих чертах раскрыт механизм этого процесса. Оказалось, что квант ультрафиолетового излучения, отдавая энергию электрону хлорофилла, заставляет его покинуть молекулу; образуется свободный радикал, и реакционная способность молекулы хлорофилла резко возрастает. Чтобы восстановить исходное состояние, молекула хлорофилла отнимает недостающий электрон у молекулы воды, в результате из последней освобождается кислород. В итоге хлорофилл восстанавливается, а энергия кванта преобразуется в энергию химической связи и путем дальнейших биохимических реакций переносится и накапливается в других химических соединениях.

Таков, коротко, механизм фотосинтеза. Оставался неясным еще один важный вопрос: каким образом в одном и том же зеленом листе «уживается» два диаметрально противоположных процесса — окисление и восстановление? Почему образующиеся при этом вещества не взаимодействуют между собой? На эти вопросы был найден ответ. Оказалось, что фотосинтез протекает не по всей ткани листа, а в особых внутриклеточных образованиях — хлоропластах, причем одни части молекулы хлорофилла связаны со слоем хлоропласта, представляющим собой белок, а другие — со слоем жироподобного вещества липида. Оба слоя чередуются, разобщая продукты фотосинтеза, защищая их от необратимых реакций и способствуя тем самым аккумуляции энергии. Вскрытие механизма фотосинтеза и появление возможности управления этим важным процессом окажется исключительно полезным как для биологии, так и для техники, в частности для энергетики.

Ультрафиолетовая радиация широко используется в медицинской практике. Врачи различают три зоны ультрафиолетовой радиации, обладающие специфическим биологическим действием на организм: зона *A* (380—320 нм) — специфична укрепляющим и закаливающим действием; зона *B* (320—280 нм) — эритемное (вызывает покраснение кожи) действие (максимальное при длине волны 297 нм); зона *C* (280 нм и ниже) — бактерицидное (действует губительно на бактерии) действие (максимальное при 254 и 257 нм).

Столь широкий диапазон использования ультрафиолетовой радиации в медицине, естественно, потребовал создания специаль-

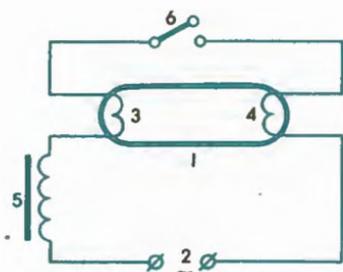


Рис. 95. Схема включения ртутно-кварцевой лампы низкого давления.

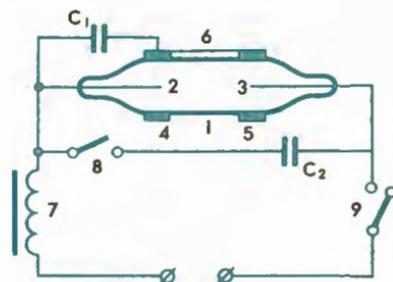


Рис. 96. Схема включения ртутной лампы высокого давления.

ных источников излучения — ртутных ламп низкого и высокого давления, излучение которых богато ультрафиолетовыми лучами.

На рис. 95 показана схема ртутно-кварцевой лампы низкого давления (порядка 0,1 мм рт. ст.), которая используется как бактерицидная. Ультрафиолетовое излучение возникает в парах ртути в результате электрического разряда и беспрепятственно проходит через оболочку 1 лампы, сделанную из увиолевого стекла, прозрачного для длин волн, превышающих 250 нм. Трубка заполнена, кроме паров ртути, аргоном. На рисунке: 2 — источник тока, 3 и 4 — вольфрамовые спирали, 5 — дроссель, 6 — пусковой ключ. При замыкании ключа спирали накаляются, образуя электронное облако, а при размыкании ключа возникающая в дросселе э. д. с. самоиндукции вызывает в аргоне между спиралями тлеющий разряд. Последний, разогревая ртутные пары, перерастает в дуговой, излучение которого богато ультрафиолетовыми лучами.

Ртутная лампа высокого (порядка 1 атм) давления — аргонортутно-кварцевая горелка — применяется в медицине для лечебных целей, для закаливания организма и т. д. И в этом случае тлеющий разряд в аргоне перерастает в богатый ультрафиолетом дуговой разряд в парах ртути. Схема ртутной лампы высокого давления показана на рис. 96, где 1 — кварцевая трубка (кварц хорошо пропускает ультрафиолет), 2, 3 и 4, 5 — соответственно стержневые и кольцевые электроды, замкнутые металлической пластинкой 6. При замыкании ключа 9 напряжение подается на электроды. Напряжение между электродами 3 и 5 ионизирует газ, возникает тлеющий разряд. Ключ 8 пусковой, для облегчения запуска лампы. Все последующие процессы протекают аналогично процессам в лампах низкого давления. Ультрафиолетовые лучи, полученные с помощью аргоно-ртут-

но-кварцевой горелки, очень широко применяются как физиотерапевтический метод лечения. В медицинской практике его называют «кварц» — по названию материала, из которого изготовлен баллон этой лампы.

Существуют различные модификации ртутных ламп. Бактерицидные лампы, выполненные в виде подвесных светильников, устанавливаются в операционных, инфекционных отделениях больниц, в школах, яслях. Ртутная лампа, покрытая люминофором, дает возможность переместить максимум излучения в видимую часть спектра; в этом варианте она используется как источник искусственного освещения, спектральный состав которого может быть максимально приближен к солнечному. Комбинируя люминофоры, можно с помощью таких ламп получить свет любого цвета. Специальная люминесцентная лампа называется эритемной (длина волны 285—380 нм) и используется для профилактических целей. Наконец, весьма перспективны светильники, основанные на явлении электролюминесценции,— некоторые кристаллические фосфоры излучают свет непосредственно под действием переменного тока.

Ультрафиолетовый скальпель

Для очень тонких биологических исследований приходится «оперировать»... клетку. Но ведь клетка так мала! Хирургия ее казалась невозможной. Где взять сверхтонкий инструмент, которым можно было бы вмешаться в микроскопический организм одной клетки?

Тончайшие иглы заменены... тончайшим ультрафиолетовым лучом. Источником его служит дуговой разряд между магниевыми электродами. Проходя через специальную оптическую систему, ультрафиолетовая часть дуги фокусируется в пучок толщиной 10^{-3} мм (60 таких пучков уместилось бы в диаметре человеческого волоса) и направляется на предметный столик микроскопа с изучаемой клеткой. Так микроскоп из средства наблюдения превратился в прибор для аналитического эксперимента со «скальпелем нулевой массы».

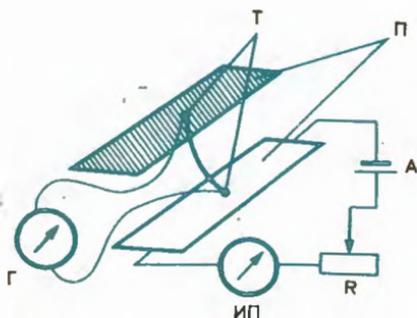
Метод ультрафиолетового скальпеля, особенно в сочетании с фазовоконтрастным микроскопом, позволил изучать самые разнообразные проблемы внутриклеточной жизни.

Каждый читатель этой книги (как и авторы) испытывал на себе чрезмерное действие солнечного излучения, ультрафиолетовая часть которого лишала нас сна и буквально снимала с нас кожу. Широкое использование инфракрасной, и особенно ультрафиолетовой, радиации для медицинских целей, естественно, вызвало необходимость в дозиметрии этих излучений.

Прежде всего необходимо ввести дозиметрические единицы. Доза облучения ультрафиолетовыми и инфракрасными лучами, а также солнечной радиацией определяется количеством энергии, падающей на единицу поверхности, и измеряется для инфракрасного и солнечного излучений в $\text{кал}/\text{см}^2$, а для ультрафиолетового — в $\text{эрг}/\text{см}^2$. Доза облучения, отнесенная к единице времени (мощность дозы), называется облученностью, обычно она измеряется в $\text{кал}/(\text{см}^2\text{мин})$ или $\text{эрг}/(\text{см}^2\text{мин})$.

Вспомним далее, что лучистая энергия, отнесенная к единице времени, называется лучистым потоком, она измеряется в ваттах. Для учета специфики действия излучения вводятся понятия теплового потока — для инфракрасного излучения — (измеряется в $\text{кал}/\text{мин}$) и бактерицидного и эритемного потоков — для ультрафиолетового излучения (для них вводятся специальные единицы). ЭР — поток ультрафиолетовой радиации, вызывающий такое же эритемное действие, как поток излучения с длиной волны 297 нм мощностью 1 вт (при $\lambda=297$ нм эритемное действие максимально); бакт — поток ультрафиолетовой радиации, вызывающей такое же бактерицидное действие, как поток излучения с длиной волны 253,7 нм мощностью 1 вт (при $\lambda=253,7$ нм бактерицидное действие максимально). Отсюда для облученности получим единицы $\text{ЭР}/\text{м}^2$ и $\text{б}/\text{м}^2$.

Рис. 97. Схема простейшего аннелиметра.



Аппаратура для измерения радиации основана на уже известных нам принципах. Так, ультрафиолетовое излучение измеряется либо по фототоку (разумеется, фотоземельты снабжаются специальными фильтрами), либо по интенсивности свечения люминофоров. Для измерения тепловой ра-

диации (солнечной или инфракрасной) используются актинометры: теплоэлементы, биметаллические пластинки, плоские зачерненные теплотетры и т. д. На рис. 97 показана схема одного из самых точных актинометров — пиргелиометра Ангстрема. Измеряемый поток нагревает расположенную вне прибора манганиновую пластину II (зачерненную). Вторая пластина, расположенная внутри прибора, нагревается током аккумулятора А. С помощью реостата R температуры обеих пластин уравниваются. Равенство температур будет тогда, когда стрелка гальванометра Г термопары Т установится на нуле. Шкала измерительного прибора III градуируется непосредственно в кал/см²мин.

ЛАЗЕРЫ — ПОМОЩНИКИ ВРАЧЕЙ

Почему лазеры лучше линз и зеркал?

Каждый знает, что оптическая линза или вогнутое зеркало сводит параллельный пучок света в точку, находящуюся в фокусе. И наоборот, если источник света находится в фокусе, то та часть света, которая попадает на линзу или зеркало, превращается в пучок параллельных лучей. Иными словами: сферическая волна, выходящая из точки, совпадающей с фокусом, превращается в плоскую волну. Параллельный пучок света рассеивается, яркость луча уменьшается с увеличением расстояния.

Кроме того, никакая оптическая система не может сделать изображение обычного источника света более ярким, чем сам источник. Солнечный зайчик, отброшенный большим вогнутым зеркалом, режет сталь и плавит гранит. Но как ни велика температура этого зайчика, она ниже температуры Солнца.

Иное дело в лазерах. Оптические квантовые генераторы испускают почти не расходящийся пучок света, причем лучи его тем более параллельны, чем больше сечение пучка. Сфокусированный луч оптического квантового генератора пробивает дырки в стальных пластинах, испаряет алмаз, а если в фокусе окажется газ, превращает его в миниатюрную шаровую молнию. И самое поразительное здесь то, что источник, испускающий этот шквал энергии, сам совсем холодный. Иногда он имеет температуру жидкого азота.

Советские физики Н. Басов, А. Прохоров и американский физик Ч. Таунс в 1964 году были удостоены Нобелевской премии за исследования по квантовой электронике — теоретической основе квантовых генераторов.

Идея, разработанная этими учеными, заключается в следующем. Согласно теории Н. Бора, энергия электронов в атоме квантована: она принимает лишь некоторые значения $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$. Схематически каждое значение энергии изображается в виде энергетического уровня. На рис. 98 показаны энергетические уровни для атома водорода.

Переход электрона с верхнего уровня на нижний сопровождается выделением энергии. Эти переходы происходят произвольно, случайным образом. Для получения когерентного, направленного излучения необходимо заставить электроны одновременно перейти с более высокого уровня на низкий, вызвать так называемое стимулированное излучение.

Эйнштейн показал, что фотон с энергией, равной разности энергий двух уровней, способен не только перевести электрон с нижнего уровня на верхний, но и стимулировать переход электрона с верхнего уровня на нижний. При стимулированных переходах излучаются вторичные фотоны, частота и фаза которых совпадает с частотой и фазой первичных фотонов. Так возникает вынужденное излучение.

Нормально уровни энергии заселены так, что чем выше уровень, тем он беднее частицами. В обычных условиях число электронов на нижнем уровне больше, чем на верхнем, т. е. излучение не превышает поглощения.

Если мы подводом энергии (накачкой, подкачкой) заставим электроны перейти на более высокий уровень, наступит инверсия — верхние уровни окажутся более заселенными, чем нижние.

На возбужденном энергетическом уровне электроны задерживаются 10^{-8} сек, затем часть из них возвращается на основной уровень. В отдельных случаях большинство электронов может перейти на промежу-

Рис. 98. Энергетические уровни атома водорода.



точный, метастабильный уровень, задерживаясь на нем 10^{-3} сек. Теперь достаточно даже одного фотона с энергией, соответствующей переходу с метастабильного уровня на основной, чтобы вызвать лавинную реакцию вынужденных переходов — стимулированное излучение.

Для наглядности представьте себе групповой прыжок в воду. На вышку пловцы поднимаются по лестнице по одному, а прыгают вниз одновременно.



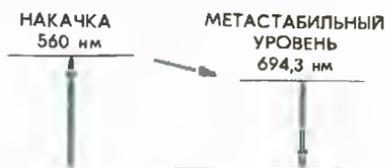
Рис. 99. Схема устройства рубинового лазера.

Теперь о форме

Рис. 100. Энергетические уровни рубинового лазера.

Новый генератор световых волн — был назван лазер. Буква «Л» — сокращение слова «лайт» — свет. Остальные буквы означают «усиление. при помощи индуцированного испускания».

На рис. 99 изображена схема рубинового лазера. Он состоит из синтетического рубинового стержня с гладко отшлифованными торцами, причем один делается непрозрачным, а другой (выходной) — полупрозрачным. Вокруг стержня располагается газосветная импульсная лампа — лампа подкачки. Энергетические уровни рубина изображены на рисунке 100. Лампа накачки дает излучение с длиной волны 560 нм, под действием которого электроны переходят на более высокий энергетический уровень. Затем без излучения (теряя энергию на взаимодействие) электроны переходят на метастабильный уровень, где они могут некоторое время удерживаться, поэтому на этом уровне они накапливаются.



Теперь достаточно одного кванта с длиной волны 694,3 нм (красной), и электроны начнут переходить на стабильный уровень и давать когерентное излучение с длиной волны 694,3 нм. На рис. 101 показано лавинообразное увеличение светового потока за счет «сбивания» электронов с метастабильного уровня.

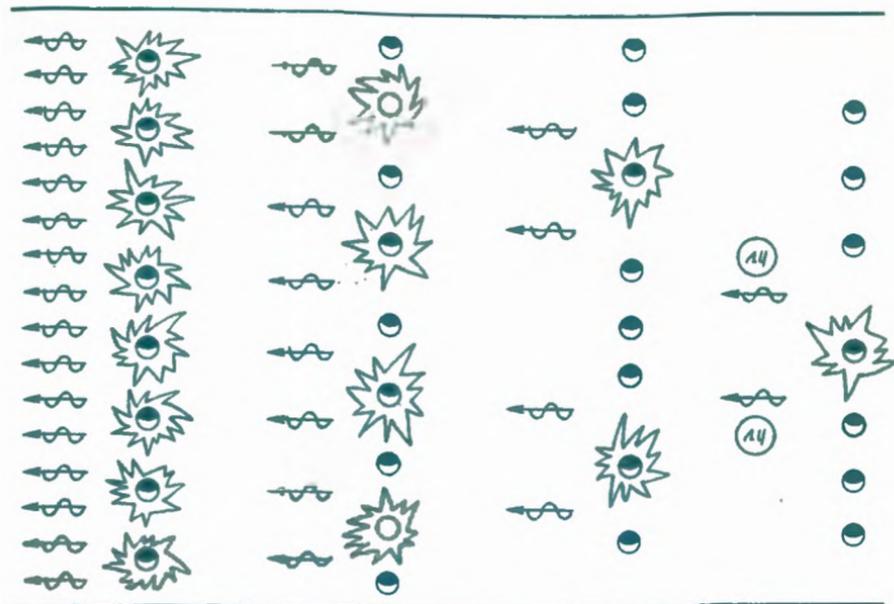


Рис. 101. Излучение квантов в рубиновом лазере.

Луч красного света многократно отражается между торцами рубина, и его интенсивность быстро возрастает. При некотором значении интенсивности луч проходит через полупрозрачный торец в виде светового импульса. Затем весь процесс повторяется. Световой луч лазера очень ярк — он виден на расстоянии до 40 км.

И, наконец, о применении

Почти с самого начала создания оптических квантовых генераторов делались попытки использовать их в медицине. Здесь большое значение имеет не только интенсивность лазерного луча, но и еще одно его замечательное качество — избирательность действия. Лазерные лучи лучше поглощаются окрашенными средами и тканями и свободно проходят сквозь прозрачные. Попадая в глаз, луч поглощается темноокрашенными клетками сетчатой оболочки глаза, не повреждая роговицу. Это используется для приваривания отслоившейся сетчатки (рис. 102) и для разрушения внутриглазных опухолей.

Способность лазерного излучения избирательно поглощаться окрашенными тканями используется также в дерматологии. С его помощью можно удалять различного рода пигментные пятна и татуировки. При правильном выборе энергии излу-

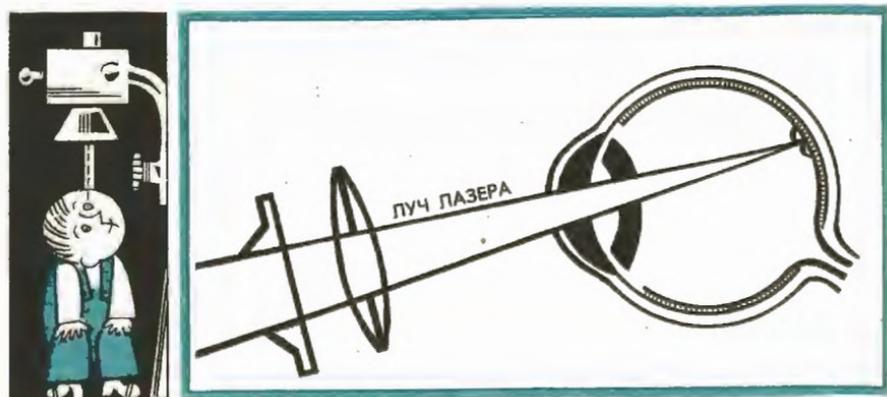
чения разрушаются только окрашенные клетки, а находящиеся между ними участки белой кожи остаются практически неповрежденными.

Одно из самых перспективных направлений применения лазеров в медицине — лазерная терапия опухолей. Первые опыты показали, что излучения лазеров способны необратимо повреждать опухолевые клетки. Установка автоматически миллиметр за миллиметром облучает всю массу опухоли по заранее намеченной программе. Вспышки световыми иглами впиваются в опухоль, но благодаря их молниеносности почти не ощущаются больным. На медицинском поприще лазеры делают свои первые робкие шаги. Возможности, заложенные в уникальных свойствах их излучения, реализованы сегодня лишь в очень небольшой степени. В частности, только в ничтожной мере используется пока избирательность их действия. Лазерный луч прекрасно фокусируется оптикой микроскопа, превращаясь в тончайшую световую иглу диаметром не больше одного микрона. Таким лучом можно разрушать отдельные структурные компоненты клетки (значительно лучше, чем ультрафиолетовым скальпелем).

Не меньше и хирургические возможности лазеров. Луч газового лазера, излучающего свет непрерывным потоком, не только отсекает пораженные ткани, но и как бы сплавляет встречающиеся по ходу разреза сосуды, сводя кровотечение к минимуму. Эта его особенность может иметь большое значение для операций на внутренних органах с интенсивным кровоснабжением.

Есть все основания полагать, что лазеры окажут существенное влияние на развитие медико-биологической науки, займут важное место в медицине будущего. И это будущее закладывается уже сегодня.

Рис. 102. Схема приваривания сетчатки в глазном дне.



Из истории замечательного открытия

На протяжении тысячелетий установление диагноза и назначение лечения основывалось на жалобах больного и на данных внешнего осмотра и наблюдения. Значительно позже появились такие относительно объективные исследования, как перкуссия (выстукивание) и аускультация (выслушивание), создающие представления о работе некоторых важнейших внутренних органов человека, в первую очередь сердца и легких. Как много дала бы врачу возможность увидеть в действии сердце живого человека, желудок, легкие и другие важнейшие органы! Какое огромное значение имел бы непосредственный осмотр человеческого организма, если бы он стал вдруг «прозрачным».

Потребность увидеть не оболочку, а структуру организма живого человека, его анатомию была столь насущной, что когда чудесные лучи, позволяющие осуществить это на практике, были, наконец, открыты, обычно недоверчивые и консервативные к новшествам врачи сразу поняли, что в медицине наступила новая эра.

В пятницу вечером 8 ноября 1895 года в небольшом немецком городе Вюрцбурге малоизвестный до той поры физик Вильгельм Конрад Рентген, занимаясь, как обычно изучением вакуумных трубок, обратил внимание на удивительное явление. В темноте лаборатории при подаче тока высокого напряжения на вакуумную трубку, завернутую наглухо в плотную черную бумагу, на столе, где производился опыт, появилось яркое зеленоватое свечение. Оказалось, что светится лист картона, покрытый слоем платиново-цианистого бария. Анализируя возникновение свечения под влиянием пропускания тока через вакуумную трубку, исследователь понял, что в ней возникают какие-то неизвестные науке лучи, обладающие высокой проникающей способностью. Рентген назвал их «X-лучами».

В течение семи недель Рентген не выходил из кабинета. По истечении своей пятидесятидневной работы он опубликовал первое предварительное сообщение «О новом виде лучей». На нескольких страницах он дал такое исчерпывающее объяснение их свойств, что «многие тысячи исследователей не смогли прибавить ни йоты к тому, что сделал сам Рентген в самых элементарных условиях, с помощью самых элементарных приборов». Так писал о Рентгене академик А. Ф. Иоффе, проработавший с Рентгеном свыше 20 лет.

В 1901 году Рентген был удостоен Нобелевской премии. Когда сообщение об открытии новых «всепроникающих» лучей появи-

лось в газетах Западной Европы и Америки, оно быстро обросло сенсационной шумихой. Так, студент Колумбийского университета сообщил, что он превратил в слиток золота кусок свинца путем облучения его X -лучами. Американский изобретатель Томас Эдисон получил партию театральных биноклей с просьбой оборудовать их приспособлением, чтобы «видеть сквозь одежду». Через несколько недель после открытия Рентгена одна лондонская фирма рекламировала нижнее белье, которое способно предохранить от проникновения «лучевой энергии». Другая фирма предлагала специальные шляпы, «защищающие от чтения мыслей» при помощи X -лучей.

Однако вскоре публикация сенсационных новостей в печати прекратилась. Их сменили более объективные и серьезные сообщения об использовании рентгеновских лучей, в первую очередь в медицине. Буквально через несколько дней после опубликования тезисов Рентгена в физической лаборатории Петербургского университета был сделан снимок руки. Первую рентгеновскую трубку в январе 1896 года изготовил А. С. Попов. Он же сконструировал первый отечественный рентгеновский аппарат, при помощи которого производил диагностические снимки. Старший врач крейсера «Аврора» В. С. Кравченко во время Цусимского сражения исследовал при помощи рентгеновских лучей 40 из 83 раненых. «Мне это страшно облегчило работу,— писал В. С. Кравченко,— а раненых избавило от лишних страданий — мучительного отыскивания осколков зондом. Результаты превзошли все мои ожидания».

Возбуждение рентгеновского излучения

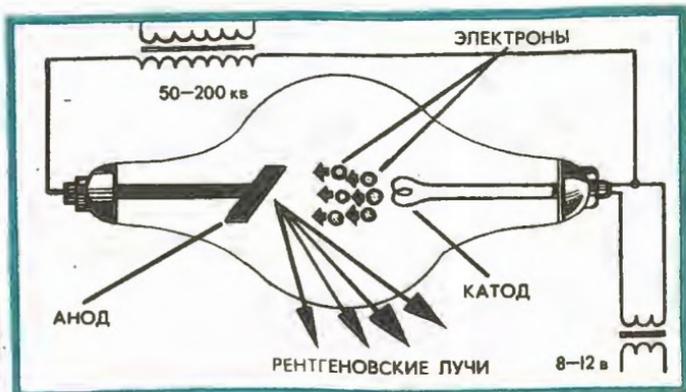
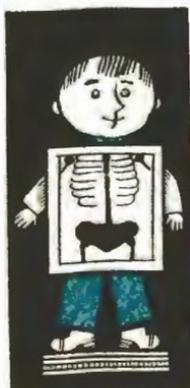
Как же возникают рентгеновские лучи? Какова их природа? В рентгеновской трубке (рис. 103), представляющей собой чаще всего стеклянный баллон, из которого удален воздух, имеется катод (нить накала), излучающий электроны, когда через него проходит ток, и анод — массивный электрод, на поверхности которого прикрепляется пластинка из тугоплавкого металла (вольфрама). На катод для его раскаливания (только тогда он излучает электроны) подается напряжение 8—12 в. На трубку (между анодом и катодом) подается высокое напряжение 50—200 кв, под действием которого электроны, излучаемые катодом, приобретают огромные скорости и ударяются о вольфрамовую пластинку анода.

Что же происходит в момент удара электрона о препятствие? Электрон, подлетая близко к аноду, тормозится электрическим полем электронов того атома вольфрама, в область которого он влетел. Резкость торможения зависит от напряженности

электрического поля этой части атома, она же, в свою очередь, изменяется в зависимости от движения электронов в атоме. Таким образом, электроны летящие к аноду, будут по-разному им тормозиться.

При торможении электрона меняется его магнитное поле. Изменение магнитного поля вызывает изменение электрического поля, а это изменение приводит к изменению магнитного поля и т. д.— так возбуждается электромагнитная волна, длина которой зависит от резкости торможения электрона. Чем резче он затормозится, тем быстрее произойдут изменения векторов \vec{E} и \vec{H} , тем короче будет длина волны. Получаемые электромагнитные волны называются тормозным рентгеновским излучением. Это излучение состоит из набора самых разнообразных длин волн (в пределах рентгеновских), так как условия торможения электронов разнообразны. Такое излучение дает сплошной спектр и поэтому иногда называется «белым». Второе обстоятельство, являющееся причиной возбуждения рентгеновских лучей, связано с тем, что электрон, летящий от катода, обладает большой энергией; вторгаясь в атом анода (вольфрама) и пролетая вблизи электрона этого атома, он выбивает его с орбиты, а сам, отскакивая, также покидает пределы атома. В этом атоме вольфрама на одном из энергетических уровней образуется «вакансия» — место, не заполненное электроном. Это место заполняется одним из электронов, находящимся на более высоком энергетическом уровне. При таком переходе избыток энергии излучается электроном в виде кванта. Если такой переход совершается на внутренние оболочки атома, то излучаются рентгеновские кванты, переходы электронов в поверхностных оболочках приводят к излучению квантов видимого света.

Рис. 103. Схема устройства рентгеновской трубки и ее включения.



На рис. 104 показан ряд возможных переходов электронов в атоме, приводящих к излучению (см. также рис. 98). Таких переходов ограниченное количество, каждый из них дает излучение определенной длины волны. Этим объясняется то, что рентгеновское излучение, полученное таким образом, имеет линейчатый спектр, характер которого зависит от вещества анода. Это обусловило название рентгеновского излучения — характеристическое. Оно (или его спектр) характеризует вещество анода. В данном случае получается спектр, характерный для вольфрама. Пластинку, накладываемую на анод, можно изготовить и из другого элемента; тогда получится спектр, характерный для этого элемента. (Переход электрона на первый уровень в легком атоме, например в атоме водорода,— рис. 98 дает ультрафиолетовое излучение, а переход на первый же уровень тяжелого элемента, например вольфрама,— рис. 104,— дает уже рентгеновское излучение).

Итак, при взаимодействии быстрых электронов с атомами тяжелых элементов возбуждаются рентгеновские лучи — тормозные и характеристические. Эти лучи представляют собой электромагнитные волны очень малой длины.

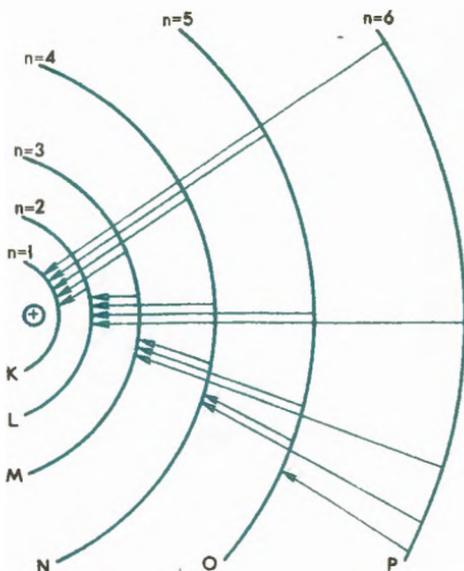


Рис. 104. Схема возможных переходов электронов в атоме.

Характеристики рентгеновских лучей

Рассматривают две характеристики рентгеновских лучей: интенсивность и жесткость.

Интенсивность рентгеновских лучей, как и любого другого излучения, обусловлена величиной энергии, переносимой излучением через единицу перпендикулярно расположенной площади в единицу времени. Для изменения интенсивности рентгеновских лучей нужно изменять напряжение на катоде рентгеновской трубки. Это приведет к возрастанию потока летящих

электронов и, соответственно, к увеличению количества рентгеновских квантов.

Жесткость рентгеновских лучей обуславливается длиной их волны: чем короче длина волны, тем более жесткие лучи. Рентгеновские лучи с большой длиной волны называются *мягкими*. Жесткость регулируется напряжением на трубке (между анодом и катодом). При повышении напряжения увеличивается скорость и энергия летящих к аноду электронов. Это приводит к более резкому торможению электрона; кроме того, такой быстро летящий электрон может выбить электрон с более глубоких орбит атома. Оба эти обстоятельства приводят к уменьшению длины рентгеновской волны или к возрастанию жесткости рентгеновских лучей.

Свойства рентгеновских лучей

1. Рентгеновские лучи распространяются прямолинейно. Это свойство дает возможность использовать их для «просвечивания», так как теневые изображения просвечиваемого тела оказываются аналогичными самому телу.

2. Рентгеновские лучи не отклоняются ни в электрическом, ни в магнитном полях. Это свойство подтверждает их природу — они не являются потоком заряженных частиц; это — электромагнитные волны.

3. Рентгеновские лучи обладают большой проникающей способностью. Поглощение рентгеновских лучей прямо пропорционально кубу порядкового номера элемента (в системе Менделеева), кубу длины волны и зависит от толщины просвечиваемого тела. Элементы с большим порядковым номером сильнее поглощают рентгеновские лучи. Это приводит к тому, что на фоне мягких тканей организма (в основном вода) хорошо видны кости — (где много кальция). Желудок и кишечник станут заметны, если их заполнить «бариевой кашей». Такие контрастные вещества широко используются в рентгенодиагностике.

Для повышения проникающей способности необходимо использовать более жесткие лучи — длина волны короче, лучи поглощаются меньше (в куб. раз!), следовательно, лучше проходят через тело. Именно это свойство рентгеновских лучей дает возможность использовать их для просвечивания тел и в медицине, и в технике (дефектоскопия).

4. Рентгеновские лучи вызывают фотолюминесценцию некоторых веществ (вспомните, как были открыты рентгеновские лучи). Это свойство используется для рентгеноскопии.

5. Рентгеновские лучи оказывают фотохимическое действие (засвечивают фотопленку). Это свойство используется для рентгенографии — получения рентгеновских снимков.

6. Рентгеновские лучи вызывают ионизацию тел, через которые они проходят. Это свойство имеет громадное значение для дозиметрии рентгеновского и других ионизирующих излучений. Наиболее простой дозиметр — ионизирующая камера. Эту камеру предварительно заряжают, величину заряда измеряют. Если камера находится в сфере действия рентгеновских лучей, то ионы, возникающие под их действием, разряжают камеру. По степени уменьшения заряда камеры судят о дозе рентгеновских лучей.

7. Рентгеновские лучи оказывают биологическое действие. Это свойство мы рассмотрим более подробно.

Биологическое действие рентгеновских лучей

Рентгеновский квант, попадая в какое-либо вещество, вырывает из его атома электрон, ионизируя вещество. Рентгеновский квант обладает настолько большой энергией, что вырванный им из атома электрон сам может выбить электрон из другого атома (вторичная ионизация), а этот электрон из следующего и т. д. до тех пор, пока энергии электрона будет уже недостаточно для ионизации.

Особенно сильно действуют рентгеновские лучи на быстрорастущие клетки. Это следует учитывать при назначении рентгеновского просвечивания маленьким детям. Однако эта же особенность нашла широкое применение в клиниках для лечения — рентгенотерапия. Дело в том, что злокачественные образования как раз имеют такого рода клетки, на которые рентгеновские лучи действуют губительно. Все дело в том, чтобы облучение не погубило здоровую ткань. Например, рак кожи практически полностью излечивается. Лечение рака внутренних органов во многом зависит от времени его обнаружения. Хорошие результаты дает рентгеновское облучение после удаления злокачественных образований — после операции могут оставаться отдельные раковые клетки, рентгеновские лучи их поражают. Для облучения глуболежащих слоев — глубокой терапии — используется жесткое рентгеновское излучение, получаемое при напряжении на трубке около 200 кв и выше.

При длительном облучении живых организмов рентгеновские лучи вызывают патологические (отклонения от нормы) явления. Опасность воздействия излучения усугубляется тем, что рентгеновские лучи обладают кумулятивным действием (эффект, вызываемый ими, накапливается), поэтому нужно уметь измерять дозу, сообщаемую пациенту при его исследовании, следует оберегать врача и другой медицинский персонал от действия рентгеновских лучей.

Как уберечь медицинский персонал? Зная закон поглощения

рентгеновских лучей (прямо пропорционально кубу порядкового номера элемента), можно легко ответить на этот вопрос: нужно делать защиту из тяжелого элемента. В качестве такого элемента избрали свинец $Z = 84$ (золото тяжелее свинца, но его для защиты по понятным причинам не используют). Рентгеновскую трубку помещают в свинцовую капсулу с небольшим отверстием для выхода рентгеновских лучей (защитная трубка). Для защиты персонала используются свинцовые ширмы, стенки. Руки врача закрываются перчатками из просвинцованной резины. Флуоресцирующий экран покрывает стекло, в состав которого входит большое количество свинца. Такое стекло прозрачно для видимого света и в достаточной мере непрозрачно для рентгеновских лучей.

Не менее важным является вопрос защиты больного. Необходимо по возможности сокращать время облучения больного, а при исследовании и лечении облучать только нужные области тела (использовать набор тубусов, обеспечивающих определенную величину поля облучения).

Необходимо также пользоваться фильтрами. Излучение, даваемое трубкой, образует спектр, не ограниченный со стороны длинных волн. При просвечивании рентгеновское изображение создается излучением, обладающим достаточной проникающей способностью. Более мягкая составляющая в образовании изображения участия не принимает, поглощается телом и может вызвать ожог. Эту мягкую компоненту убирают при помощи фильтров. Таким образом, при рентгенотерапии в зависимости от глубины расположения патологического очага используются алюминиевые или медные фильтры (пластинки) различной толщины. При диагностике, проводимой при напряжениях 40—100 кв пользуются алюминиевыми фильтрами, а при терапии (150—250 кв) — медными.

Меры предосторожности, которые сейчас уже выработаны, полностью обеспечивают безопасность медицинского персонала от вредного действия на них рентгеновских лучей.

Рентгеноскопия и рентгенография

При рентгеновском просвечивании и рентгенографии между трубкой T и экраном \mathcal{E} (рис. 105) помещается исследуемое тело M (при рентгенографии вместо экрана ставится фотографическая пластинка). Рентгеновский экран представляет собой картон, покрытый веществом, флуоресцирующим под действием рентгеновских лучей. Наиболее совершенными в настоящее время являются экраны, покрытые сульфидами цинка с добавками активаторов, например кадмия. Такие экраны дают яркое

свечение желто-зеленого цвета, хорошо воспринимаемое глазом.

Когда лучи из трубки попадают на экран, то выше точки *A* и ниже точки *B* экран светится ярко, а в области *AB* — менее ярко, так как в нее попадают лучи, ослабленные при прохождении через тело *M*. Если тело *M* однородно и имеет одинаковую толщину, то и тень в области *AB* будет однородной. Для получения изображения какой-нибудь детали *D* тела необходимо,

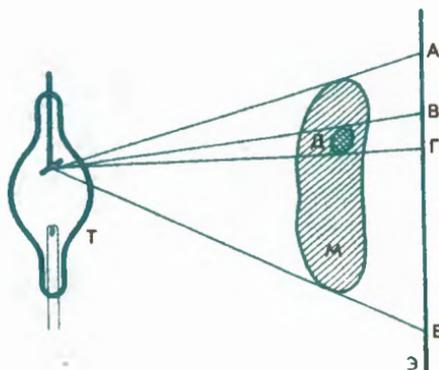


Рис. 105. Схема получения рентгеновского изображения.

чтобы она поглощала рентгеновские лучи иначе, чем окружающие ее части тела. Если деталь *D* поглощает лучи слабее тела, то экран за ней (*BГ*) будет светиться ярче (на пластинке получится большее почернение), если же деталь *D* поглощает лучи сильнее тела, то экран за ней будет светиться менее ярко, — создается контрастное теневое изображение (на пластинке — меньшее почернение). Полученное изображение на экране или на фотографической пластинке изучается врачом.

На рентгенограмме можно различить не только внутренние органы. Этого было бы слишком мало для детального анализа и, следовательно, для диагностики. Благодаря тому, что каждый орган, как правило, не однороден по своему химическому составу, тень, которую он образует, также не однородна и имеет свой рисунок, или свою структуру. Изучение этой структуры составляет основу рентгеноанатомии — науки о нормальном строении человеческого тела в рентгеновском изображении. Сравнивая снимок больного органа с рентгенограммой здорового, врач видит отклонения от нормы и на основании этого ставит диагноз.

Определение глубины залегания инородного тела

Не менее важно, особенно для хирурга, применение рентгеновских лучей для определения глубины залегания инородного тела.

Предположим, что внутри тела *T* (рис. 106) в точке *A* находится инородное тело (пуля, игла и т. д.). Для определения положения точки *A* делают два снимка при одинаковых положениях тела *T* и пленки. При смещении трубки *Tp* сместится и изобра-

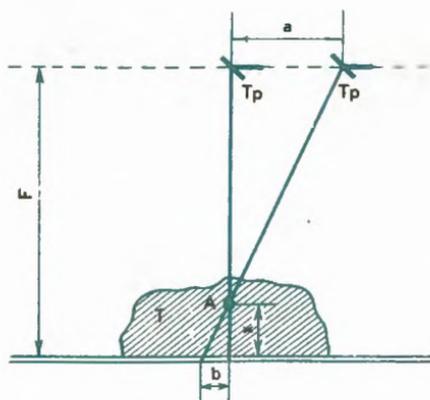


Рис. 106. Схема томографии.

рентгенограмму слоя, в котором находится точка A , трубку и пленку нужно двигать так, чтобы тень слоя, где находится точка A , все время падала на одно и то же место пленки (пока трубка пройдет расстояние a , пленка должна пройти расстояние b). Тени слоев, расположенные выше A и ниже A , будут двигаться быстрее или медленнее пленки и поэтому «смажутся». Для получения рентгенограммы другого слоя необходимо соответственно изменить расстояния между трубкой, слоем и пленкой.

жение точки A на пленке. Зная расстояние трубки от пленки F , величину перемещения трубки a , смещение изображения b можно из подобия треугольников определить расстояние x инородного тела от пленки:

$$\frac{a}{b} = \frac{F-x}{x}; \quad x = \frac{Fb}{a+b}.$$

Эту задачу можно решить и не пользуясь расчетом. Для этого нужно сделать послойное рентгенографирование — получить томограмму. Чтобы получить

Перспективы рентгенографии

Непрерывное совершенствование техники и методики рентгенологических исследований открывает новые возможности и перспективы в диагностике важнейших заболеваний человека.

Одним из крупных достижений является разработка методики электрорентгенографии. Этот метод позволяет производить рентгенограммы без пленки, покрытой фотографической эмульсией. Фотопленку заменяет заряженная полупроводниковая пластинка из селена. Под действием рентгеновских лучей на этой пластинке образуется скрытое изображение снимаемого объекта, которое затем при помощи несложной процедуры переносится на обыкновенную бумагу. Для получения изображения требуется 20 сек.

Электрорентгенографическое изображение по сравнению с обычным обладает рядом достоинств. На одном снимке можно получить четкое изображение тканей, резко отличающихся по своей оптической плотности, например костей и мягких тканей. Повышение контрастности снимка позволяет в ряде случаев

снижать дозировку контрастных препаратов. Кроме того, селеновые пластинки — единственный известный в настоящее время фоточувствительный материал, не подвергающийся действию повышенной радиации. А это может иметь весьма существенное значение, например, для космических исследований. Кроме того, одна селеновая пластинка может быть использована до 3000 раз. Один квадратный метр пластины может заменить 3000 м² рентгеновской пленки! А это — сотни килограммов пищевой желатины и, что еще важнее, 50 кг серебра. При работе с электрорентгенографической аппаратурой отпадает необходимость в фотолабораториях и затемнении, так как обработка селеновых пластин производится на свету.

Большим успехом рентгенологии является разработка цветной рентгенографии. Известно, что на протяжении всей своей истории рентгенология оперировала только черно-белыми снимками. Теперь существует несколько способов получения цветных рентгенограмм. Их можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся непрямые способы: проявление и передача изображения через систему цветного телевидения. Более современен «прямой способ», основанный на использовании цветной рентгеновской пленки, которая может быть покрыта двумя или тремя эмульсионными слоями, чувствительными к отдельным цветам. На снимке видны оттиски нескольких заданных цветов. Конечно, они не отражают истинной окраски нормальных и патологических тканей человеческого тела, и зависит лишь от их плотности, однако цветовые различия способствуют повышению информационной ценности снимков.

Электрорентгенография решила ряд важных вопросов. Но наиболее интересно ее сочетание с телевизионным изображением. Рентгенотелевидение — позволяет передать изображение на расстояние и вывести рентгенологические исследования из темноты. Одно из наиболее ценных качеств рентгенотелевидения — значительное снижение дозы проникающего излучения. Доза облучения уменьшается в 15 раз и составляет 0,4 рентгена в минуту. К тому же на 20—30% сокращается время проведения исследования, что позволяет снизить суммарную дозу облучения в 25—30 раз. Немалое значение имеет и психологическая сторона дела. В освещенной комнате легче осуществляется контакт между врачом и больным. Применяя этот метод, можно делать не только статические снимки, но и записать телевизионное изображение на видеоманитофон либо заснять изображение с экрана на кинопленку.

Рентгеновские лучи успешно служат медицине, методы их использования совершенствуются. Так, в частности, в настоящее время в онкологических клиниках для получения жесткого рентгеновского излучения применяют ускорители электронов — бета-троны.

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

РАДИАЦИЯ — ДОБРО И ЗЛО

О биологическом действии ионизирующей радиации и ее влиянии на организм человека и животных стало известно еще в конце прошлого столетия. Тогда во многих странах мира ученые — физики, химики, инженеры, врачи и биологи — занялись исследованиями с помощью рентгеновских и гамма-лучей. Многие из них вначале не подозревали о том, что радиация обладает биологическим действием, и получили ожоги кожи. Среди пострадавших был и Эдисон, пытавшийся изобрести прибор для просвечивания рентгеновскими лучами — криптоскоп.

В печати то и дело появлялись сообщения о вредном биологическом действии рентгеновских и ядерных излучений: наблюдались изменения кожи кистей рук, изменение крови, выпадение волос, общее недомогание с тошнотой, головными болями и другими признаками.

У рентгенологов, работавших с первыми низковольтными рентгеновскими аппаратами, возникали лучевые ожоги. Они развивались медленно и излечивались с трудом, оставляя после себя неизгладимые рубцы.

В 1896 году в печати впервые появилось сообщение об экспериментальных исследованиях профессора Санкт-Петербургской военно-медицинской академии И. Тарханова. Русский ученый доказал, что рефлекторная деятельность лягушки при общем ее облучении рентгеновскими лучами заметно снижается. Таким образом, приоритет в открытии биологического действия радиации принадлежит русским ученым.

Отрасль медицины, которая изучает влияние радиации на человеческий организм и ее применение в медицине, называется **медицинской радиологией**. Эта отрасль, в свою очередь, объединяет ныне несколько крупных самостоятельных разделов и направлений — таких, как рентгенология, медицинская радиобиология, лучевая терапия, радиоизотопная диагностика, клиника лучевых поражений (в том числе и лучевая болезнь), радиационная гигиена, противолучевая защита и т. д.

Радиация — всегда добро, если ее используют на благо человека: в народном хозяйстве, в науке, медицине.

Радиация — величайшее зло, когда ее применяют для разрушения, для уничтожения людей и всего живого. Прошло много лет после атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, а результаты вредного биологического действия радиации на население этих городов, на его потомство ощущаются до сих пор. И сейчас в Японии рождаются дети-уроды, до сих пор сердца матерей не спокойны за судьбы детей.

Роль радиации в эволюции жизни, в том числе в происхождении и развитии организмов животных и человека, огромна. Естественный радиоактивный фон радиации, создаваемый радиоактивными веществами, находящимися в почве, воде и атмосфере, а также космическим излучением, существовал с момента рождения нашей планеты и на протяжении многих миллионов лет, в течение которых появилась жизнь и возникли высокоорганизованные существа. Можно утверждать, что в процессе эволюции растения и животные приспособились к этому радиоактивному фону и он стал совершенно необходимым для их существования и развития.

Очевидно и другое: интенсивность естественной радиации постепенно уменьшилась вследствие распада многих радиоактивных элементов Земли, тогда как уровень радиации, испускаемой Солнцем и другими небесными телами (то есть космическое излучение) не изменился. Самый мощный источник излучения — вспышки сверхновых звезд. Некоторые ученые считают, что интенсивная радиация сверхновой звезды, вспыхнувшей сравнительно недалеко от Земли, могла вызвать генетические изменения, послужившие причиной гибели гигантских ящеров мелового периода или внезапного распространения растительности в каменноугольный период. Существуют также некоторые данные, указывающие на связь между вспышками сверхновых звезд в исторические времена и эпидемиями.

Повреждающее действие радиация может оказать на различные органы и системы человека. Это действие проявляется не только в ближайший период, но и в отдаленные сроки. Нередко оно может передаваться потомству, ибо радиация повреждает хромосомный аппарат, вследствие чего возникают нежелательные мутации, то есть изменения наследственных свойств.

Весьма вероятно, что с течением времени у человека может выработаться устойчивость к радиации. Живому организму свойственна приспособляемость и большая пластичность. Но речь, безусловно, идет не о жизни одного или нескольких поколений. Выработка такого иммунитета потребует тысячи и даже миллионы лет. И это только в том случае, если интенсивность радиации на Земле будет возрастать крайне медленно и незначительно.

Не несет ли современная цивилизация усиливающуюся опас-

ность лучевого поражения человека? Скажем, на улицах больших городов, у экранов телевизоров. Такой опасности не существует. Эффект облучения от телевизора на расстоянии 1 м от экрана равен нулю. Что касается лучевого поражения от источников излучения (рентгеновские и гамма-установки, бетатроны, линейные ускорители и т. п.), которые применяются в научно-исследовательских и лечебных учреждениях, то их вредное действие по существующим в нашей стране жестким санитарным нормам полностью исключается. Защитные мероприятия в полной мере обеспечивают радиоактивную безопасность для населения.

Результаты Московского договора о частичном запрещении испытаний ядерного оружия ощутимы довольно отчетливо. Так, уровень содержания цезия-137 в организме человека в 1963 году составлял 100—150 пикокюри* на 1 г калия, а к 1970 году этот уровень снизился до 60—68 пикокюри на 1 г калия. Снижение почти вдвое содержания этого изотопа в теле человека следует рассматривать как благотворный результат прекращения испытаний атомного оружия в атмосфере.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ, ЛЕЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЙ

Меченые атомы

Сущность метода меченых атомов заключается в том, что радиоизотоп, добавленный к неактивным атомам — стабильным изотопам, отличается от них, «намечен» своим излучением, регистрируя которое, можно проследить за поведением, миграцией изотопа и изучить тем самым соответствующий процесс. Смесь активных и стабильных изотопов вводят в организм, добавляя их к продуктам питания, лекарственным веществам и т. д. Поскольку изотопы одного и того же вещества обладают одинаковыми химическими свойствами, то биохимия процесса остается неизменной, а поведение радиоизотопа не будет отличаться от поведения стабильного элемента. Обнаружить же поведение, распределение и перемещение радиозотопа можно с помощью дозиметрической аппаратуры.

Метод меченых атомов обладает очень высокой чувствительностью. Уже сейчас дозиметрическая аппаратура дает возможность считать отдельные частицы. Практически это означает воз-

* 1 кюри — активность такой массы вещества, которая претерпевает $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов за 1 сек.

возможность обнаружить радиоизотопы в ничтожных количествах — порядка 10^{-20} г, что для медиков играет особо важную роль, так как введение в организм большого количества радиоизотопа оказывается небезразличным для больного. Кроме того, и это очень важно, введение незначительного количества меченых атомов не нарушает нормальной жизнедеятельности организма. Изучение распределения радиоизотопов в живой системе ведется несколькими методами. Если объект невелик по размерам, то используется метод авторадииографии (рис. 107); «заряженный» радиоизотопом объект устанавливается, прижимается к фотопластинке или фотопленке, которая через некоторое время проявляется. Те места объекта, которые содержат большое количество радиоизо-

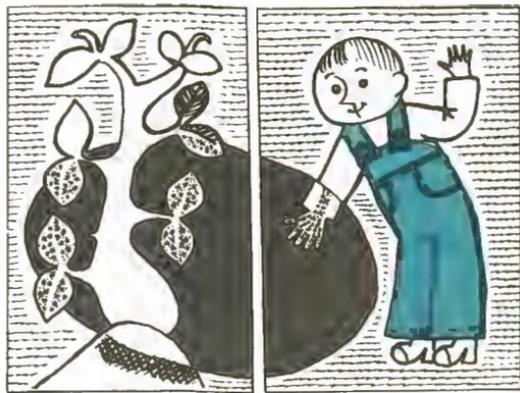
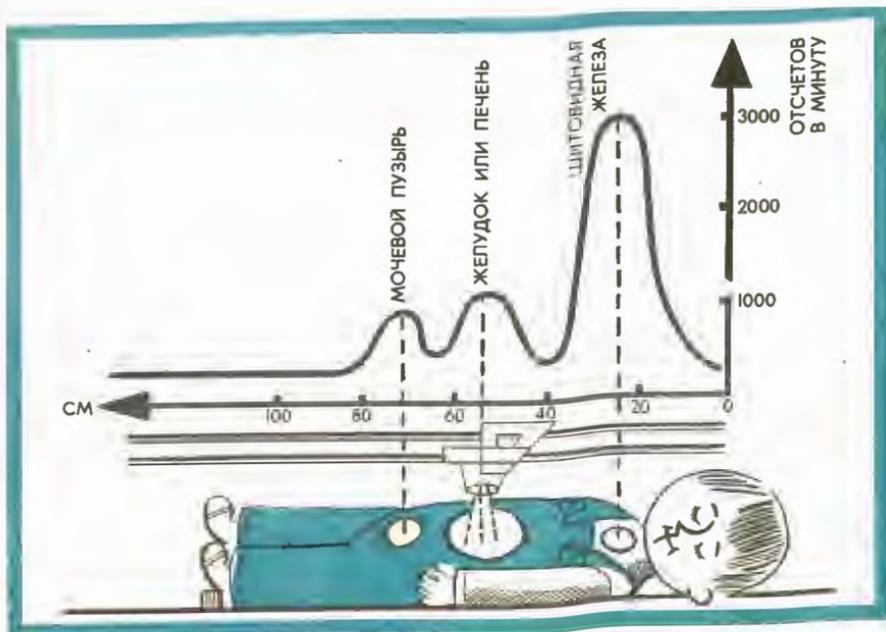


Рис. 107. Авторадииография.

Рис. 108. Схема действия сканера.



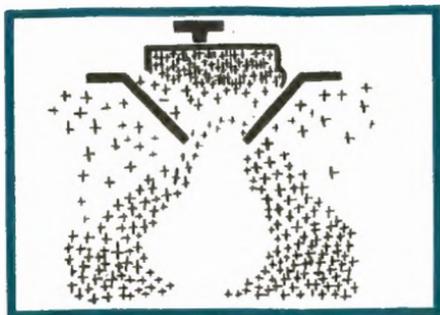


Рис. 109. Сканограмма легких.

фотослой вместе с образцом изучают под микроскопом. При таком совместном рассмотрении образца и микроавторадиограммы локализация изотопа устанавливается с высокой степенью точности.

Для исследования больших объектов, например внутренних органов, применяются специальные автоматические действующие приборы — сканеры. На рис. 108 дана принципиальная схема работы сканера. Главной частью его является гамма-счетчик с коллиматором, которые с постоянной скоростью перемещаются над поверхностью исследуемого органа, последовательно просматривая каждый его участок и фиксируя испускаемое им γ -излучение. Результаты своего исследования сканер выдает в виде сканограммы, т. е. фотопленки, степень почернения которой в разных местах соответствует интенсивности зарегистрированного γ -излучения.

Иногда интенсивность γ -излучения отмечается на обычной бумаге числом штрихов или точек на единицу пути, пройденного счетчиком. Сканограмма дает представление о распределении радиоизотопов в организме. В частности, с ее помощью можно уточнить расположение органа, его размеры и форму, а также выявить места возможных опухолевых поражений. На рис. 109 показана сканограмма легких человека, на которой отчетливо видно накопление радиоактивного йода в метастазах раковой опухоли.

Изучение физиологических процессов с помощью радиоизотопов дает возможность производить исследования в условиях, максимально приближающихся к естественным.

Рассмотрим кратко некоторые результаты, полученные с помощью метода меченых атомов. Прежде всего удалось изучить вопросы обмена веществ в организме, в частности поведение, пути миграции, накопление и т. д. сахара, инсулина, глюкозы; процессы всасывания и усвоения, переваривания жиров, белков, углеводов; сделаны первые шаги на пути выяснения судьбы

топа, вызывают на пленке большую плотность почернения. На рис. 107 показано распределение радия в горхе, питавшемся радиоактивным раствором. Значительно точнее микроавторадиография: срез исследуемого образца в темноте поливают жидкой фотоэмульсией, которую после затвердевания оставляют в контакте со срезом на время, необходимое для экспонирования. Затем проявленный

пищи в организме — «предмет физиологии будущего», по меткому выражению И. П. Павлова. Так, оказалось, что до 30% фосфора в скелете может обновляться за одни сутки, обмен азота завершается в сроки от 3—4 суток до 1—2 недель, кальций в различной степени накапливается в молодых (90%) и старых костях. Метод меченых атомов позволил измерить скорость кровотока, пути перемещения микроэлементов, изучить механизм фотосинтеза, а «меченые» микробы, вирусы, мухи, комары оказались весьма полезными при микробиологических исследованиях в вирусологии и эпидемиологии.

Сколько крови в человеке?

При диагностике сердечно-сосудистых заболеваний очень важно знать общее количество крови в организме, скорость кровотока и объем кровотока в единицу времени. Скорость течения воды в реке можно определить, замеряя расстояние, пройденное, например, листиком, плавающим на воде, за единицу времени.

Аналогично поступают и медики. В вену локтевой части руки вводят 0,2—0,3 мл физиологического раствора, содержащего несколько десятков микроюри радиоактивного изотопа ^{24}Na . Тем самым небольшой объем крови, циркулирующий в организме, оказывается отмеченным радиоактивной «меткой». Эту «метку» хорошо «видно», так как γ -излучение, испускаемое ^{24}Na , легко пронизывает ткани организма и может быть зарегистрировано.

Появляется возможность следить за движением отмеченного объема крови. Обычно это делается с помощью гамма-счетчика, установленного вблизи кисти другой руки или у ноги. Через несколько секунд после инъекции радиоактивного препарата счетчик фиксирует появление радиоактивности. Это кровь принесла сюда радиоактивный препарат, введенный в вену.

Измерения показали, что у взрослого здорового человека среднее время перемещения крови от одной руки до другой равно приблизительно 15 сек; при физической нагрузке — от 10 до 11 сек; при гипертонии III стадии — 18,4 сек. Если расположить счетчик над большим кровеносным сосудом, он зафиксирует появление двух максимумов радиоактивности (с интервалом 40—45 сек). Это время полного кругооборота крови. Через 5 мин после инъекции, когда радиоактивные изотопы равномерно распределяются по всему объему крови, делают анализ крови. Если сравнить полученную концентрацию радиоактивных атомов с их первоначальной концентрацией в физиологическом растворе, то, зная объем введенного раствора, можно вычис-

лить полный объем крови. У взрослого человека он колеблется от 4 до 8 л.

Радиоизотопы дают возможность изучить проницаемость стенок сосудов в норме и при патологических изменениях: известно, что именно в капиллярах происходит обмен веществами между кровью и тканями. Проницаемость сосудов является важнейшей регуляторной функцией организма и существенно изменяется при инфекционных заболеваниях, травмах, ожогах и т. п. и, как следствие, при нарушении обмена веществ. Радиоизотопы дают возможность контролировать процессы проницаемости сосудов. В икроножную мышцу делается инъекция 0,85% раствора NaCl (^{24}Na), затем над местом укола размещается гамма-щуп, и через каждые 2—3 мин производится измерение активности. Наклон кривой активность — время, построенной по данным опыта, характеризует скорость проникновения ^{24}Na из мышечной ткани в кровеносные сосуды.

Органы — коллекционеры

Диагностика многих заболеваний основана на замечательной особенности органов накапливать в своих тканях некоторые химические вещества. Известно, что щитовидная железа накапливает в своих тканях иод, костная ткань — фосфор, кальций и стронций, печень — некоторые красители и т. д.

Радиоизотоп ^{131}I широко применяется для диагностики заболеваний щитовидной железы. Известно, что заболевания щитовидной железы, грубо говоря, связаны либо со снижением ее деятельности (гипофункция), либо с чрезмерным усилением (гиперфункция), а оценка деятельности щитовидной железы на ранних стадиях заболевания весьма затруднительна. Положение существенно упрощается, если применить радиоизотоп ^{131}I . При любых путях введения этого радиоизотопа в организм он избирательно накапливается в щитовидной железе, причем скорость накопления непосредственно зависит от состояния железы.

Более того, радиоизотоп иода может быть использован для определения величины остатка железы после удаления. Этот радиоизотоп применяется и для точной локализации опухолей мозга (рис. 110), обычно это делается методом сканирования. Кроме того, для этой же цели используется и автордиография; в этом случае применяется радиоизотоп тулия. В последнее время для определения расположения опухолей мозга начали применять радиоизотоп ^{32}P ; если использовать датчик счетной установки, сделанный в виде иглы, то можно определить и глубину залегания опухоли.

Применяются также изотопы марганца, меди, мышьяка, а для обнаружения метастазов рака грудной железы — галлий. С по-

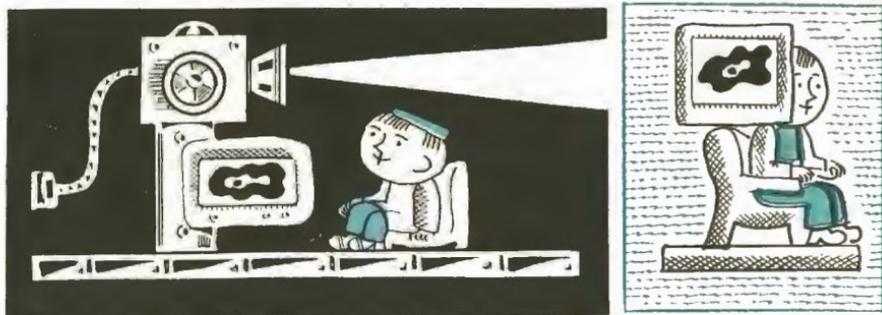


Рис. 110. Схема исследования опухоли мозга.

мощью радиоизотопов железа, кобальта и хрома можно измерить продолжительность жизни эритроцитов. Введение радиоизотопа ^{35}S в лекарственные вещества дает возможность установить пути миграции, проникновения, накопления лекарств, а также скорость и пути их выведения из организма.

С помощью радиоизотопов установлен и такой интересный факт. Оказалось, что к месту перелома сначала устремляется большое количество фосфора, а значительно позже включается кальций; теперь препараты кальция назначаются только через две недели после перелома.

Приведенный нами краткий (и далеко неполный) обзор показывает, что радиоизотопы оказались весьма полезными для целей диагностики и исследований.

«Бескровная хирургия»

Радиационная терапия злокачественных образований, несомненно, должна быть поставлена на первое место в лечебном использовании радиоизотопов. Основой радиотерапии опухолей является резкое отличие в радиобиологической чувствительности нормальных и раковых клеток. Опухоль развивается, ее клетки постоянно делятся, а в состоянии митоза клетка особенно чувствительна к действию радиации. Поэтому при облучении больного раковые клетки разрушаются значительно интенсивнее здоровых. Чем злокачественнее опухоль, тем быстрее она растет, тем чаще возникают митозы, тем выше радиобиологическая чувствительность. С чисто физической точки зрения это явление объясняется тем, что молодые клетки содержат относительно большое количество воды, активно взаимодействующей с излучением.

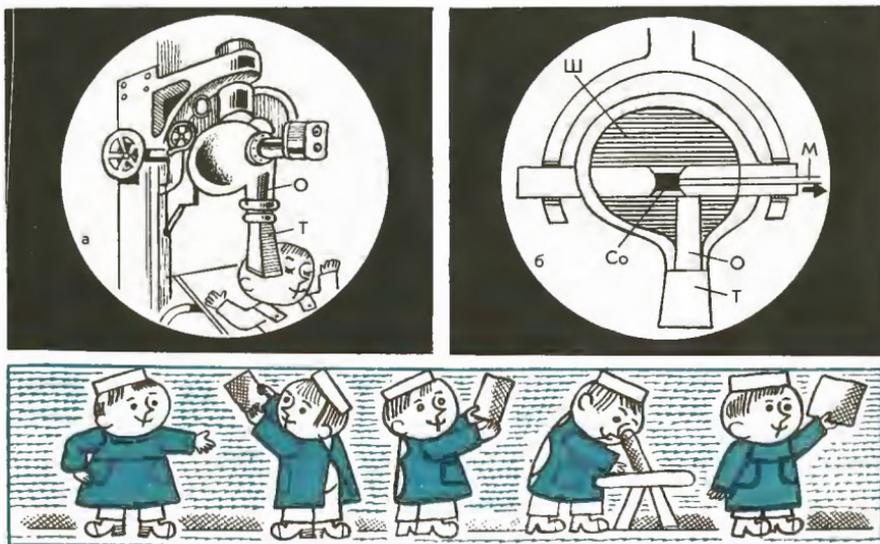
После того как было открыто и освоено в промышленных масштабах производство радиоизотопов, ведущее место в лучевой терапии занял радиоизотоп ^{60}Co , в значительной степени вытеснивший радий и мезоторий, неудобные по ряду причин — смешанное излучение, широкий спектр частот, требующий фильтровки, и т. д.

Изотоп ^{60}Co очень удобен, обладает сравнительно большим периодом полураспада — 5,3 года, относительно дешев, дает однородный спектр γ -излучения и β -частиц малой энергии, легко поглощаемых фильтром из никеля.

В настоящее время в клиниках широко используются установки ГУТ-СО-1200, «Луч» и др. С их помощью можно осуществлять терапию опухолей, расположенных на глубине до 15 см от поверхности кожи. В такой установке радиоактивный кобальт располагают в облучателе, который называется кобальтовой пушкой или гамма-пушкой. На рис. 111 показан внешний вид облучателя (а) и его разрез (б). Радиоактивный кобальт Co хранится в свинцовом шаре Ш, укрепленном на подставке, дающей возможность направлять тубус на облучаемое поле. С помощью стержня М, соединенного с радиоактивным веществом, последнее можно передвигать вдоль паза внутри шара.

Только на время облучения кобальт ставят против отверстия О основания тубуса Т. Эта операция осуществляется дистанционно.

Рис. 111. Схема кобальтовой пушки.



Радиоизотопы фосфор-32 и стронций-90 успешно применяются при лечении некоторых кожных и глазных заболеваний — капиллярных ангиом, экземы, псориаза, раковых и предраковых поражений кожи. Для этого пропитанную раствором радиоизотопа и затем высушенную фильтровальную бумагу в целлофановом конверте прикладывают к пораженному участку. Так как все перечисленные радиоизотопы являются α -излучателями, то вследствие малой длины пробега α -частиц здоровые ткани при таком методе лечения почти не повреждаются.

Мы говорили о радиоизотопе иод-131; он оказался пригодным и для терапии раковых заболеваний щитовидной железы. Вообще этот изотоп буквально создан для радиотерапии — он быстро теряет активность (период полураспада 8,1 суток), избирательно накапливается в щитовидной железе, излучает β -электроны, достаточно жесткие для воздействия на ткань самой железы, но еще слишком мягкие, чтобы поражать окружающие ткани. Иод-131 оказывает терапевтическое действие и при других заболеваниях щитовидной железы (гипертиреоз, диффузный зоб). Поскольку терапевтическая доза значительно превосходит диагностическую, рассмотренные выше свойства радиоиода оказываются особенно ценными.

Менее пригоден радиоизотоп фосфор-32 ($T=14,3$ суток, более жесткое излучение), однако и он применяется при лечении эритремии, если другие средства оказываются малоэффективными. Фосфор 32 избирательно накапливается в костной ткани и оказывает подавляющее действие на размножение эритроцитов, тем самым подавляется и развитие болезни (избыток красных кровяных телец). Радиофосфор применяется и при лечении хронического лейкоза (белокровие).

Радиоизотоп золото-198 в виде коллоидного раствора вводится непосредственно в опухоль. Так как благородный металл не обладает химическим действием на ткани, то золото не рассасывается, и процесс β -, γ -облучения идет непрерывно, пока сохраняется активность препарата. Лучевые поражения при этом не успевают возникнуть вследствие малого периода полураспада ($T=2,7$ суток).

Отметим в заключение, что ионизирующие излучения способны вызывать появления мутаций — новых наследственных признаков организма. Это явление, открытое Г. А. Надсоном и Г. С. Филлиповым, может быть использовано для искусственного отбора, направленного изменения наследственных признаков. Так появилась новая наука — радиационная генетика, которая получила практическое применение в фармакологии (культивирование плесени и грибов, используемых при производстве антибиотиков).

Ниже приводится таблица, в которой указаны широко применяемые в медицине искусственные радиоактивные изотопы.

Элемент	Обозначение изотопа	Вид излу- чения	Период полу- распада	Область применения
Углерод	$^{14}_6\text{C}$	$^0_{-1}e$	5500 лет	Обмен веществ
»	$^{11}_6\text{C}$	$^0_{+1}e$	20 мин	»
Азот	$^{13}_7\text{N}$	$^0_{+1}e$	10 мин	»
Кислород	$^{15}_8\text{O}$	$^0_{+1}e$	2 мин	Окислитель- ные процессы
Натрий	$^{24}_{11}\text{Na}$	$^0_{-1}e, \gamma$	15 часов	Обмен ве- ществ, опре- деление ско- рости кровотока
Фосфор	$^{32}_{15}\text{P}$	$^0_{-1}e$	14 дней	Обмен ве- ществ, тера- пия болезней крови
Сера	$^{35}_{16}\text{S}$	$^0_{-1}e$	87 дней	Обмен веществ
Кальций	$^{45}_{20}\text{Ca}$	$^0_{-1}e$	150 дней	»
Железо	$^{59}_{26}\text{Fe}$	$^0_{-1}e, \gamma$	45 дней	»
Кобальт	$^{60}_{27}\text{Co}$	$^0_{-1}e, \gamma$	5,3 года	Терапия зло- качественных образований
Иод	$^{131}_{53}\text{I}$	$^0_{-1}e, \gamma$	8 дней	Диагностика заболеваний щитовидной железы
Золото	$^{198}_{79}\text{Au}$	$^0_{-1}e, \gamma$	2,7 дней	Терапия зло- качественных образований

РАДИАЦИОННЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА И КОСМИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Земля подвергается действию радиационных излучений

Солнце — громадный источник энергии. На Землю поступает лишь одна двухмиллиардная ее часть. От Солнца мы получаем свет и тепло. Кроме того, оно излучает рентгеновские, ультрафиолетовые и инфракрасные лучи, радиоволны. От Солнца летят также потоки заряженных частиц.

В космическом пространстве присутствуют частицы практически любых энергий. Это в основном протоны и электроны, а также (в значительно меньших количествах) ядра атомов различных элементов. Их удобно разделить на четыре группы.

Галактические космические лучи — это потоки протонов, ядер и электронов высоких энергий, которые проникают в солнечную систему из Галактики.

Солнечные космические лучи — потоки протонов и электронов с энергиями в диапазоне 10^5 — 10^{10} электронвольт. Они рождаются на Солнце главным образом во время солнечных вспышек и заполняют солнечную систему до орбиты Марса. Солнечный ветер — это потоки межпланетной плазмы, истекающей во все стороны от Солнца. Кинетическая энергия частиц солнечного ветра около 10^3 электронвольт.

Захваченная радиация — это частицы, в основном протоны и электроны, захваченные магнитными полями планет, — так называемые радиационные пояса планет.

До поверхности Земли доходят далеко не все виды этих излучений. Ее надежно защищает от вредных излучений воздушная «обшивка» — атмосфера. Атмосфера нашей планеты пропускает лишь видимый участок спектра, небольшую часть ультрафиолетовых, инфракрасных лучей и радиоволны длиной от 3 мм до 3 м. Не долетают до поверхности Земли и «осколки» атомов. Исключение составляют лишь нейтрино.

Биосфера Земли и здоровье людей находится в несомненной связи с радиационными излучениями. Особо остановимся на влиянии солнечных излучений.

Энергия Солнца и появление жизни на Земле

Значение солнечной энергии для возникновения и развития жизни на Земле переоценить невозможно. Прежде всего без солнечной энергии оказалось бы невозможным существование растительности на Земле — важнейшего условия, способствующего

щего развитию высокоорганизованных существ и обеспечивающего организмы пищей. Основной биофизический и биохимический процесс в растениях — фотосинтез — происходит под действием солнечной энергии, в частности под действием ультрафиолетовой радиации.

Согласно А. И. Опарину, процесс зарождения жизни на Земле состоит из трех основных этапов.

Первый этап: возникновение органических веществ, из которых построены тела растений, микроорганизмов, животных, прежде всего углеводов. Решение этой задачи связано со значительными трудностями, так как углеводороды образуются обычно биогенно, с помощью самих организмов, в процессе фотосинтеза. Фотосинтез происходит, как мы видели, под действием солнечной радиации.

Второй этап: из углеводов образуются сложные органические соединения, составляющие материал для построения живой клетки, — белки, нуклеиновые кислоты и т. д. Этот процесс сейчас успешно воспроизведен в биологических лабораториях, причем одни ученые использовали в качестве «катализатора» электрическую искру, а другие решили ту же задачу с помощью излучения Солнца, что дает возможность с точки зрения биолога оценить значение квантов излучения. Возможно, что кванты солнечного излучения определенным образом катализируют химические процессы. Эти проблемы решает радиационная химия.

Третий этап: образование живых существ. Непосредственное участие солнечной радиации на этом этапе пока не установлено, хотя совершенно очевидно, что солнечная энергия играет решающую роль в создании условий, необходимых для возникновения живых организмов.

Солнце и живые организмы

Интенсивность солнечного излучения не всегда одинакова. В некоторые годы Солнце спокойно, а в другие его активность значительно возрастает. Наиболее наглядным признаком повышенной активности являются солнечные пятна, а самым мощным ее проявлением — солнечные вспышки. Для уровня солнечной активности характерны циклические изменения со средним периодом в 11 лет. За этот период активность Солнца изменяется от минимальной до максимальной. На 1968 год приходился максимум солнечной активности. Следующий максимум ожидается в 1979 году.

Циклические изменения активности Солнца передаются Земле, ее биосфере, всему, что живет, движется, дышит, размножает-

ся и греется в солнечных лучах. Однако заметить влияние солнечной активности на живые существа удалось сравнительно недавно. Летописи и сохранившиеся до наших дней древние рукописи свидетельствуют о том, что массовые налеты вредных насекомых, эпидемические заболевания человека, животных, растений происходили строго периодически.

Еще 50 лет назад А. Л. Чижевский, изучив все случаи крупных эпидемий и пандемий чумы, начиная с 430 года до нашей эры и кончая 1899 годом, отметил совпадение во времени между активностью Солнца и вспышками болезни. Вспышки размножения саранчи в XX веке, как и в предыдущих веках, происходили удивительно регулярно, в среднем через каждые 11 лет. Русский ученый Ф. Н. Шведов описал одиннадцатилетние ритмы толщины годовых колец некоторых видов деревьев. Изучая срезы деревьев, он показал, что толщина годовых колец четко отражает колебания солнечного цикла.

Собран большой статистический материал о повторяемости заболеваний. Так, грипп «наступает» в годы максимумов солнечной активности, дифтерия и ящур,— наоборот, в годы малой активности Солнца.

По данным одного из старейших советских гематологов Н. А. Шульца, в годы максимума и минимума солнечной активности средний уровень лейкоцитов в крови неодинаков. Причем наибольшие перепады отмечаются в северных широтах, где изменения солнечной активности сказываются сильнее. Это понятно: ведь магнитное поле Земли относит основную массу заряженных частиц (под действием силы Лоренца $F = v \times q$) к полюсам.

Н. А. Шульц показал, что возрастание солнечной активности приводит к уменьшению в крови лейкоцитов и росту числа лимфоцитов. Аналогичные изменения в составе крови наблюдаются после радиоактивного или ядерного облучения. В период активного Солнца резко возрастает число сердечно-сосудистых заболеваний, в том числе и инфарктов миокарда, резко ухудшается состояние больных ревматизмом.

У врачей есть все основания особенно тревожиться за больных, когда Солнце неспокойно. Задачи гелиобиологии многогранны. Это и составление прогнозов солнечной активности, которые помогали бы врачам в лечении больных и профилактике различных осложнений, и защита человека, поднявшегося в космос, от опасных излучений и др.

Конечно, эти сведения о роли солнечной и космической радиации не являются полными, но и они показывают их громадное влияние на живые организмы Земли.

ПАТЕНТНОЕ БЮРО ПРИРОДЫ

Кладовая мудрости — природа

Мы не перестаем и никогда не перестанем восхищаться творениями живой природы. У пауков мы найдем гидравлический привод, у земляной осы — отбойный молоток, у летучей мыши — ультразвуковой локатор, у кальмара — реактивный двигатель. У мегулики, выюна, пиявок внимательные исследователи заметят точный барометр, у медузы — предсказатель штормов. Запахоанализатор, способный различать более 500 000 запахов, взят на вооружение обыкновенной дворняжкой. Мы найдем счетчик Гейгера у улитки, гиротрон у мухи, поляризационный солнечный компас у пчелы, указатель скорости движений у жука, опреснитель морской воды в клюве альбатроса, высокочувствительный сейсмограф у водяного жука и кузнечика. Список можно продолжать еще и еще.

Живая природа — гениальный конструктор, великий зодчий и строитель. Миллионы лет она отработывала и совершенствовала свои творения. Все эти — «биоинженерные системы» природы функционируют очень точно, надежно и экономично, отличаются исключительной целесообразностью и гармоничностью действия, способностью реагировать на мельчайшие изменения многочисленных факторов внешней среды, запоминать и учитывать эти изменения, отвечать на них многообразными приспособительными реакциями.

Естественно, что человек не мог пройти мимо этих замечательных «изобретений» природы. На стыке трех наук: биологии, математики и техники — родилась новая наука — бионика.

День рождения бионики

Формально рождение бионики состоялось в Дайтоне (США) 13—15 сентября 1960 года на I национальном конгрессе по бионике. На этом симпозиуме присутствовало 700 ученых различ-

ных специальностей: биологов, физиологов, математиков, физиков, инженеров и др. Здесь официально была принята и эмблема бионики: скальпель и паяльник, соединенные знаком интеграла (рис. 112). Скальпель — символ биологии, паяльник — техники, интеграл — символ математики и объединения этих отраслей знания. Тут же был принят и девиз бионики: «Живые прототипы — ключ к новой технике».

Люди в той или иной мере подражали действиям животных задолго до рождения бионики. Древние орудия по конструкции в значительной степени походили на органы животных. Демокрит писал: «От животных путем подражания мы научились важнейшим делам, а именно, мы ученики паука в ткацком и портняжном ремеслах, мы ученики ласточек — в построении жилищ и певчих птиц — в пении. Природа сама научает нас сельскому хозяйству...»

Это стремление подражать творчеству живой природы, ее биологическим системам нашло свое яркое выражение уже в первых орудиях труда, созданных человеком на заре его трудовой деятельности. Так, археологи утверждают, что форма режущего элемента топора — острого камня — напоминает естественный зуб медведя. Изучение хрусталика глаза в процессе хирургических операций натолкнуло врачей древности на мысль об использовании линз, изготовленных из хрусталя или стекла, для увеличения изображения.

«Создание линзы — отмечал Джон Бернал — является первой попыткой расширить сенсорный аппарат человека... Линза стала прототипом телескопа, микроскопа... и других оптических приборов позднейшего времени. Если бы арабские врачи создали только оптику и ничего больше, то и в этом случае они внесли бы важнейший вклад в науку».

Великий русский ученый Н. Е. Жуковский, анализируя полет птиц, открыл «тайну крыла», разработал методику расчета подъемной силы крыла. Его работа «О парении птиц» лежит в основе современной аэродинамики.

Таких примеров можно привести очень много. Человек учится у природы ее целесообразности. Особенно сильно это проявляется в настоящее время — в период технической революции.

Мертвые модели живых процессов

Биология издавна пользуется искусственными моделями для изучения различных органов. Например, простейшей моделью кровеносного сосуда служит резиновая трубка. Пульсацию крове-



Рис. 112. Эмблема бионики.

носных сосудов под действием проходящего по ним тока крови на резиновой модели воспроизвел академик Н. Е. Жуковский. Грубыми моделями глаза служат фотоаппарат и фотоэлемент, а уха — микрофон.

Моделью безусловного рефлекса является электрическая цепь, состоящая из лампочки, батареи и ключа. Моделью условного рефлекса может служить сосуд с жидкостью, в которой растет кристалл. Если в сосуд опущены электроды, через жидкость идет ток. Пока кристалл маленький, проходит слабый ток, но когда он вырастает и замыкает электроды, сила тока увеличивается. Еще в 1920 году англичанин Лилли создал металлическую модель нерва. Он погрузил железную проволоку в азотную кислоту, отчего наружная поверхность проволоки покрылась окисью железа. Когда же он прикасался к этой проволоке кусочком цинка, по ней шел гальванический ток, волнообразно распространяясь по проволоке, наподобие биотоков в нерве. Оказалось, что специальный провод, состоящий из изолированной проволоки разной толщины, служит хорошей моделью нерва.

Член-корреспондент Академии медицинских наук Б. В. Огнев, кандидат технических наук Е. Ф. Гудов, Н. М. Мельникова и Б. И. Жиров проделали успешные опыты по протезированию нерва. Если вырезать небольшой участок седалищного нерва у собаки, наступает паралич ног, возникают трофические язвы и собака гибнет. До того как произвести иссечение нерва, исследователи обнажали его и вводили в толщу нерва тончайшие проволочки различной длины, т. е. параллельно нерву ставили дугу из проволоки. Через несколько недель, когда концы проволочек вживались в нерв, кусочек нерва между ними иссекали. Как только заживала рана, собака свободно передвигалась, паралича не наступало. Металлический нерв почти полностью заменял настоящий.

Как человек «изобретал велосипед»

В развитии боники было немало случаев, когда инженеры в своих технических разработках выдвигали идеи, заложенные в живых организмах, не подозревая этого.

Инженеры независимо от биологов разработали и реализовали принцип радиолокации еще перед второй мировой войной. Сущность идеи радиолокации состоит в том, что узкий луч радиоволн посылается антенной радиолокатора в пространство. Если на его пути не встречаются препятствия, луч уходит и не возвращается назад. Но, натолкнувшись на цель (например, на самолет), он отразится и к антенне радиолокатора вернется на большую часть энергии радиоволны. Передатчик радиолокатора



Рис. 113. Схема действия радиолокатора летучей мыши.

излучает радиоволны короткими, но мощными импульсами через строго определенные паузы. В паузу к локатору успевает вернуться импульс, отраженный от цели, оказавшийся у него на пути. Измерив время между началом посылки импульса и моментом прихода отраженного, легко измерить расстояние до объекта.

Создателям этого прибора не приходило в голову, что многие технические задачи, с которыми приходилось сталкиваться во время работы над радиолокационными станциями, уже «решены» природой миллионы лет назад. Таким локатором вооружены летучие мыши (рис. 113). Об этом не знали ни зоологи, ни физиологи. Зоологи только знали, что летучие мыши отлично ориентируются в полной темноте. Объяснить это явление удалось только после второй мировой войны английскому ученому Дональду Гриффину. Основываясь на идеях локации и используя точные электронные приборы, он выяснил, что у летучих мышей имеются поразительные по своему совершенству органы эхолокации. Издавая ультразвуковые импульсы, летучие мыши хорошо ориентируются в обстановке в радиусе около 6 м.

Длительное время бичом авиации был флаттер — внезапно возникающие на определенной скорости вибрации крыльев, которые приводили к тому, что самые точные конструкции самолетов разваливались в воздухе за несколько секунд. После многочисленных аварий выход был найден: крылья стали делать с утолщением на конце. И уже потом нашли точно такие утолщения (птеростигмы) на концах крыльев стрекозы.

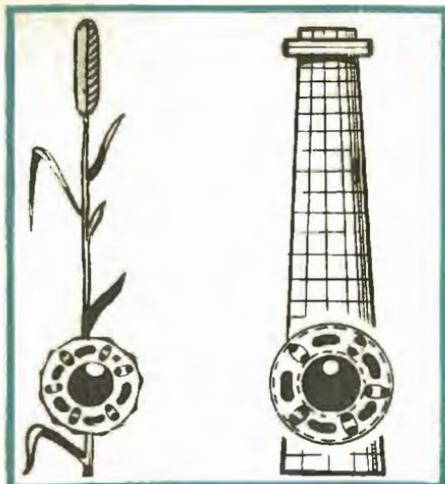


Рис. 114. Сечение стебля и фабричной трубы.

Не менее интересный сюрприз приподнес инженерам и пухонос — растение из семейства осоковых. Оказывается, одно из самых последних достижений инженерной мысли — высотная фабричная дымовая труба удивительно сходна по конструкции со стеблями пухоноса: обе конструкции полые, вдоль стенок обеих конструкций находятся овальные вертикальные пустоты (рис. 114). Роль спиральной арматуры, размещенной у внешней стороны трубы, в стебле пухоноса играет тонкая кожица.

Такое удивительное сходство конструктивных решений инженеров и природы в случаях с Эйфелевой башней, флаттером и фабричной дымовой трубой — не случайность. Труба и пухонос, например, находятся под действием однотипных

статических и динамических нагрузок: собственного веса, ветра и т. д. Решения человека и природы оказались едиными. Природа и техника строят по одним и тем же законам, ищут для создаваемых систем оптимальные конструктивные решения. Только человек приходит к решению проблемы силой разума, а природа — долгим путем естественного отбора.

Патенты, подаренные природой

Создавая новые самолеты, корабли, подводные лодки, конструкторы придают им обтекаемые формы, скопированные с лучших пловцов животного мира: китов, дельфинов, тунцов (рис. 115).

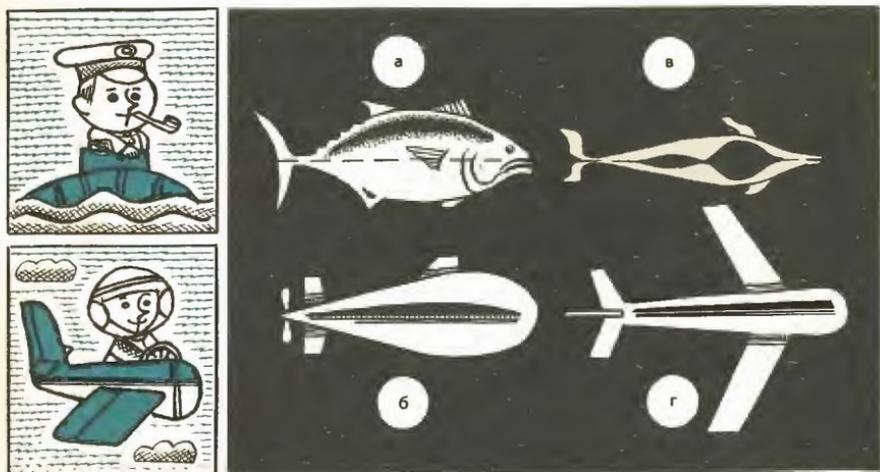
Особенный интерес у ученых вызывают органы чувств животных. Прежде всего остановимся на гиротроне — приборе, реагирующем на угловое отклонение. У насекомых жужжальца во время полета колеблются в определенной плоскости и служат органом равновесия (рис. 116, а). На том же принципе, что и жужжальца насекомых, работает гиротрон (рис. 116, б),—

прибор, применяемый вместо гироскопа в скоростных самолетах и ракетах. Вибратор стремится сохранить неизменной плоскость колебаний ножек 1. В стойке 2 при повороте оснований 3 возникает закручивающий момент, по величине которого измеряется угол поворота.

Создан измеритель земной скорости для самолетов, в конструкции которого использованы некоторые принципы, заложенные в строении глаза насекомых. Передвигающийся предмет последовательно воспринимается рядом ячеек глаза насекомого (рис. 117, а) о м а т и д и я м и. По разности времени появления изображения в ячейках насекомое оценивает скорость перемещения предмета. В измерителях скорости самолета использован тот же принцип. Оптические приборы, лежащие у основания двух трубок (рис. 117, б), из которых одна направлена под некоторым углом, а вторая — вертикально, принимают последовательно сигналы от одного и того же ориентира, находящегося на поверхности Земли по курсу самолета. Счетно-решающее устройство по разности времени приема и известной высоте H определяет скорость самолета.

Мы уже говорили о том, что у медузы (рис. 118,а) имеются органы, которые принимают инфразвуки, поэтому она за несколько часов чувствует приближение шторма. Для предсказания шторма создано искусственное «ухо медузы» (рис. 118,б). Прибор состоит из рупора, улавливающего инфразвуковые волны, которые возникают в районе шторма, устройств, усиливающих принятые колебания (резонатор P , пьезоэлектрический преоб-

Рис. 115. Контуры тунца [а] и подводной лодки [б], китовидного дельфина [в] и самолета [г].



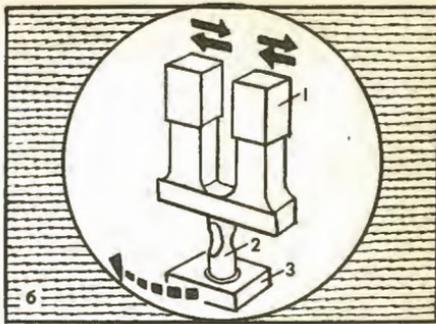
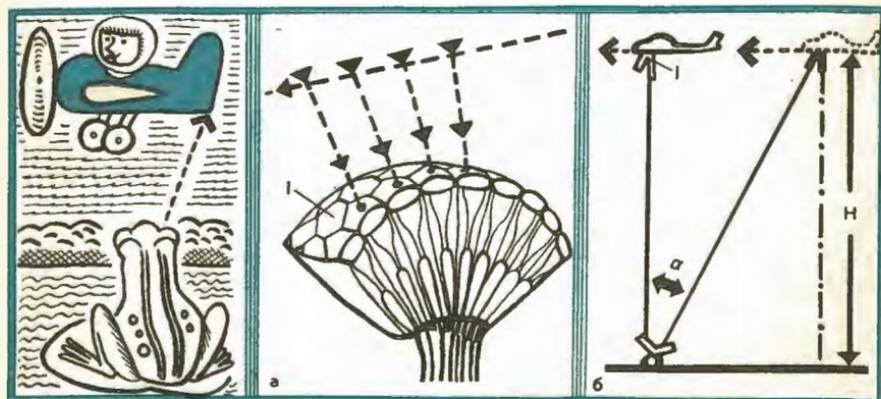


Рис. 116. Жужжальца насекомых [а] и гироскоп [б].

разователь Pr , усилитель $У$) и индикатора $И$, указывающего силу шторма. Прибор позволяет предсказать шторм за сутки и более до его прихода в данный район.

Глаз лягушки обладает ярко выраженной способностью воспринимать небольшие предметы, перемещающиеся в его поле зрения (рис. 119,а). Такая способность помогает лягушке добывать пищу — ловить насекомых. В бионической схеме «обнаружителя насекомых» (рис. 119, б), свет падает сверху на группу из семи фотоэлементов. Сигналы шести из них, расположенных по периферии, подаются на возбуждающий вход искусственного нейрона H (нервной клетки), а сигнал центрального фотоэлемента — на тормозной вход. Схема настроена так, что при равномерном освещении всех фотоэлементов сигнал на выходе нейрона равен нулю. Если движущийся предмет $П$ дает тень, которая закроет один из периферических фотоэлементов, то

Рис. 117. Глаз насекомого [а] и определение скорости самолета [б].



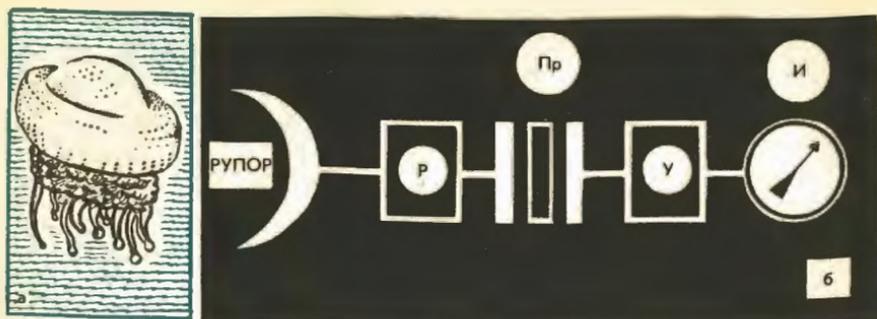
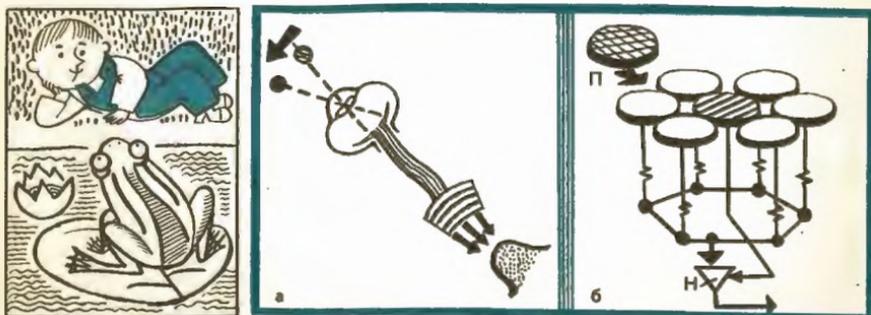


Рис. 118. Медуза [а] и «ухо медузы» [б].

сигнал на выходе будет отрицательным; если затем предмет закроет центральный элемент, сигнал будет положительным. Такое устройство можно применять в схемах, обеспечивающих центрирование.

Мы уже упоминали о создании искусственного нейрона. Приведем схему одной из простейших моделей нейрона (рис. 120). Основной частью схемы является одновибратор, собранный на двух транзисторах T_2 и T_3 типа $n-p-n$. В устойчивом состоянии транзистор T_2 заперт отрицательным напряжением, подаваемым на его базу с сопротивлением R_6 . Значением этого напряжения определяется пороговая величина срабатывания модели нейрона. Пока транзистор T_2 заперт, T_3 находится в открытом состоянии. При этом потенциал коллектора транзистора T_2 (точка А) равен напряжению питания $+20$ в, а коллектор транзистора T_3 (точка б) находится под низким положи-

Рис. 119. Глаз лягушки [а] и схема, обеспечивающая центрирование [б].



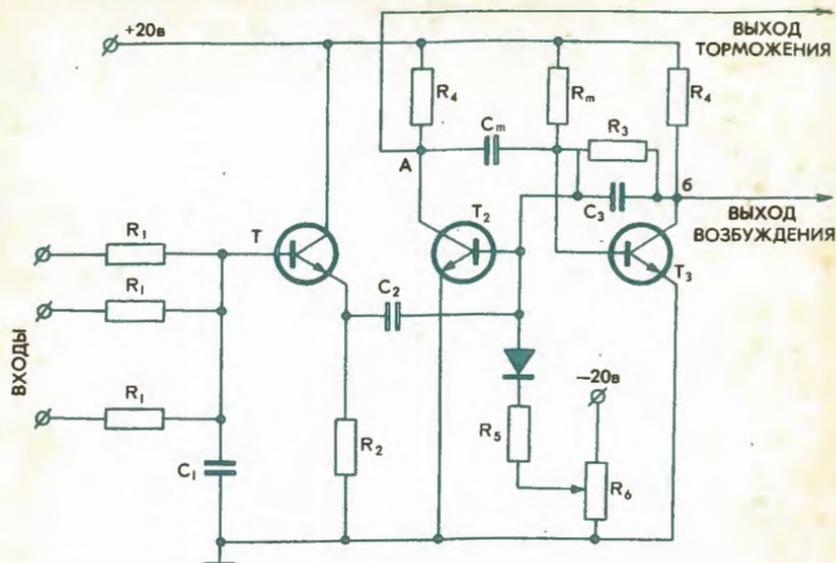


Рис. 120. Простейшая схема нейрона.

тельным потенциалом, обусловленным падением напряжения на сопротивлении нагрузки R_4 . При срабатывании мультивибратора, когда происходит запирающее и открывающее T_2 , потенциал точки A скачком понижается, а потенциал точки B возрастает. В результате на выход возбуждения выдается положительный импульс напряжения, а на выход торможения — отрицательный. Длительность последнего определяется значением сопротивления R_m и емкости конденсатора C_m .

На входы модели нейрона подаются импульсы с фиксированной амплитудой и длительностью 1 мсек, случайно распределенные во времени. На выходах схемы при ее срабатывании появляется стандартный импульс длительностью 1 мсек напряжением 15 в. Предельная частота срабатывания равна 500 гц. Эта схема хорошо моделирует основные характеристики биологического нейрона, но она не обладает свойством адаптации, т. е. автоматическим изменением порога срабатывания в зависимости от величины входных сигналов.

Мозг человека содержит около 15 миллиардов нейронов, тогда как самая сложная электронная машина содержит несколько десятков тысяч ламп. Нужно совершенно четко представлять себе, что даже одно только увеличение числа основных структурных элементов неизбежно ведет к колоссальному качественному отличию мозга от кибернетических машин. И хотя «быстродействие» мозга соответствует 500—1000 импульсам в секунду,

а в машинах их может быть в тысячи раз больше, машина не может идти ни в какое сравнение с мозгом по способности к логическому анализу, по объему запоминаемой информации, по способности к «узнаванию» тех или иных объектов. Здесь превосходство мозга неоспоримо.

ЧТО ЖЕ ДАЛЬШЕ!

Вот вы и ознакомились с этой книгой. Что же дальше? Дальше нужно читать специальную литературу по вопросам, которые вас заинтересовали. Ведь в этой книге на многие вопросы мы не ответили, а скорее лишь поставили эти вопросы и наметили ответы на них. В конечном итоге вы можете сделать своей профессией поиск ответа на один из этих вопросов и посвятить ему всю свою жизнь. Желаем вам успеха в этом интересном и полезном труде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- | | |
|--------------------|--|
| АГАДЖАНЯН Н. А. | Человек, атмосфера и солнце. М., «Знание», 1968. |
| АКИМУШКИН И. | Занимательная биология, М., «Молодая гвардия», 1970. |
| АЛЕКСЕЕВА С. П. | Шум. М., Изд-во АН СССР, 1948. |
| АНФИЛОВ Г. | Физика и музыка. М., Детгиз, 1962. |
| БЕЙЛИ Н. | Математика в биологии и медицине. М., «Мир», 1970. |
| БЕЛМАН Р. | Кибернетика и медицинская диагностика. М., «Знание», 1968. |
| БЕЛЯЕВ П. И. | Человек вышел в космическое пространство. М., «Знание», 1966. |
| ВОДОЛАЗСКИЙ Л. А. | Ультразвук в медицине. М., «Знание», 1972. |
| ВОДОЛАЗСКИЙ Л. А. | Организм рассказывает. М., «Знание», 1962. |
| ГИЛЬБО И. С. | Знаете ли вы себя? М., «Медицина», 1969. |
| ДАНИЛОВА Н. А. | Природа и наше здоровье. М., «Мысль», 1971. |
| ЗАЛМАНОВ А. С. | Тайная мудрость организма. М., «Знание», 1966. |
| ЗВЕРЕВ И. Д. | Книга для чтения по анатомии и физиологии человека. М., «Просвещение», 1972. |
| ИВАНОВ К. П. | Биоэнергетика и температурный гомеостазис. М., «Наука», 1972. |
| КАЗМЕР Л. П. и др. | Бионика. М., «Энергия», 1968. |
| КОКОДОВ Ю. А. | Человек в магнитной паутине. М., «Знание», 1972. |
| ЛИВЕНЦЕВ Н. М. | Физика. Учебники для мединституттов. |

ЛИТНИЦКИЙ И. Б.
МЕРКУЛОВ А.
МОДЕЛЯНОВСКИЙ А. Н.
Журнал «Наука и жизнь»
НИКОЛАЕВ В. Р., ОБЫСОВ А. С.
НИКОЛЬСКИЙ И. Д.
ОГНЕВ Б. В., НОВИНСКИЙ Г. Д.
ПАРИН В. В.
ПЕКЕЛИС В.
РОЗЕНШУК Л. С.
САПАРИНА Е.
СЕНТ-ДЬЕРДЛ А.
СЕРБАНТ Ю. В. и ТРОЯНСКИЙ М. П.
СЕРБАНТ Ю. В. и ТРОЯНСКИЙ М. П.
СЕРГЕЕВ Б. Ф.
ТАРЬЯН И.
Журнал «Техника—молодежи».
ЧЕРНОВ А.
ШАРП М.

На пути к бионике. М., «Просвещение», 1972.
Раскрывая тайны природы. М., «Московский рабочий», 1972.
Биологическое управление. М., «Знание», 1970.
Резервы организма человека. М., «Медицина», 1972.
Биоакустика на службе прогресса. М., «Знание», 1973.
Медицина и физика. М., «Знание», 1962.
О вероятном и невероятном. М., «Знание», 1968.
Кибернетическая смесь. М., «Знание», 1970.
Рентгеновы лучи в медицине. М., «Знание», 1973.
Кибернетика внутри нас. М., «Молодая гвардия», 1962.
Биоэлектроника. М., «Мир», 1971.
Радиоволны и живой организм. М., «Знание», 1969.
Лазеры и живая ткань. М., «Знание», 1972.
Занимательная физиология. М., «Молодая гвардия», 1970.
Физика для врачей и биологов. Бу-
дапешт, 1969.
Гомо акватикус. М., «Молодая гвар-
дия», 1968.
Человек в космосе. М., «Мир», 1971.

Евгений Александрович Безденежных,
Инна Семеновна Брикман

ФИЗИКА В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ И МЕДИЦИНЕ

Редактор А. Н. Карнаух. Литредактор Г. В. Саноцкая. Художественный редак-
тор В. Б. Лопарев. Обложка художника В. Н. Игнатова. Технический редактор
А. Г. Фридман. Корректор Н. П. Васенина.

Сдано в набор 18.XII 1975 г. Подписано к печати 4/VIII 1976 г. Формат
60X90¹/₁₆. Бумага офсетная. Условн. печ. лист. 12,5. Уч.-изд. лист. 12
Тираж 45 000. БФ 13977. Издательство «Радянська школа» Государственного
комитета Совета Министров Украинской ССР по делам издательств, поли-
графии и книжной торговли, Киев, ул. Юрия Коцюбинского, 5.
Темплан 1976 г. Изд. № 24252. Цена 51 коп. Зак. № 8.

Областная книжная типография Днепропетровского областного управления
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
320070, Днепропетровск, ул. Серова, 7.
