

Майер В.В.
Вараксина Е.И.

**Физика упругих
волн в
учебных
исследованиях**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 535
ББК 22.34
М 14

Майер В. В., Вараксина Е. И. **Физика упругих волн: учебные исследования.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 328 с. — ISBN 978-5-9221-0800-3. (Библиотека учителя и школьника.)

Книга содержит описания учебных исследований, относящихся к физике упругих волн, которые рекомендуются для самостоятельного выполнения учащимися старших классов. Предлагаются приборы для получения звука высокой частоты и ультразвука низкой. Подробно рассмотрены физические явления линейной и нелинейной ультраакустики, практическое применение ультразвука. Все опыты доступны и могут быть поставлены в школьном физическом кабинете или в домашних условиях. Проводя небольшие экспериментальные исследования, читатель познакомится с интересными и практически важными явлениями физики упругих волн, приобретет навыки самостоятельной работы.

Для преподавателей физики средней и высшей школы, руководителей физических и технических кружков, а также лиц, занимающихся самообразованием.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	10
Глава 1. Упругие волны	
1.1. Упругие волны в природе, технике, медицине.	13
1.1.1. Частотные диапазоны упругих волн (13). 1.1.2. Инфразвуковые волны (14). 1.1.3. Звук (15). 1.1.4. Ультразвук (16). 1.1.5. Гиперзвук (21).	
1.2. Механические источники упругих волн.	21
1.2.1. Колебания стержня (22). 1.2.2. Автоколебания стержня (22). 1.2.3. Губной свисток (26). 1.2.4. Газоструйные и гидродинамические излучатели (27). 1.2.5. Акустическая сирена (28).	
1.3. Термические источники упругих волн	29
1.3.1. Электроразрядные излучатели (29). 1.3.2. Тепловой автогенератор звука (30). 1.3.3. Элементарная теория теплового автогенератора (32). 1.3.4. Обратная связь в тепловом автогенераторе (34).	
1.4. Электромеханические преобразователи упругих волн.	35
1.4.1. Электростатические преобразователи (36). 1.4.2. Электромагнитные преобразователи (36). 1.4.3. Электродинамические преобразователи (37). 1.4.4. Пьезоэлектрические преобразователи (37). 1.4.5. Магнитострикционные преобразователи (39).	
Глава 2. Гармонические упругие волны	
2.1. Гармоническая упругая волна	40
2.1.1. Гармонические колебания и их характеристики (40). 2.1.2. Поперечные и продольные упругие волны (41). 2.1.3. Уравнение гармонической волны (43). 2.1.4. Фазовая скорость волны (45). 2.1.5. Физическая модель бегущей гармонической волны (46). 2.1.6. Компьютерная модель бегущей гармонической волны (49).	
2.2. Величины, характеризующие упругую волну	52
2.2.1. Смещение, скорость и ускорение в гармонической волне (52). 2.2.2. Давление в гармонической волне (53). 2.2.3. Деформация в гармонической волне (54). 2.2.4. Энергия волны (55). 2.2.5. Интенсивность волны (58). 2.2.6. Волновое сопротивление среды (58). 2.2.7. Затухание волны (59).	
2.3. Экспериментальное исследование упругой волны в воздухе	60
2.3.1. Доказательство волновой природы звука (60). 2.3.2. Осциллограмма звуковой волны (61). 2.3.3. Индикатор интенсивности звука (63). 2.3.4. Индикация фазы	

звуковой волны (64). 2.3.5. Экспериментальная установка (64). 2.3.6. Экспериментальное обоснование существования гармонической звуковой волны (66).

Глава 3. Магнитострикционный излучатель упругой волны

- 3.1. Прямой магнитострикционный эффект. 70
 - 3.1.1. Явление магнитострикции (70). 3.1.2. Наблюдение прямого магнитострикционного эффекта (72). 3.1.3. Исследование прямого магнитострикционного эффекта методом поворота иглы (75). 3.1.4. Количественное исследование магнитострикции (77). 3.1.5. Использование прямого магнитострикционного эффекта для получения упругой волны (78).
- 3.2. Обратный магнитострикционный эффект. 79
 - 3.2.1. Обнаружение обратного магнитострикционного эффекта (79). 3.2.2. Осциллограмма упругих колебаний стержня (80).
- 3.3. Магнитострикционный излучатель ультразвука низкой частоты. 81
 - 3.3.1. Промышленные магнитострикционные излучатели (81). 3.3.2. Подмагничивание вибратора магнитострикционного излучателя (82). 3.3.3. Ферритовый вибратор магнитострикционного излучателя (84). 3.3.4. Конструкция учебного излучателя (85). 3.3.5. Технология изготовления излучателя (86). 3.3.6. Магнитострикционный излучатель низкой частоты для школьного физического кабинета (88). 3.3.7. Проверка излучателя в работе (89). 3.3.8. Подмагничивание вибратора постоянным током (90).

Глава 4. Электронные генераторы для получения упругих волн

- 4.1. Элементы электронного генератора на транзисторах. 92
 - 4.1.1. Колебательный контур (92). 4.1.2. Автоколебательная система (93). 4.1.3. Транзистор в качестве ключа (94). 4.1.4. Транзисторные усилители (95). 4.1.5. Обратная связь (96).
- 4.2. Мощный ультразвуковой генератор. 98
 - 4.2.1. Принципиальная схема ультразвукового генератора (98). 4.2.2. Изготовление ультразвукового генератора (99). 4.2.3. Налаживание ультразвукового генератора (100).
- 4.3. Учебный ультразвуковой генератор. 101
 - 4.3.1. Принцип действия учебного генератора (101). 4.3.2. Конструкция ультразвукового генератора (102). 4.3.3. Технология изготовления прибора (103). 4.3.4. Налаживание и проверка генератора в работе (105).

4.4. Получение ультразвука средней частоты	106
4.4.1. Частотный диапазон ультразвукового генератора (106). 4.4.2. Ультразвуковой генератор средней частоты (107). 4.4.3. Магнитострикционные излучатели ультразвука на частоту до 50 кГц (108). 4.4.4. Магнитострикционные излучатели ультразвука средней частоты (108).	
Глава 5. Исследование магнитострикционного излучателя	
5.1. Собственные колебания стержня	111
5.1.1. Возбуждение колебаний стержня ударом (111). 5.1.2. Стоячая волна в стержне (113). 5.1.3. Собственные частоты стержня (115).	
5.2. Резонансное возбуждение вибратора магнитострикционного излучателя	116
5.2.1. Явление резонанса (116). 5.2.2. Стоячая волна в вибраторе (117). 5.2.3. Механические напряжения в вибраторе (119). 5.2.4. Почему второй торец вибратора должен быть сухим?(120).	
5.3. Упругие характеристики материала вибратора	121
5.3.1. Скорость импульса сжатия в твердом стержне (121). 5.3.2. Экспериментальное определение упругих характеристик материала вибратора (122).	
5.4. Амплитуда колебаний вибратора	124
5.4.1. Шарик, скачущий на вибраторе (125). 5.4.2. Оценка амплитуды колебаний вибратора по высоте подскока стального шарика (125). 5.4.3. Экспериментальная оценка амплитуды колебаний вибратора (128). 5.4.4. Оценка амплитуды колебаний вибратора посредством ультразвукового движителя (129). 5.4.5. Измерение амплитуды колебаний вибратора с помощью микроскопа (131). 5.4.6. Оценка амплитуды колебаний вибратора по значению усталостной прочности (133).	
5.5. Излучение упругой волны колеблющимся вибратором	137
5.5.1. Вынужденные колебания и резонанс (137). 5.5.2. Добротность колебательной системы (140). 5.5.3. Энергия колебаний вибратора (142). 5.5.4. Излучение упругой волны (143).	
Глава 6. Линейные и нелинейные акустические явления	
6.1. Нелинейные эффекты	145
6.1.1. Линейная акустика (145). 6.1.2. Нелинейная акустика (146). 6.1.3. Нелинейное взаимодействие упругих волн (146). 6.1.4. Искажение формы ультразвуковой волны (147). 6.1.5. Нелинейное поглощение упругих волн (149).	
6.2. Абсолютное измерение интенсивности	149

6.2.1. Измерения колебательной скорости и интенсивности (150).	
6.2.2. Качественное исследование диска Рэлея (151).	
6.2.3. Стоячая волна в воздухе и диск Рэлея (153).	
6.3. Ориентирующее действие ультразвука	154
6.3.1. Диск Рэлея в жидкости (154).	
6.3.2. Ориентация взвешенных в жидкости чешуек (154).	
6.3.3. Акустический контакт (156).	
6.3.4. Просветление мутной жидкости (156).	
6.4. Акустический ветер.	157
6.4.1. Ультразвуковой ветер в воздухе (158).	
6.4.2. Ультразвуковой ветер в жидкости (158).	
6.4.3. Зависимость ультразвукового ветра от частоты (160).	
6.4.4. Качественное объяснение ультразвукового ветра (160).	
6.5. Силы, действующие на тела в поле упругой волны.	161
6.5.1. Притяжение предмета к вибратору излучателя (161).	
6.5.2. Взаимодействие тел в ультразвуковом поле (162).	
Глава 7. Давление упругих волн	
7.1. Радиационное давление упругой волны	165
7.1.1. Радиационное давление волны (165).	
7.1.2. Элементарная теория радиационного давления (166).	
7.1.3. Обнаружение радиационного давления (167).	
7.2. Ультразвуковые радиометры.	168
7.2.1. Радиационное давление в газе (169).	
7.2.2. Исключение влияния ультразвукового ветра (169).	
7.2.3. Радиационное давление в жидкости (170).	
7.2.4. Простейший радиометр (172).	
7.2.5. Радиационное давление в трубке (174).	
7.3. Ультразвуковой фонтан	175
7.3.1. Ультразвуковой фонтан (175).	
7.3.2. Гигантский ультразвуковой фонтан на низкой частоте (176).	
7.3.3. Отражение и прохождение волны на границе раздела сред (177).	
7.3.4. Ультразвуковой фонтан на границе раздела жидкостей (178).	
7.3.5. Ультразвуковой фонтан «наоборот» (179).	
7.3.6. Ультразвуковые фонтаны на высоких частотах (180).	
Глава 8. Стоячая ультразвуковая волна в воздухе	
8.1. Метод Кундта визуализации стоячей волны.	183
8.1.1. Опыты Кундта (183).	
8.1.2. Действие ультразвука на легкий сыпучий порошок (185).	
8.1.3. Визуализация стоячей ультразвуковой волны методом Кундта (186).	
8.1.4. Распределение порошка в стоячей волне (187).	
8.1.5. Модулированная стоячая волна в трубке Кундта (189).	
8.2. Измерение скорости звука в воздухе и в газах.	190
8.2.1. Измерение скорости ультразвука (190).	
8.2.2. Исследование зависимости скорости звука от частоты (191).	
8.2.3. Наблюдение влияния ультразвукового ветра (192).	

8.2.4. Отражение звука от твердого плоского отражателя (192).	
8.2.5. Отражение звука от открытого конца трубки Кундта (193).	
8.3. Визуализация стоячей волны в воздухе слоем жидкости . . .	195
8.3.1. Распределение жидкости в поле стоячей волны (195).	
8.3.2. Демонстрация стоячей волны, визуализированной жидкостью (195).	
8.3.3. Оптический метод измерения расстояний между пучностями стоячей волны (198).	
8.3.4. Перегородки из жидкости в трубке Кундта (199).	
Глава 9. Стоячая ультразвуковая волна в жидкости	
9.1. Визуализация стоячей волны методом ориентации взвешенных в жидкости частиц	201
9.1.1. Стоячая волна в стеклянной трубке (201).	
9.1.2. Особенности эксперимента (202).	
9.1.3. Демонстрационный вариант эксперимента (202).	
9.1.4. Измерение скорости ультразвука (204).	
9.1.5. Стоячая волна в стеклянной пробирке (204).	
9.2. Визуализация стоячей волны методом коагуляции взвешенных в жидкости частиц	208
9.2.1. Визуализация стоячей волны суспензией крахмала в воде (208).	
9.2.2. Области коагуляции суспензии крахмала в воде (209).	
9.2.3. Визуализация стоячей волны эмульсией керосина в воде (209).	
9.2.4. Зависимость коагуляции взвешенных в жидкости частиц от их плотности (211).	
9.2.5. Измерение скорости звука в воде (212).	
9.2.6. Акустический волновод (212).	
9.3. Ультразвуковой интерферометр	213
9.3.1. Модель ультразвукового интерферометра (213).	
9.3.2. Воздействие стоячей волны на работу излучателя (215).	
9.3.3. Схема компенсации (216).	
9.3.4. Работа с ультразвуковым интерферометром (217).	
9.3.5. Мостовая схема компенсации (219).	
9.3.6. Зависимость скорости звука в жидкости от частоты (221).	
Глава 10. Упругая волна в пластинке	
10.1. Упругие волны в твердом теле	222
10.1.1. Виды деформаций в упругих средах (222).	
10.1.2. Продольная волна в твердом теле (223).	
10.1.3. Поперечная волна в твердом теле (224).	
10.1.4. Поверхностные волны в твердых телах (225).	
10.1.5. Упругая волна в твердой пластинке (225).	
10.1.6. Изгибная волна в твердой пластинке (225).	
10.2. Фигуры Хладни	226
10.2.1. Фигуры Хладни на изотропной круглой пластинке (227).	
10.2.2. Фигуры Хладни на анизотропной круглой пластинке (228).	
10.2.3. Фигуры Хладни на пластинках произвольной формы (230).	

10.3. Дисперсия изгибных волн	230
10.3.1. Явление дисперсии изгибных волн (231).	
10.3.2. Экспериментальное исследование дисперсии изгибных волн (231).	
10.4. Поверхности равных фаз изгибных волн	233
10.4.1. Волны на бумаге (233).	
10.4.2. Цикл научного познания (234).	
10.4.3. Учебная физическая теория (236).	
10.4.4. Учебный физический эксперимент (240).	
10.5. Стоячая волна в стеклянном сосуде	243
10.5.1. Стоячая волна в стеклянном стакане (244).	
10.5.2. Стоячая волна в стенках стеклянной колбы (245).	
Глава 11. Интерференция и другие волновые явления	
11.1. Интерференция изгибных волн	248
11.1.1. Интерференция волн от двух реальных источников (249).	
11.1.2. Интерференция круговых волн (250).	
11.1.3. Экспериментальное обоснование теории интерференции круговых волн (253).	
11.1.4. Интерференция при отражении от прямого края листа (254).	
11.1.5. Количественное подтверждение теории (255).	
11.2. Интерференция при отражении волны от круглого края пластинки	258
11.2.1. Интерференция при отражении от выпуклого и вогнутого краев листа (258).	
11.3. Фокусировка волны.	262
11.3.1. Получение действительного изображения в круглом крае (262).	
11.3.2. Отражение от эллиптической поверхности (263).	
11.3.3. Отражение от параболической поверхности (266).	
11.4. Некоторые волновые явления.	268
11.4.1. Преломление изгибной волны (268).	
11.4.2. Рассеяние волны (269).	
11.4.3. Распространение волны в волноводе (270).	
Глава 12. Ультразвуковая кавитация	
12.1. Физическая сущность ультразвуковой кавитации	271
12.1.1. Получение кавитационной полости (271).	
12.1.2. Гидродинамический удар (272).	
12.1.3. Наблюдение ультразвуковой кавитации (273).	
12.1.4. Разрушающее действие ультразвуковой кавитации (275).	
12.1.5. Причина ультразвуковой кавитации (276).	
12.2. Звукокапиллярный эффект	277
12.2.1. Аномальное поднятие жидкости в капилляре (277).	
12.2.2. Экспериментальное исследование звукокапиллярного эффекта (278).	
12.2.3. Элементарная теория звукокапиллярного эффекта (279).	
12.2.4. Экспериментальная проверка следствий теоретической модели (280).	

12.3. Явление сонолюминесценции.	282
12.3.1. Обнаружение сонолюминесценции (283). 12.3.2. Способы наблюдения сонолюминесценции (283). 12.3.3. Зависимость сонолюминесценции глицерина от температуры (284).	
Глава 13. Практическое применение ультразвука	
13.1. Максимальная интенсивность ультразвука от ферритового вибратора	286
13.1.1. Предельная интенсивность ультразвука (286). 13.1.2. Ультразвуковой концентратор (288).	
13.2. Ультразвуковое диспергирование	289
13.2.1. Образование аэрозолей (289). 13.2.2. Причина ультразвукового распыления жидкостей (291). 13.2.3. Образование горючей смеси (292). 13.2.4. Использование ультразвука для получения эмульсий (293). 13.2.5. Образование суспензий (295).	
13.3. Ультразвуковая коагуляция	296
13.3.1. Ультразвуковая коагуляция гидрозолей (296). 13.3.2. Ультразвуковая дегазация (298).	
13.4. Ультразвуковая очистка.	300
13.4.1. Использование ультразвука для очистки (300). 13.4.2. Экспериментальное исследование ультразвуковой очистки (301).	
13.5. Использование ультразвука в электрохимии	303
13.5.1. Воздействие ультразвука на электролиз (303). 13.5.2. Дегазация электролита (304). 13.5.3. Электролитическое осаждение металла (304).	
13.6. Ультразвуковая пайка	307
13.6.1. Залуживание и пайка алюминия (307). 13.6.2. Залуживание стекла и керамики (308).	
13.7. Обработка твердых и хрупких материалов	310
13.7.1. Ультразвуковой сверлильный станок (310). 13.7.2. Модель ультразвукового сверлильного станка (311). 13.7.3. Ультразвуковое сверление стекла (314).	
13.8. Ультразвуковая сварка.	315
13.8.1. Ультразвуковой сварочный станок (316). 13.8.2. Экспериментальное исследование ультразвуковой сварки (317).	
13.9. Использование ультразвука в металлургии	318
13.9.1. Влияние ультразвука на кристаллизацию (319). 13.9.2. Исследование кристаллизации под действием ультразвука (319).	
13.10. Применение ультразвука в медицине	320
Закключение.	322
Список литературы	323

Предисловие

Излучение, которое испускают Солнце, звезды, осветительные приборы и пр. и благодаря которому мы видим весь окружающий нас мир; сигналы, переносящие теле- и радиопередачи, осуществляющие беспроводную телефонную и компьютерную связь; звуки, которые нас окружают: пение, свист, шелест, скрип, звон, шорох, стук; возмущения, распространяющиеся по поверхности воды при движении судна или при падении в воду камня; передвижение разрушительных колебаний в земной коре, к которым приводят подземные перемещения, — все это волны!

Электромагнитная волна представляет собой процесс распространения в пространстве переменных электрического и магнитного полей, которые взаимно порождают друг друга. Скорость электромагнитной волны огромна и предельна для реальных физических процессов. Электромагнитную природу имеют свет, радиоволны, рентгеновское излучение. С ними связано множество интересных явлений: радуга, мираж, венцы вокруг Луны или фонарей в туманную погоду, голубой цвет неба, интерференционная окраска тонких пленок, радиоизлучение космических объектов, проникновение рентгеновского излучения через непрозрачные тела и т. д.

Для распространения электромагнитных волн не требуется никакой среды. В отличие от них для распространения механических упругих волн необходима среда: газообразная, жидкая или твердая.

Упругие волны, которые непосредственно воспринимаются нашим органом слуха, называются *звуковыми*. Однако в наших экспериментальных исследованиях мы будем использовать в основном ультразвуковые упругие волны, частота которых несколько превышает верхний порог слышимости человека.

В конце XIX века о существовании ультразвуковых волн могли разве лишь догадываться наиболее проникательные исследователи. Но уже опыты П. Н. Лебедева (1910 г.), а затем и П. Ланжевена (1918 г.) показали большое научное и практическое значение ультразвука. С тех пор ультраакустика развивается удивительно быстрыми темпами, так что многие явления, бывшие всего полвека назад предметом специальных исследований ученых, в настоящее время широко используются в самых различных областях науки и техники.

Современный школьник просто не может не знать хотя бы простейших свойств ультразвука. И дело здесь не только в той роли, которую ультразвук играет в науке и технике. Гораздо важнее то, что ультразвуковые колебания и волны позволяют достаточно глубоко изучить общие черты всякого колебательного и волнового процесса, а это уже позволяет, в известной степени, понять дух современной физики.

Ультраакустика интересна еще и тем, что многие эксперименты, которые несколько десятков лет назад ставили ученые, используя сложную научную аппаратуру, в настоящее время можно воспроизвести на простых приборах у себя дома или в школьном физическом кабинете. Таким образом, каждый из вас имеет возможность развить в себе элементарные навыки творческой работы физика-экспериментатора. Важность этого не требует особых пояснений. Достаточно отметить, что ни на уроках физики, ни на занятиях разнообразных кружков вы, как правило, не можете полностью овладеть навыками физического эксперимента.

В книге, которую вы держите в своих руках, описаны простые приборы, обеспечивающие получение упругих волн в диапазоне частот от 15 до 150 кГц, и рассмотрены учебные исследования явлений, относящихся к физике упругих волн. Рекомендуемые приборы и установки настолько просты, что любой из вас, кто умеет обращаться с обычными инструментами и материалами, может изготовить их буквально за считанные дни.

Несколько иначе дело обстоит с опытами. Во-первых, описания части опытов даны в расчете на то, что вы сможете использовать оборудование, имеющееся в школьном физическом кабинете. Этого требует логика изложения материала, и поэтому не будет большой беды, если такие опыты будут поставлены позднее, после изготовления самодельных приборов.

Во-вторых, — и это существенно — поставить опыт, вообще говоря, сложнее, чем изготовить какой-либо прибор. Вначале может показаться, что главное — это сделать ультразвуковой генератор. Конечно, без генератора невозможно поставить ни один опыт с ультразвуком. Однако успешное изготовление этого прибора является лишь началом работы. Вы очень скоро почувствуете сказанное, перейдя от простейших опытов к тем, которые немного посложнее.

Чтобы несколько облегчить экспериментальную работу, авторы стремились изложить условия опытов как можно точнее. Но каждый из вас будет действовать в конкретных ситуациях, все многообразие которых предусмотреть просто невозможно. Поэтому почти наверняка можно утверждать, что с первого раза многие из опытов у вас могут и не получиться.

Возможно, это и к лучшему, так как позволит вам остаться один на один с физическим явлением, почувствовать себя экспериментатором, проводящим настоящее исследование. Смелее экспериментируйте! Учитесь преодолевать все трудности на своем пути, и вы познаете ни с чем не сравнимое чувство общения с самой Природой.

Будет очень хорошо, если вы заведете себе тетрадь, в которую самым тщательным образом станете заносить условия и результаты каждого опыта. Это отучит вас от беспорядочного «экспериментирования». Вы почувствуете, как с каждым новым опытом растет ваше знание предмета. Вы сумеете планировать дальнейший эксперимент, предугадывать его результаты, сопоставлять и анализировать опыты. Вы поймете причины многих ваших ошибок и неудач. Одним словом, вы с лихвой окупите то время, которое потратите на записи.

Экспериментальные исследования лучше всего начать с изготовления низкочастотного магнитострикционного излучателя и одного из электронных генераторов для его возбуждения. После этого, листая книгу, нужно выбирать те явления, которые вызывают наибольший интерес, и исследовать именно их. В этом вам помогут многочисленные иллюстрации, по которым можно быстро составить представление о характере предлагаемых учебных исследований.

В заключение следует отметить, что на возможности магнитострикционных излучателей с ферритовыми вибраторами обратил внимание одного из авторов А. Р. Геннинг. В экспериментальной работе большую помощь оказали Е. С. Агафонова, Р. В. Акатов, Ф. Ф. Вавилова, Л. С. Кропачева, Р. В. Майер, Н. В. Назаров, А. С. Рудин, Р. Е. Шафир, В. Г. Хохловкин. Более трехсот студентов нескольких педагогических вузов проверили выполнимость предлагаемых в книге учебных исследований. Многие учителя физики вместе со школьниками повторили описанные ниже приборы и опыты. Всем им, без чьего труда и доброжелательной поддержки было бы невозможно написание книги, авторы выражают свою глубокую благодарность.

Глава 1

УПРУГИЕ ВОЛНЫ

Человек живет в мире упругих волн. Некоторые из них он слышит, другие — вообще не воспринимает органом слуха. Но и слышимые, и неслышимые упругие волны играют важную роль в жизни человека. Мы начнем с того, что разберемся, что такое упругие волны, выясним, какие упругие волны бывают в природе, познакомимся с тем, как они используются в различных областях деятельности человека, и затем кратко рассмотрим наиболее значимые методы получения упругих волн.

1.1. Упругие волны в природе, технике, медицине

Существующие в природе упругие волны различаются в первую очередь по частоте и интенсивности. Здесь вы познакомитесь с физическими особенностями и использованием на практике упругих волн разных частотных диапазонов и различных интенсивностей. Особое внимание будет уделено волнам ультразвукового диапазона, поскольку именно они получили наиболее широкое практическое применение и представляют для вас наибольший интерес.

1.1.1. Частотные диапазоны упругих волн. Любая волна — это распространение возмущения в той или иной среде, при котором происходит перенос энергии, а не вещества.

Механические волны подразделяют в зависимости от того, какие силы восстанавливают невозмущенное состояние среды. *Механические волны на поверхности жидкости* бывают двух видов: *гравитационные*, то есть такие, в которых равновесие после возмущения поверхности жидкости восстанавливается силой тяжести, и *капиллярные* — в них равновесие восстанавливают силы поверхностного натяжения. В механической *упругой волне* равновесие после возмущения среды восстанавливается упругими силами, которые возникают в среде при распространении сжатий и разрежений.

Упругие волны иначе называют *звуковыми*: это название подчеркивает, что хотя слышимый человеком звук занимает сравнительно узкий диапазон частот, физическая сущность упругих волн едина. Упругие волны делят по частоте: до 20 Гц — *инфра-*



ШУЛЕЙКИН Василий Владимирович (1895–1979). Советский геофизик. Основные труды посвящены теории взаимодействия Мирового океана, атмосферы и материков, теории ветровых волн, морских течений, тропических ураганов. Исследовал акустику моря. Изучил явление, получившее название голоса моря, и показал, что оно вызывается инфразвуковыми упругими волнами, распространяющимися над морской водой в воздухе. Один из основоположников советской школы физики моря.

звуковые, от 20 до $20 \cdot 10^3$ Гц — *звуковые* в узком смысле этого слова или *слышимый звук*, от $20 \cdot 10^3$ до 10^9 Гц — *ультразвуковые* и выше (до 10^{12} — 10^{13} Гц) — *гиперзвуковые* волны.

1.1.2. Инфразвуковые волны. Чаще всего инфразвуковые колебания возникают при разбивании потоков воздуха различными препятствиями, за счет взаимодействия ветра с морскими волнами, электрических разрядов, взрывов, смещений земной коры.

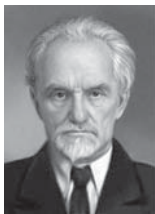
Низкочастотные инфразвуковые упругие волны естественного происхождения были обнаружены и исследованы в нашей стране в 20-х годах прошлого века. Мощные инфразвуковые колебания появлялись на берегу моря перед штормом. Выяснилось, что причиной этого «голоса моря» является ураган.

Исследованиями инфразвуковых волн занимались советские ученые В. В. Шулейкин и В. А. Березкин, Н. Н. Андреев, Л. М. Бреховских, французский исследователь Гавро, американский физик Роберт Вуд.

Человеческие органы слуха не воспринимают инфразвуки. Однако инфразвук может оказывать весьма заметное действие на организм. Известны случаи, когда «голос моря» приводил к гибели или бесследному исчезновению целых экипажей кораблей.

Исследования физиологического действия инфразвука показали, что волны большой интенсивности вызывают у живых организмов чувство беспокойства и страха. Действие мощных инфразвуковых колебаний приводит не только к возникновению негативных эмоций, но и может стать причиной плохого самочувствия, болезненных ощущений в организме. Особенно опасными являются волны частоты порядка 7 Гц, которые, как установлено Гавро, при большой интенсивности могут быть смертельны. Инфразвук приводит к нарушению зрения и равновесия организма.

Объясняется такое действие инфразвука резонансом: при совпадении частоты инфразвуковой волны с основной собственной частотой колебаний внутреннего органа, вследствие резонанса



АНДРЕЕВ Николай Николаевич (1880–1970). Советский физик. Основные исследования выполнены в области гидроакустики, архитектурной, биологической и нелинейной акустики. Теоретически исследовал распространение звука в движущихся средах и вдоль поглощающих поверхностей, акустические фильтры, звуковые волны конечной амплитуды, спектры затухающих колебаний, колебания кристаллических и анизотропных сред, явления нелинейной акустики, проблемы реверберации звука и звукоизоляции. Создал школу физической и технической акустики.

резко увеличивается амплитуда колебаний этого органа. Интенсивные вибрации жизненно важных органов приводят к болезненному состоянию, а иногда и к гибели самого организма.

Инфразвуковые волны возникают не только в результате природных явлений. Их источниками являются также многие виды транспорта: грузовые и легковые автомобили, движущиеся с большой скоростью, самолеты, вертолеты, ракеты и т. п.

Знание условий возбуждения и свойств инфразвука обеспечило его практическое применение. Например, в медицине маломощные инфразвуковые колебания используются для удаления из организма человека камней, которые образуются при ряде заболеваний. Регистрация инфразвуковых волн является одним из надежных методов прогнозирования землетрясений, цунами, ураганов и других природных бедствий, поскольку инфразвук распространяется в атмосфере, океане и земной коре с большой скоростью. Существуют и совершенно неожиданные применения инфразвука: так, создан инфразвуковой измеритель объема, используемый в затруднительных для других методов условиях.

1.1.3. Звук. Из упругих волн разных частотных диапазонов звук играет первостепенную роль в нашей повседневной жизни, являясь средством общения, передачи информации и т. п. Значимость звука для человека трудно переоценить: специальные исследования показали, что по слуховому каналу в мозг человека может поступать такой же объем информации, как и по зрительному.

Наука о звуке называется *акустикой*. Помимо общих вопросов получения и распространения звука, акустика изучает много интересных проблем, связанных со звуком. Музыкальная акустика рассматривает музыкальные звуки. Акустика помещений (архитектурная акустика) исследует особенности распространения звуковых волн в помещениях, имеющих различные размеры, форму, акустические свойства стен и мебели. Гидроакустика и атмосферная акустика изучают звуковые волны в гидросфере



БРЕХОВСКИХ Леонид Максимович (р. 1917). Советский физик. Исследовал акустические явления, распространение звуковых и электромагнитных волн в слоистых и неоднородных средах, изучил волновые поля точечных источников в слоисто-неоднородных средах, открыл сверхдальнее распространение звука в море. Создал научную школу физической акустики океана.

и атмосфере. Предметом изучения физиологической акустики являются органы речи и слуха человека. Биологическая акустика рассматривает действие звука на живые организмы, использование звука животными. Электроакустика занимается проблемами получения, передачи и приема звука электрическими приборами. Физическая акустика, тесно связанная с ультраакустикой, исследует непосредственно звуковые колебания и волны.

Мы не будем здесь подробно останавливаться на свойствах этого вида упругих волн, так как физика звука — весьма обширная область науки, которая должна служить темой отдельного разговора. Кроме того, вся книга посвящена экспериментальным исследованиям упругих волн, непосредственно примыкающих по частоте к слышимому диапазону, то есть на протяжении всей книги вы фактически будете исследовать самые интересные физические свойства звуковых волн.

1.1.4. Ультразвук. Несмотря на то, что ультразвуковые волны неслышимы (а может быть, именно благодаря этому!), они имеют большое практическое значение. Поэтому рассмотрим их здесь несколько более подробно, основное внимание уделив ультразвуку в природных условиях.

Ультразвук в природе. В конце XVIII века итальянский ученый Л. Спалланцани, изучая поведение летучих мышей, обнаружил их способность ориентироваться в темноте. Он заметил, что без зрения летучие мыши летают и охотятся так же хорошо, как и имея его. Ученый доказал, что обоняние, вкус, осязание не причастны к этому, а уверенный полет обеспечивает слух мышей. Если он закрывал мышам рот или уши, они становились совершенно беспомощными. Тем самым он подтвердил невозможность ориентировки мышей с закрытыми ушами, впервые установленную швейцарским биологом Ш. Жюрином. Спалланцани не дал объяснения наблюдавшемуся явлению. Полученные в этой области им и другими учеными результаты были отвергнуты, поскольку в то время биологи придерживались тактильной теории, согласно которой ориентация происходит посредством осязания,

а о существовании неслышимого человеком ультразвука никто и не предполагал.

Впервые гипотеза об использовании летучими мышами механизма ультразвуковой эхолокации была выдвинута уже в начале XX века.

Позднее было обнаружено, что летучие мыши действительно пользуются *ультразвуковыми импульсами* (рис. 1.1). Они испускают их во время полета и улавливают отраженные различными препятствиями волны. Исследования показали, что голосовые связки мышей устроены таким образом, что способны издавать звуки высокой частоты и ультразвуки. Воздействием ультразвука на слуховой аппарат летучей мыши было доказано, что он чувствителен к ультразвуку.

Сейчас особенности излучения и приема ультразвука разными видами летучих мышей детально изучены. Голосовыми связками летучая мышь может испускать ультразвуковые импульсы различной формы, продолжительности и частоты. Мыши имеют сложный слуховой аппарат, который позволяет им определять скорость движения объекта, его объемные характеристики. По времени возвращения отправленного сигнала после его отражения они определяют расстояния до различных предметов. Разрешающая способность эхолокации некоторых видов летучих мышей довольно значительна. Каждый зверек легко может отличить «свой» отраженный сигнал от множества других, одновременно распространяющихся в воздухе.

Слышат ультразвук также бабочки, на которых охотятся летучие мыши. При облучении ультразвуком они прекращают движение или улетают. Бабочки отличаются еще и тем, что их покров плохо отражает ультразвуковые волны. Для восприятия ультразвука они имеют специальные органы, называемые тимпональными. Реакция бабочек на ультразвук в настоящее время также хорошо изучена. Для успешной охоты ввиду указанных особенностей бабочек некоторые виды летучих мышей пользуются особой тактикой: они перестают излучать ультразвук, когда обнаруживают добычу и тем самым дезориентируют ее.

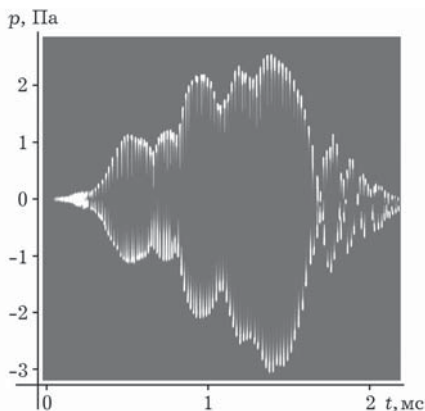


Рис. 1.1. Импульс упругой волны, испускаемой летучей мышью



ВУД Роберт Уильямс (1868–1955). Американский физик-экспериментатор. Основные труды, посвященные физической оптике, заложили основу теории атомных и молекулярных спектров. Впервые изготовил стеклянный светофильтр, непрозрачный для видимого света и пропускающий ультрафиолетовые лучи. Разработал методы ультрафиолетовой и инфракрасной фотографии. Усовершенствовал дифракционную решетку. Создал мощный ультразвуковой генератор и исследовал физические, химические и биологические действия ультразвука большой интенсивности.

Кроме бабочек многие насекомые используют ультразвук: сверчки в слышимом диапазоне издают звуки с частотами 8, 11 и 16 кГц, в ультразвуковом — 24 и 32 кГц, саранча реагирует на ультразвук частотой 90 кГц, цикады слышат ультразвук частотой 40 кГц, медоносные пчелы при роении и обнаружении пищи издают звуковые волны частотой 20–22 кГц.

Морские животные испускают и воспринимают ультразвук. Ракообразные некоторых видов, а именно креветки, издают звук частотой 2–24 кГц при захлопывании клешни. Звук для животных, обитающих в воде — очень важный источник информации о внешнем мире.

Широко используют звуковые волны практически все китообразные: киты, дельфины и др. Они могут воспринимать упругие волны различных диапазонов: инфразвук, слышимый звук, ультразвук. Ориентироваться в пространстве им помогает специфическое строение слухового аппарата: уши изолированы от черепа и колебания ими воспринимаются независимо друг от друга. Издают китообразные звуки в диапазоне от нескольких десятков герц до 200 кГц. Животные ориентируются и общаются друг с другом посредством испускаемых ими и отраженных звуков. Для ориентации в пространстве используются преимущественно сигналы высокой частоты. Китообразные, в частности дельфины, имеют развитый эхолокационный аппарат, схематически изображенный на рис. 1.2¹⁾. Вогнутая передняя поверхность черепа и жировая подушка на челюстных и межчелюстных костях дельфинов способствуют тому, что испускаемый сигнал имеет направленный характер. Наборы сигналов, характеризующие отдельные виды китообразных, различны. Они включают сигналы опасности, питания, боли. Например, дельфины одного из наиболее изученных видов общаются друг с другом звуками частотой 7–20 кГц: лай — преследование добычи, хлопки — устрашение

¹⁾ Жизнь животных. Т.7. / Под ред. В.Е.Соколова. — М.: Просвещение, 1989. — С. 349–393.

своих сородичей, мяукание — кормежка и т. д. При ориентировке и поиске добычи они издают сигналы 200–170 кГц. С возрастом набор сигналов, которым владеют китообразные, увеличивается.

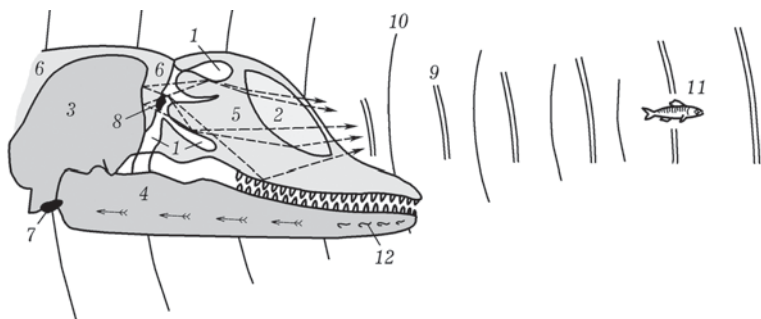


Рис. 1.2. Эхолокационный аппарат дельфина: 1 — воздушные мешки и носовой канал, производящие звуковые импульсы; 2 — жировая подушка, выполняющая функцию акустической линзы; 3 — череп, выполняющий функцию акустического отражателя; 4 — нижняя челюсть, по которой в ухо возвращается отраженная звуковая волна; 5 — части головы, лежащие впереди носового канала; 6 — части головы, лежащие позади носового канала; 7 — барабанная кость и внутреннее ухо; 8 — губа носовой пробки; 9 — излученные звуковые волны; 10 — отраженные звуковые волны; 11 — объект лоцирования (рыба); 12 — нервные отверстия в нижней челюсти

Например, если детеныши владеют шестью коммуникационными сигналами, то взрослые дельфины уже семнадцатью.

Приведем некоторые данные о верхнем пороге слышимости по частоте для животных: кошка — 50 кГц, собака — 135 кГц, шимпанзе — 33 кГц, мышь — 100 кГц, крыса — 80 кГц¹⁾.

Ультразвук и домашние животные. Сказанное выше обуславливает использование человеком ультразвука при взаимодействии с домашними животными. Это наиболее ранняя область практического применения ультразвука.

В настоящее время ультразвук частотой 20–25 кГц используют для дрессировки или отпугивания собак. Отпугивающее действие основано на том, что волны названных частот создают животным дискомфорт. Такое воздействие способствует усвоению собаками некоторых команд (например, «фу»). В Англии ультразвуковые свистки используют для дрессировки полицейских и охотничьих собак.

Ультразвук в медицине. С середины прошлого века исследовалась проблема визуализации ультразвуковыми волнами внутренних тканей человеческого организма. Эти исследования при-

¹⁾ Гипотеза о причинах различия высокочастотных границ звуковосприятия человека и животных // Наука и жизнь. — 2000. — № 10. — С. 124, 125.

вели к тому, что в наши дни ультразвук широко используется для диагностики самых различных заболеваний. Чтобы получить высококачественное акустическое изображение, применяют ультразвук очень высокой частоты (до сотен мегагерц). Чтобы ультразвуковая эхолокация человека оказалась совершенно безвредной, используют ультразвук ничтожно малой интенсивности (порядка $0,5 \text{ мВт/см}^2$).



Рис. 1.3. Снимки еще не родившегося малыша в утробе матери, полученные с помощью ультразвука высокой частоты

В настоящее время с помощью ультразвука получены снимки еще неродившихся детей ¹⁾. Ученые засняли действия малыша в 8–12 недель. Оказалось, что в этом возрасте он уже реагирует на громкие звуки, изменение положения и т. д. Проведенные наблюдения показали, что, например, с шестого месяца своего существования малыш уже проявляет многие эмоции и другие человеческие реакции: радуется, обижается, возмущается, оглядывается вокруг, улыбается.

Ультразвук в науке и технике. Измерение скорости распространения ультразвука, исследования интерференции, дифракции, дисперсии, поглощения, рассеяния и других ультраакустических явлений дают возможность изучать физические свойства и строение вещества. В технических и технологических процессах наиболее часто применяется ультразвук частотой в десятки килогерц: ультразвуковая очистка, воздействие на химические и электрохимические процессы, диспергирование, эмульгирование, распыление, кристаллизация, металлизация и пайка, механиче-

¹⁾ Комсомольская правда, 2 июля, 2004.

ская обработка, сварка, пластическое деформирование — вот далеко не полный перечень технических применений ультразвука. Подробнее с перечисленным вы будете знакомиться на протяжении всей книги.

1.1.5. Гиперзвук. По физическим свойствам упругие волны этого диапазона (частотой выше 10^9 Гц) практически не отличаются от ультразвука. В отдельную область они были выделены в связи со значительными трудностями их искусственного получения.

В газах гиперзвуковые волны распространяться не могут, поскольку при нормальных условиях среднее расстояние между молекулами газов оказывается сравнимым с длиной гиперзвуковых волн.

Упругие волны гиперзвукового диапазона хорошо проводят твердые кристаллические тела. В жидкостях они также распространяются, но быстро затухают. Вследствие высокой частоты, которая соответствует СВЧ-диапазону электромагнитных волн гиперзвуковые волны, распространяясь, взаимодействуют с электронами и тепловыми фонами. При этом приложенное к кристаллу внешнее электрическое поле может усилить гиперзвуковую волну (*акустоэлектрический эффект*).

Взаимодействие гиперзвука с электронами приводит к изменению оптических свойств вещества, влияет на процессы излучения и поглощения света — *акустооптический эффект*. Для получения гиперзвука используют пьезоэлектрические и магнитострикционные излучатели. Поскольку длина гиперзвуковой волны очень мала, размеры излучателей также незначительны: их получают напылением на подложку пьезоэлектрической или магнитострикционной пленки.

Свойства гиперзвука обуславливают его применение в физике твердого тела для исследования состояния вещества. В технике упругие волны этого диапазона используются для создания сверхвысокочастотных акустических линий задержки, устройств акустоэлектроники и акустооптики.

1.2. Механические источники упругих волн

Действие механических излучателей упругих волн основано на возбуждении колебаний механическими способами: ударом, трением, щипком, струями газа и жидкости. Так получают звук с помощью камертона, барабана, струны, колокола, тонкой пластинки, свистка, сирены и т. д. В механических излучателях часто используется явление *резонанса*: колеблющиеся твердое тело, объем жидкости или газа представляют собой *резонатор*, колебания которого могут возбуждаться на *основной собственной частоте* или на *гармониках*.

1.2.1. Колебания стержня. Возьмите за середину металлический стержень и резко ударьте по его торцу в направлении оси стержня (рис. 1.4). Вы услышите однотонный звук,

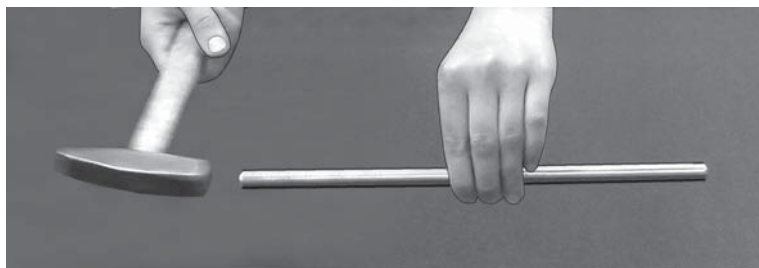


Рис. 1.4. Стальной стержень, возбуждаемый ударом, служит источником упругой волны

который сравнительно медленно затухает. Звук возбуждается в воздухе продольными колебаниями стержня, которые происходят на его основной собственной частоте. При этом на длине стержня укладывается половина длины упругой волны, распространяющейся в материале стержня. Подробно это явление вы исследуете позже (см. § 5.1). Сейчас же отметим только, что такой хорошо известный источник звука, как камертон (рис. 1.5),

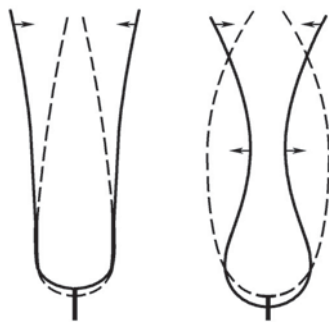


Рис. 1.5. Камертон на деревянном резонаторе; справа схематически изображены возможные колебания его ветвей

фактически представляет собой изогнутый металлический стержень, который установлен на деревянном резонаторе и при ударе совершает затухающие поперечные колебания.

1.2.2. Автоколебания стержня. Быстро затухающие колебания упругого стержня можно превратить в незатухающие *автоколебания*, если их возбуждение производить не кратковременным ударом, а трением.

Опыт 1. Автоколебания стеклянной трубки. Возьмите за середину стеклянную палочку или трубку диаметром около 6 мм и длиной примерно 60 см. Зажатой в правой руке полотняной тряпкой или ваткой, смоченной спиртом или одеколоном, плавно без особого нажима проведите по трубке от ее конца к середине (рис. 1.6): вы слышите довольно сильный чистый звук.

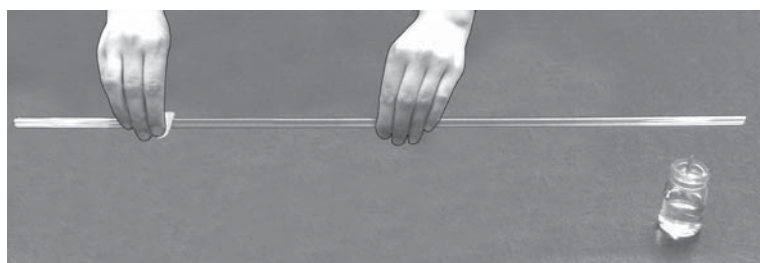


Рис. 1.6. Стеклянная трубка, возбуждаемая трением смоченной в спирте ваткой, служит источником упругой волны

Попробовав возбудить стеклянные трубки других длин, вы убедитесь, что частота звука зависит от длины трубки. Если трубка удерживается за середину, то на ее длине l укладывается половина длины волны звука $\lambda/2$ в материале трубки, при этом трубка возбуждается на основной собственной частоте (см. § 5.1). В этом случае частота звука $\nu = c/\lambda$ обратно пропорциональна длине трубки: $\nu = c/2l$. Можно возбудить достаточно длинные трубки на второй гармонике, если зажимать их на расстоянии четверти длины от одного из концов. Чем короче трубка, палочка или стержень, тем труднее трением возбудить их интенсивные колебания.

Опыт 2. Упругая волна в круглой пластинке. Существует очень красивый опыт, показывающий, что колеблющийся торец стержня действительно испускает упругую волну. Подготовьте две стеклянные трубки длиной 30 и 60 см (внешним диаметром 4,5 мм, внутренним 0,5 мм; мы указываем точные размеры трубок, но это не значит, что при других размерах опыт не получится!). Обе трубки нужно тщательно снаружи и изнутри промыть теплой водой с хозяйственным мылом и высушить. На середины трубок наденьте отрезки резинового шланга длиной примерно 2 см и за них закрепите трубки в лапках штативов

вертикально. Вместо резинового шланга можно использовать высоковольтную изоленту или полоску бумаги, которыми следует плотно обернуть трубки за середину. На лист поролона или полиуретана толщиной около 1 см положите дюралевый диск (например, диаметром 120 мм и толщиной 1,7 мм). Подведите трубку большей длины к диску так, чтобы ее нижний конец слегка касался центра диска. Посыпьте диск равномерно чистым сухим речным песком или кристалликами марганцовокислого калия. Смочив чистую тряпочку спиртом, прижмите ее двумя пальцами к противоположным сторонам трубки возле ее верхнего конца и проведите тряпочкой сверху вниз. Вы услышите однотонный звук и увидите, как порошок собрался в круговые линии с центром в середине дюралевой пластинки (рис. 1.7)!

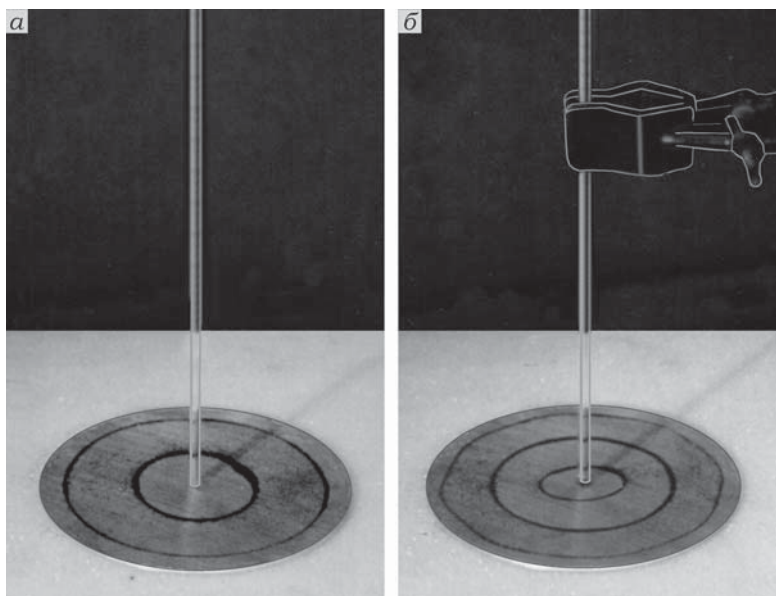


Рис. 1.7. Возбуждение упругой волны в дюралевой пластинке стеклянной трубкой, совершающей автоколебания: длина трубки 600 мм (а) и 300 мм (б)

Объяснить результат этого опыта можно, предположив, что от колеблющегося конца стеклянной трубки по диску распространяется круговая волна. Дойдя до края диска, она отражается от него и идет обратно к центру. Интерференция падающей и отраженной волн приводит к установлению в диске стоячей волны, и порошок собирается в ее узлах. В таком случае расстояние между двумя соседними узлами равно половине длины упругой волны в диске.

Опыт 3. Скорости упругих волн. В эксперименте сравните скорости упругих волн в стеклянных трубках и в дюралевых пластинках. На фотографиях (рис. 1.7) хорошо видно, что трубки разной длины возбуждают в дюралевой пластинке упругие волны, которые имеют различные длины волн. Измерения показывают, что в обозначенных выше условиях опыта стеклянные трубки длиной $l' = 300$ мм и $l'' = 600$ мм возбуждают в дюралевом диске толщиной 1,7 мм волны длиной $\lambda_1 = 34,5$ мм и $\lambda_2 = 50,5$ мм. Поразительно, что хотя отношение длин упругих волн в стеклянных трубках равно $\lambda''/\lambda' = l''/l' = 600/300 = 2$, отношение возбуждаемых ими упругих волн в дюралевом диске составляет $\lambda_2/\lambda_1 = 50,5/34,5 = 1,46 \approx \sqrt{2}$! В чем тут дело, мы разберемся гораздо позже (см. § 10.3).

Опыт 4. Упругая волна в бумажном листе. Замените дюралевый диск листом плотной бумаги, положив его на мягкую подложку из полиуретанового коврика толщиной около 1 см. Равномерно посыпьте лист кристалликами марганцовокислого калия. Прикоснитесь к листу возле одного из его краев концом стеклянной трубки и трением возбуждите в ней упругие колебания. Вы увидите, что кристаллики на бумажном листе немедленно приходят в движение и собираются в закономерно расположенные линии (рис. 1.8). Эти линии обозначают минимумы интенсивности интерференционного поля, образованного волной, идущей по

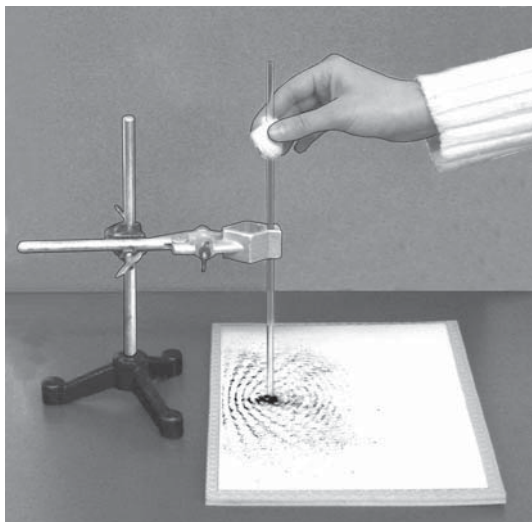


Рис. 1.8. Визуализация интерференционной картины, полученной в листе бумаги при возбуждении волны колеблющейся стеклянной трубкой

бумаге от конца стеклянной трубки, и волной, отраженной краем листа. Подробно это явление будет рассмотрено в § 11.1.

Обращаем ваше внимание на то, что описанные опыты только выглядят очень простыми. Чтобы они получились, нужно подобрать достаточно мягкую ровную подложку и расположить ее горизонтально. Затем надо научиться уверенно получать громкий чистый звук при возбуждении стеклянных стержней или трубок трением. Наконец, нужно добиться, чтобы при движении смоченной спиртом тряпочки вниз по стержню слегка опускающийся нижний конец стержня лишь чуть-чуть касался дюралевого диска или бумажного листа. Впрочем, позже вы сумеете без особого труда ставить подобные эксперименты, возбуждая в пластинках упругие волны магнитострикционным излучателем ультразвука (см. § 10.2).

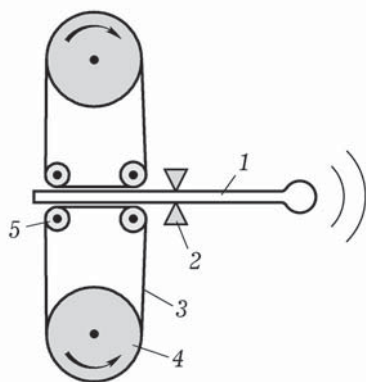


Рис. 1.9. Излучатель Гольцмана: 1 — стеклянная трубка с шаром на рабочем конце; 2 — крепеж, расположенный посередине трубки; 3 — трущиеся о трубку ремни; 4 — шкивы; 5 — прижимные валики

Рассмотренный здесь способ возбуждения стержней трением раньше широко использовался в акустических и ультразвуковых экспериментах. При этом в воздухе удавалось получать упругие волны довольно большой интенсивности.

Например, излучатель Гольцмана состоит из стеклянной трубки, заканчивающейся стеклянным шаром (рис. 1.9). Трубка фиксатором закреплена за середину. Ее продольные колебания возбуждаются за счет трения мягкими ремнями, покрытыми с наружной стороны шелком. Ремни приводятся в движение посредством шкивов и прижимаются к трубке системой валиков. При использовании трубки длиной 7,5 см в воздухе удавалось получить довольно интенсивный ультразвук частотой 33 кГц.

1.2.3. Губной свисток. Это один из самых простых источников громкого однотонного звука в воздухе. В губном свистке (рис. 1.10) струя воздуха выходит из щелевого сопла и попадает на острое лезвие, которое разбивает струю на периодическую последовательность вихрей. Вихри возбуждают колебания объема воздуха, находящегося в резонаторе. Объемом резонатора определяется частота звука, создаваемого свистком. Нетрудно этот объем сделать настолько маленьким, что вместо звука излуча-

тель будет давать ультразвук. Таким ультразвуковым свистком Гальтона, упругая волна от которого не воспринимается органом

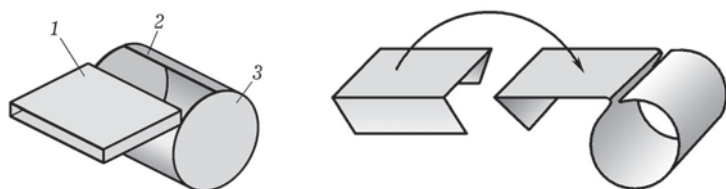


Рис. 1.10. Губной свисток: 1 — сопло; 2 — острое лезвие; 3 — резонатор. Справа показана последовательность изготовления простейшего свистка

слуха человека, пользуются для дрессировки собак, лошадей и других животных. Если резонатор свистка сделать диаметром около метра, а струю создавать посредством специального насоса, то получится довольно мощный источник инфразвука.

В опытах лучше использовать губные свистки самой примитивной конструкции. Вырежьте из жести от консервной банки две полоски шириной по 15 мм, изогните их так, как показано на рис. 1.10, затем первую полоску наденьте на вторую и закрепите ее отогнутым концом второй. У вас получится канал со щелевым соплом и цилиндром без стенок. Боковые отверстия цилиндрика зажмите большим и указательным пальцами правой руки, конец канала возьмите в рот и дуньте в него так, чтобы из сопла вышла струя. Если вместо свиста вы услышите шипение, значит, нужно заняться регулировкой свистка. Она достаточно проста: необходимо найти оптимальное положение края жестяной полоски, образующей цилиндр, относительно сопла. Правильно налаженный свисток должен давать громкий чистый звук. Исследуйте, от чего зависит частота и громкость звука, излучаемого описанным свистком.

1.2.4. Газоструйные и гидродинамические излучатели.

Принцип действия *газоструйного* и *гидродинамического* излучателей одинаков: через сопло (рис. 1.11) под большим давлением выходит струя газа или жидкости и попадает на острый край твердого тела. Это тело представляет собой упругую пластинку, которая закреплена так, что может совершать колебания на резонансных частотах. Струя газа или жидкости острым краем упругой пластинки разбивается на периодическую последовательность вихрей, которые движутся вдоль пластинки с обеих сторон. Вихри струи вызывают вынужденные колебания пластинки. При совпадении частоты вынужденных колебаний с одной из собственных частот упругой пластинки наступает резонанс, и амплитуда колебаний пластинки резко

возрастает. При этом от поверхностей пластинки в газе или жидкости распространяется упругая (чаще всего ультразвуковая)

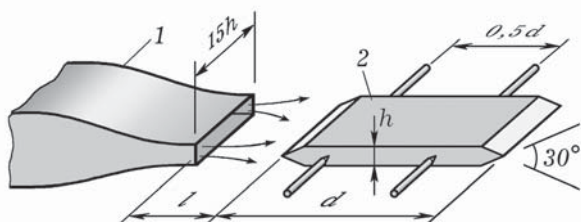


Рис. 1.11. Функциональная схема гидродинамического излучателя упругой волны: 1 — сопло; 2 — упругая пластинка

волна. Газоструйные излучатели применяются в случаях, когда в воздухе требуется получить громкий звук. Гидродинамические излучатели используются для получения звука и ультразвука в жидкостях, например, для целей очистки, диспергирования, эмульгирования.

Действующую модель гидродинамического излучателя ультразвука нетрудно изготовить из отрезка металлической трубки, куска стального ножовочного полотна, четырех игл, обрезков оргстекла, резинового шланга и нескольких болтов с гайками (рис. 1.12). Такой излучатель позволит вам, например, получать эмульсию керосина в воде. Попробуйте!

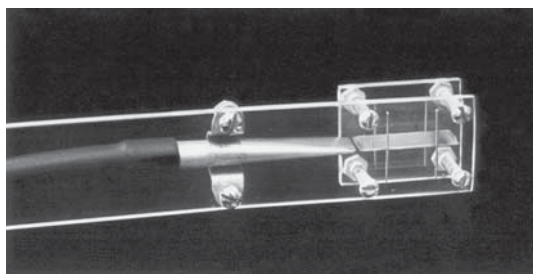


Рис. 1.12. Действующая модель гидродинамического излучателя

1.2.5. Акустическая сирена. Завывающий звук этого источника знаком каждому, кто наяву или в кино слышал сигнал тревоги. *Акустическая сирена* состоит из двух установленных соосно одинаковых дисков, вблизи края которых друг против друга сделаны одинаковые отверстия. Один из дисков неподвижен и поэтому называется статором, а второй вращается вокруг оси и называется ротором. Поток воздуха, проходящий через отверстия статора, периодически прерывается за счет вращения

ротора и возбуждает в воздухе звуковую волну. Сирены, как правило, лишены резонатора, поэтому при разгоне и торможении ротора частота звука сначала нарастает, а затем снижается. Этим и объясняются характерные завывания сирен. На рис. 1.13 схематически изображена одна из возможных конструкций сирены: идущий из патрубка сжатый воздух отклоняющей пластиной равномерно распределяется по камере и выходит наружу через отверстия вращающегося ротора и неподвижного статора, возбуждая мощную звуковую волну.

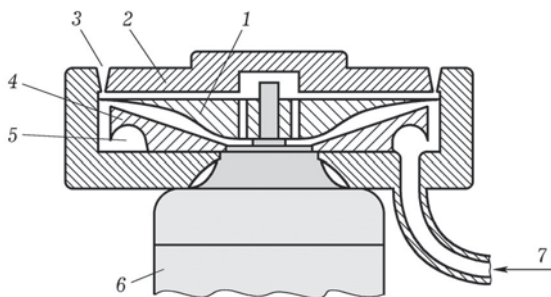


Рис. 1.13. Устройство сирены: 1 — ротор; 2 — статор; 3 — отверстия в статоре; 4 — отклоняющая пластина; 5 — воздушная камера; 6 — электромотор; 7 — сжатый воздух

Сиренами удается получать в воздухе очень мощные звуковые и ультразвуковые волны. Если сирена дает звук интенсивностью порядка 100 Вт/см^2 , то внесенный в такое акустическое поле клочок ваты самопроизвольно воспламеняется, а в узлах образующейся при отражении звука такой интенсивности стоячей волны могут висеть, не падая, довольно тяжелые предметы.

1.3. Термические источники упругих волн

В наши дни термические источники звука редко используются на практике. Однако с точки зрения обучения они представляют немалый интерес, поскольку позволяют достаточно глубоко вникнуть в физическую сущность генерации звука. Поэтому здесь мы лишь упомянем излучатели упругих волн, основанные на использовании электрических разрядов, и более подробно рассмотрим тепловой автогенератор звука.

1.3.1. Электроразрядные излучатели. Искровой и дуговой электрические разряды в газах и жидкостях являются источниками упругих волн. Непосредственной причиной возбуждения волн является периодическое нагревание плазмы, образующейся при этих разрядах. Такие термические излучатели в настоящее

время используются только в специальных исследованиях. Но еще в начале прошлого века они изумляли непосвященных своими возможностями. Например, электрическая дуга (прообраз электросварки) могла петь и говорить человеческим голосом, то есть служила своеобразным громкоговорителем.

1.3.2. Тепловой автогенератор звука. Принцип действия теплового автогенератора основан на использовании явления, обнаруженного немецким ученым Рийке еще в 1859 году. Суть его заключается в следующем. Если в нижнюю половину вертикально расположенной открытой с обоих концов трубы ввести металлическую сетку и затем разогреть ее, например, газовой горелкой, то возникает громкий однотонный звук, который продолжается все то время, пока остывает сетка. Объяснил это любопытное явление английский физик Рэлей.

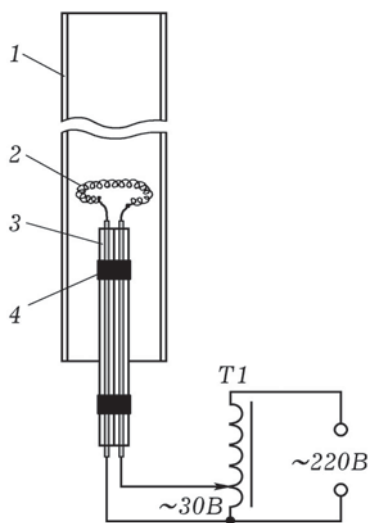


Рис. 1.14. Схематическое изображение теплового автогенератора Рийке: 1 — стеклянная труба; 2 — нихромовая спираль; 3 — стеклянные трубки; 4 — изолянт

Рис. 1.15. Внешний вид нагревателя для теплового автогенератора

Вы без особого труда можете собрать тепловой автогенератор звука. Начать следует с нагревателя, который в наши дни проще всего сделать электрическим. Подберите нихромовый провод (можно использовать нагревательный элемент электроплитки) диаметром около 0,5 мм и на цилиндрической оправке диаметром

5 мм намотайте спираль из 50 витков. Две одинаковые стеклянные трубки длиной 30 см и внутренним диаметром 3–5 мм сложите вместе и соедините между собой обмотками изолянты. Через трубки пропустите многожильные медные провода в полихлорвиниловой изоляции; сечение их должно быть $1\text{--}2\text{ мм}^2$ и длина не меньше одного метра. С оголенными концами проводов, выставляющимися из отверстий трубок примерно на 20 мм, плотно скрутите концы нихромовой спирали. Расправьте спираль так, чтобы она располагалась перпендикулярно трубкам и ее витки находились на равных расстояниях друг от друга (рис. 1.15).

В лапке штатива вертикально закрепите изготовленный вами нагреватель. Аккуратно наденьте на него стеклянную трубу внутренним диаметром 36–40 мм и длиной 60–80 см. Трубу на том же штативе закрепите вертикально так, чтобы нагреватель оказался на расстоянии примерно четверти ее длины от нижнего конца и спираль не касалась стекла (рис. 1.16). Выводы нагревателя подключите к регулируемому источнику, дающему напряжение в пределах от 0 до 36 В (можно использовать школьный блок типа В-24).

Перед включением источника питания в сеть убедитесь, что его регулятор установлен в нулевое положение. Включив источник, медленно повышайте напряжение на его выходе (нагреватель довольно инерционен!), непрерывно следя за спиралью. Как только спираль раскалится докрасна, вы услышите громкий звук!

Если звук не появляется, необходимо, отключив напряжение, подрегулировать диаметр спирали нагревателя: оптимально, если

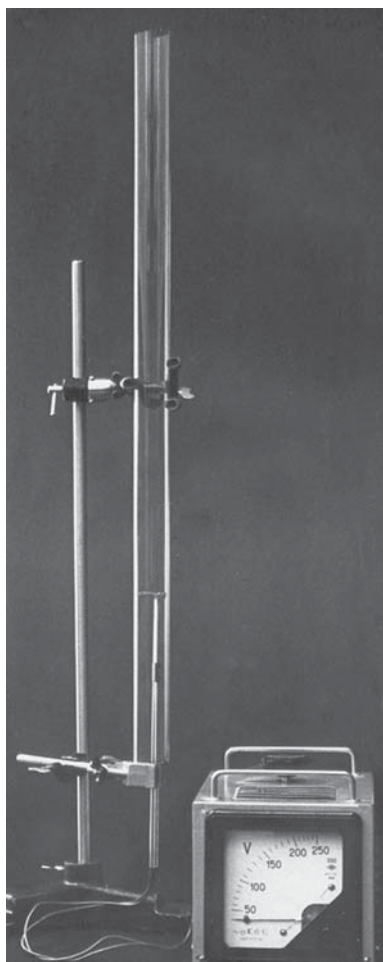


Рис. 1.16. Экспериментальная установка для исследования теплового автогенератора Рийке

витки спирали находятся рядом со стенкой стеклянной трубы но не касаются ее.

1.3.3. Элементарная теория теплового автогенератора.

Кратко рассмотрим упрощенную теорию явления Рийке.

Пусть столб воздуха в открытой с обоих концов вертикально расположенной трубе в силу каких-либо причин совершает *основное собственное колебание*. Такие причины всегда существуют: любой звук вызывает слабые колебания воздуха в трубе, причем наибольшей амплитудой обладает именно основное собственное колебание.

Напомним, что столб воздуха в трубе может совершать целый набор собственных колебаний (их называют *гармониками*); при этом в трубе устанавливаются стоячие волны звука соответствующих частот. Поскольку концы трубы открыты, давление воздуха внутри трубы вблизи концов равно атмосферному, а следовательно, изменения давления при колебаниях воздуха на концах трубы равны нулю. Поэтому при возникновении в трубе стоячей звуковой волны на концах трубы всегда образуются узлы давлений (точнее, изменений давлений) и пучности смещений (а значит, и скоростей) частиц колеблющегося воздуха. Собственное колебание столба воздуха в трубе, имеющее наименьшую частоту, и является основным. В этом случае длина звуковой волны максимальна и, как нетрудно сообразить, на длине трубы укладывается половина длины волны звука в воздухе. Частота основного собственного колебания определяется соотношением

$$\nu_{\text{осн}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l}, \quad (1.1)$$

где c — скорость звука в воздухе, λ — длина звуковой волны в трубе, l — длина трубы.

На рис. 1.17 схематически изображено основное собственное колебание столба воздуха в трубе, открытой с обоих концов. Положим, что в начальный момент времени $t = 0$ смещение частиц воздуха в трубе равно нулю ($\Delta x = 0$), затем колеблющийся воздух сжимается. Спустя четверть периода (в момент времени $t = T/4$) фаза сжатия достигает максимума, изменение давления Δp в центре трубы максимально и положительно; смещение Δx — максимально на концах трубы, причем в нижней половине трубы смещение частиц воздуха направлено вверх (это направление естественно считать положительным), а в верхней — вниз (рис. 1.17 а). Через полпериода после начала колебания изменение давления и смещение вновь равны нулю. Спустя еще четверть периода, давление в центре трубы становится минимальным (изменение давления Δp отрицательно); смещение Δx максимально на концах трубы, причем теперь уже в верхней

части трубы оно положительно, а в нижней — отрицательно (рис. 1.17 б).

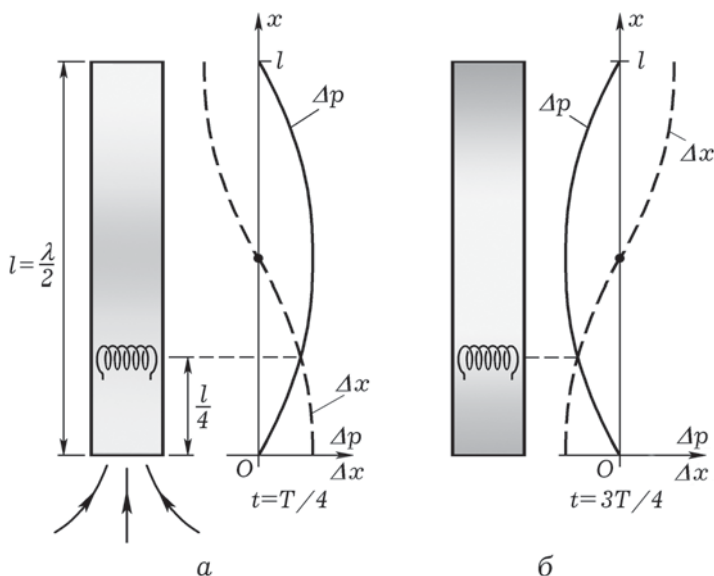


Рис. 1.17. Колебания столба воздуха в трубе: а — в центре трубы изменение давления положительно; б — спустя полпериода в центре трубы изменение давления отрицательно

Расположенный в трубе Рийке нагреватель, на первый взгляд, может лишь создавать тягу, то есть обеспечивать поступательное движение воздуха вверх по трубе. В самом деле, нагреватель имеет более высокую температуру, чем окружающий его воздух, и поэтому отдает ему тепло. Нагретый воздух имеет меньшую плотность, чем холодный, и «всплывает» вверх по трубе. Казалось бы, роль нагревателя сводится только к этому простому процессу. Однако в действительности она значительно глубже, чем это можно предположить при поверхностном рассмотрении.

Поскольку труба Рийке непрерывно звучит, она является *автоколебательной системой*. А всякая автоколебательная система должна содержать источник энергии, собственно колебательную систему и *звено обратной связи*, обеспечивающее в нужные моменты времени периодическое поступление энергии, компенсирующее потери на трение, излучение и т. д. Источником энергии в приборе Рийке является, очевидно, нагреватель. Колебательная система — это столб воздуха, ограниченный трубой. А звено обратной связи? Оказывается, обратная связь в приборе Рийке акустическая, и важную роль в ее функционировании

выполняет опять-таки нагреватель. Первым установил это Рэлей, и наша задача сейчас заключается в том, чтобы попытаться понять его рассуждения.

1.3.4. Обратная связь в тепловом автогенераторе. Итак, вернемся к началу и будем считать, что столб воздуха в трубе Рийке (рис. 1.17) в силу какой-то случайной причины начинает совершать основное собственное колебание. Это колебание было бы затухающим, если бы в трубе не был расположен нагреватель. Допустим, что он там есть, нагрет до достаточно высокой температуры и находится в нижней половине трубы. Тогда если наступает фаза сжатия, сжимающийся воздух в трубе слегка нагревается, теплообмен между нагревателем и окружающим его воздухом уменьшается, следовательно, увеличивается температура нагревателя и усиливается движение воздуха вверх по трубе (тяга). Направление тяги совпадает в нижней части трубы с направлением движения сжимающегося воздуха, и тяга усиливает сжатие воздуха в трубе (рис. 1.17 а). В фазе разрежения воздух в трубе охлаждается, температура нагревателя несколько понижается, и тяга вверх ослабевает (рис. 1.17 б).

Итак, колебания воздуха в трубе вызывают периодическое изменение температуры нагревателя, колебания температуры нагревателя управляют тягой воздуха вверх по трубе, а периодически изменяющаяся тяга в свою очередь воздействует на колебания столба воздуха. Таким образом, в рассматриваемой системе имеет место обратная связь. В случае, когда нагреватель расположен в нижней половине трубы, обратная связь, как это следует из приведенных рассуждений, положительна, поскольку она способствует поддержанию колебаний воздуха в трубе.

Нетрудно видеть, что если нагреватель расположен в верхней части трубы Рийке, то обратная связь в системе отрицательна. Действительно, и в этом случае в фазе сжатия температура нагревателя возрастает, но поскольку нагреватель расположен в верхней половине трубы, то нагретый им воздух движется навстречу сжимающемуся воздуху и ослабляет сжатие. В фазе разрежения в верхней части трубы тяга уменьшается, но и движение разрежающегося воздуха направлено вверх. Следовательно, когда нагреватель расположен в верхней половине трубы, амплитуда случайно возникших звуковых колебаний столба воздуха не только не будет возрастать, но, напротив, станет уменьшаться еще быстрее, чем при отсутствии нагревателя. Иными словами, введение нагревателя в верхнюю половину трубы лишь усиливает затухание колебаний воздуха в ней.

Мы подробно разобрали так называемое *фазовое условие* существования автоколебаний в трубе Рийке. Чтобы автоколебания действительно имели место, должно выполняться и *амплитуд-*

ное условие: обратная связь должна быть такой по величине, чтобы поступления энергии в систему компенсировали ее потери. Интуитивно ясно, что величина обратной связи зависит от положения нагревателя в трубе. Где именно он должен быть расположен, чтобы обратная акустическая связь в трубе была максимальной?

Рэлей рассуждал так. Нагреватель выполняет две функции: во-первых, он реагирует на колебания столба воздуха в трубе (под действием этих колебаний изменяет свою температуру) и, во-вторых, нагреватель управляет тягой внешнего воздуха вверх по трубе (отдает окружающему его воздуху в определенные моменты времени избыток тепла). Наибольшие изменения температуры нагревателя будут в том месте трубы, где изменения температуры колеблющегося воздуха, вызванные соответствующими изменениями давления, максимальны. Колебания температуры нагревателя вызовут наибольшие изменения тяги, если нагреватель расположен в том месте трубы, где с ним в единицу времени может соприкоснуться наибольший объем воздуха. Таким образом, заключает Рэлей (и мы не можем с ним не согласиться), нагреватель должен быть расположен там, где одновременно изменения давления и смещения колеблющегося в трубе воздуха максимальны, то есть на расстоянии четверти длины трубы от одного из ее концов (рис. 1.17). Именно в этом случае величина обратной связи окажется максимальной, и именно таковы оптимальные условия работы автоколебательной системы Рийке.

1.4. Электромеханические преобразователи упругих волн

Переменные электрическое и магнитное поля можно использовать для возбуждения механических колебаний упругих стержней и пластинок. Эта идея положена в основу принципа действия *электромеханических излучателей* упругих волн. Колеблющиеся упругие тела в свою очередь при определенных условиях могут порождать переменные электрическое и магнитное поля. Это обстоятельство используется в *электромеханических приемниках* упругих волн. Общее название излучателей и приемников — *электромеханические преобразователи*, поскольку основная функция этих приборов заключается в преобразовании электрических колебаний в механические и наоборот: механических колебаний в электрические.

Электромеханические преобразователи звука встречаются буквально на каждом шагу. Принцип действия большинства из них вам хорошо знаком из школьного курса физики. Поэтому

здесь мы только напомним основные сведения, полагая, что в деталях вы сможете разобраться самостоятельно.

1.4.1. Электростатические преобразователи. В *электростатических излучателях* колебания тел вызываются переменным электростатическим взаимодействием неподвижного электрода и упругого тела. Конструкции таких излучателей могут быть самыми различными. Например, на небольшом расстоянии от торца металлического стержня, закрепленного посередине, располагают металлическую пластинку и к получившемуся конденсатору подводят переменное напряжение. Электростатическое взаимодействие приводит к тому, что на торец стержня действует периодическая сила, в результате в стержне возбуждаются продольные колебания. К электростатическим излучателям относят также те, действие которых основано на явлении *электрострикции* — способности некоторых материалов изменять линейные

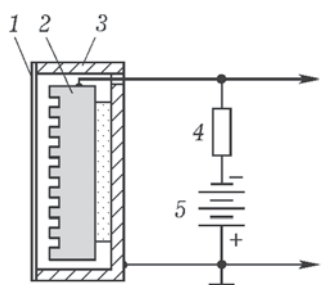


Рис. 1.18. Устройство конденсаторного микрофона: 1 — тонкая электропроводная мембрана; 2 — электрод; 3 — металлический корпус; 4 — нагрузочный резистор; 5 — источник питания

размеры во внешнем электрическом поле. В *электростатических микрофонах*, которые бывают *конденсаторными* и *электретными*, осуществляется обратное преобразование механических колебаний в электрические: под действием упругой волны легкая гибкая мембрана колеблется, вызывая изменение емкости конденсатора, одним из электродов которого она является (рис. 1.18). Изменения емкости при постоянном заряде конденсатора приводят к изменениям напряжения, которые и представляют собой электрический сигнал.

1.4.2. Электромагнитные преобразователи. *Электромагнитный излучатель* звука (его часто называют *телефоном*) представляет собой намотанную на ферромагнитном сердечнике катушку и расположенную вблизи сердечника тонкую ферромагнитную мембрану (рис. 1.19). При прохождении переменного тока по катушке переменное магнитное поле вызывает вынужденные колебания мембраны, которая и порождает в окружающей среде упругую волну. Понятно, что если, напротив, на мембрану падает упругая волна, то ее колебания вызовут периодические изменения магнитного потока через катушку и на ее выводах появится переменное напряжение. Так работает *электромагнитный микрофон*. Чтобы легче представить конструкцию элек-

ромагнитного преобразователя, на рис. 1.20 представлен разрез капсуля типа ДЭМШ-1.

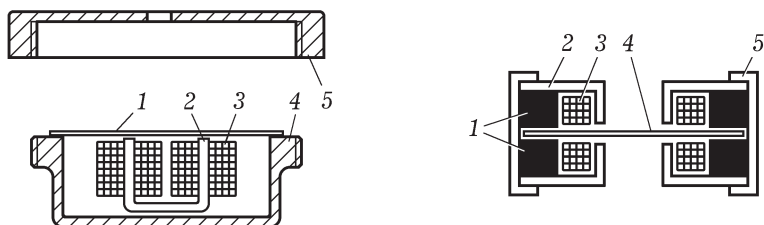


Рис. 1.19. Устройство электромагнитного телефона: 1 — мембрана; 2 — ферромагнитный сердечник; 3 — катушка; 4 — корпус; 5 — крышка

Рис. 1.20. Устройство электромагнитного капсуля: 1 — кольцевые магниты; 2 — полюсные наконечники; 3 — последовательно соединенные секции катушки; 4 — круглая мембрана из тонкого упругого ферромагнетика; 5 — обжимка

1.4.3. Электродинамические преобразователи. В *электродинамических излучателях* используется явление взаимодействия проводника с током и магнитного поля. Типовой электродинамический источник звука или просто *динамик* (рис. 1.21) состоит из постоянного магнита с полюсными наконечниками, в кольцевом зазоре между которыми расположена катушка, механически соединенная с диффузором, способным совершать вынужденные колебания. Катушка подключена к генератору переменного тока, поэтому совершает колебания с частотой тока. В результате диффузор динамика испускает звуковую волну. Если на диффузор динамика направить звуковую волну, то его колебания вызовут колебания катушки в магнитном поле, и на выводах катушки появится переменное напряжение. Поэтому *электродинамический микрофон* отличается от динамика только конструктивно, физический принцип действия этих приборов один и тот же.

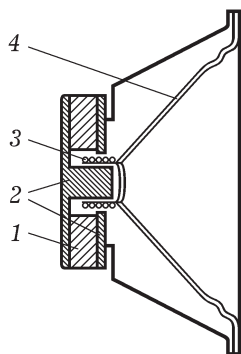


Рис. 1.21. Устройство электродинамического излучателя упругой волны: 1 — постоянный магнит; 2 — полюсные наконечники; 3 — катушка; 4 — диффузор

1.4.4. Пьезоэлектрические преобразователи. При деформации некоторых кристаллов (кварц, сегнетова соль, турмалин, цинковая обманка) на их гранях появляются электрические заряды. Явление возникновения электрического поля при деформации кристаллов называется *прямым пьезоэлектрическим эффектом*. Встречающиеся в естественных условиях пьезоэлектри-

ческие кристаллы дороги. В настоящее время такие кристаллы выращивают искусственно. Разработаны технологии, позволяющие получать пьезокерамические материалы, состоящие из множества одинаково ориентированных мелких кристалликов. К таким материалам относятся, например, титанат бария и цирконат титаната свинца (ЦТС).

Из искусственных пьезокерамических материалов изготавливают *пьезоэлементы* — плоские пластинки, чаще всего круглой формы, покрытые с обеих сторон металлическими электродами. Пьезоэлементы настолько широко распространены, что их можно приобрести практически в любом магазине, торгующем радиотоварами. Пьезоэлемент нетрудно извлечь из старого пьезоэлектрического звонка, звучащей игрушки и т. п. Для удобства работы с ним нужно припаять гибкие провода к корпусу пьезоэлемента и непосредственно к поверхности пьезокерамики, покрытой проводящим слоем. Пайку надо производить быстро, чтобы не перегреть пьезоэлемент.

Опыт 1. Прямой пьезоэффект. Подключите пьезоэлемент, например, типа ЗП-3, к авометру или, что лучше, цифровому мультиметру. Деформируйте пьезоэлемент, изогнув его пальцами. При этом вы обнаружите, что между обкладками пьезоэлемента возникла разность потенциалов определенной полярности. Измените деформацию на противоположную — полярность напряжения также изменится. Таким образом, опыт показывает, что при периодической деформации пьезоэлемента на его обкладках возникает переменное напряжение с частотой деформации. Значит, пьезоэлемент можно использовать в качестве приемника упругой волны.

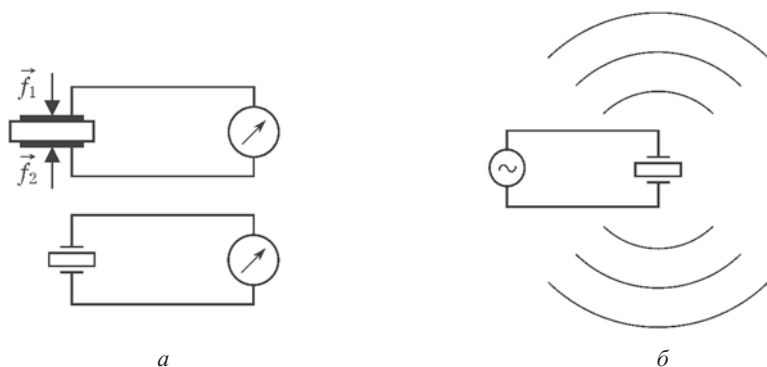


Рис. 1.22. Схемы опытов по наблюдению прямого и обратного пьезоэффекта: а — при деформации пьезоэлемента и при ее исчезновении через гальванометр проходит электрический заряд; б — подключенный к генератору пьезоэлемент периодически деформируется и является источником упругой волны

Опыт 2. Обратный пьезоэффект. Теперь подключите к пьезоэлементу батарейку. Тогда в момент подачи напряжения вы услышите легкий щелчок. Это значит, что при подаче на пьезоэлемент напряжения он изменяет свои размеры. Обнаруженное в опыте явление деформации пьезоэлемента при подаче на его обкладки напряжения называется *обратным пьезоэлектрическим эффектом*.

Понятно, что если на пьезоэлемент подать переменное напряжение, то он будет совершать колебания с частотой этого напряжения и возбудит в окружающей среде упругую волну. Это явление положено в основу всех пьезоэлектрических излучателей. Вокруг вас их великое множество: пищалки в детских игрушках, различного рода звонки и сирены, телефоны и громкоговорители.

Опыт 3. Пьезоэлектрический излучатель. Чтобы убедиться в возможностях пьезоэлектрических источников упругих волн, подключите пьезоэлемент к любому маломощному генератору переменного напряжения. Можно использовать, например, генератор типа ФГ-100, выпускаемый промышленностью для школьного физического кабинета. Изменяйте частоту и амплитуду переменного напряжения, вырабатываемого генератором, и проследите за соответствующими изменениями звука, издаваемого пьезоэлементом. Обратите внимание, что на некоторых частотах громкость звука резко возрастает. Это явление резонанса, которое широко используется в ультразвуке для получения посредством пьезоэлектрических излучателей ультразвуковых колебаний максимальной амплитуды.

1.4.5. Магнитострикционные преобразователи. Ферромагнитные материалы (железо, никель, кобальт, ферриты и др.) при помещении их в магнитное поле деформируются, изменяя свои размеры; это явление называется *прямым магнитострикционным эффектом*. Существует и *обратный магнитострикционный эффект* — возникновение небольшого магнитного поля при деформации ферромагнетика. Вспоминая изложенное выше, вы легко сообразите, что явление магнитострикции может быть использовано как для получения, так и для приема упругих волн. Магнитострикционные излучатели звука и ультразвука — это основные приборы, с которыми вы будете иметь дело практически во всех учебных исследованиях этой книги. Поэтому в дальнейшем они рассмотрены настолько подробно, насколько это необходимо для самостоятельного изготовления учебных магнитострикционных излучателей и детального понимания физических принципов их работы.

Глава 2

ГАРМОНИЧЕСКИЕ УПРУГИЕ ВОЛНЫ

Упругие волны или звук в широком смысле этого слова, вообще говоря, имеют очень сложную форму. Чтобы убедиться в этом, достаточно подключить к осциллографу микрофон и получить осциллограмму звукового сигнала, создаваемого собственным голосом. При распространении реальной упругой волны в общем случае может происходить изменение ее формы. Поэтому даже понятие скорости распространения для реальной волны неоднозначно. Однако любую как угодно сложную волну можно представить в виде конечной или бесконечной суммы гармонических волн разных частот. Гармоническая волна является простейшей математической моделью реальной волны. Рассмотрению этой модели и обоснованию ее применимости к реальным волнам и посвящена настоящая глава.

2.1. Гармоническая упругая волна

Независимо от того, в каких средах распространяются и к какому частотному диапазону относятся упругие волны, все они в первом приближении могут быть описаны одним и тем же уравнением волны. Это уравнение отличается простотой и позволяет ввести вполне определенные физические величины, которые характеризуют упругую волну и могут быть измерены в эксперименте.

2.1.1. Гармонические колебания и их характеристики.

Колебание — это физический процесс, периодически повторяющийся с течением времени. Если зависимость колеблющейся величины s от времени t может быть описана гармонической функцией

$$s = a \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.1)$$

то соответствующее колебание называется *синусоидальным* или *гармоническим*. Отклонение s колеблющейся величины от ее нулевого значения в положении равновесия системы получило название *элонгации*, а максимальное значение a элонгации — *амплитуды* колебания. Аргумент синусоидальной функции в выражении (2.1) $\psi(t) = \omega t + \varphi$ называется *фазой* колебания, зна-

чение фазы в начальный момент времени $t = 0$ принято называть *начальной фазой* $\psi(0) = \varphi$.

Гармоническое колебание периодически во времени. Его *временной период* T можно определить из условия, что синусоидальная функция (2.1) имеет период 2π . Для этого ко времени прибавляем период T , а к фазе — период 2π и приравняем получившиеся выражения: $\omega(t + T) + \varphi = (\omega t + \varphi) + 2\pi$, отсюда $\omega T = 2\pi$ и, следовательно:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu} \quad \text{или} \quad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}, \quad (2.2)$$

где ν — частота, $\omega = 2\pi\nu$ — *циклическая частота* гармонического колебания.

Полезно помнить, что *частота колебания* ν — это число полных колебаний системы в единицу времени, циклическая частота ω — число колебаний за время, равное 2π секунд: $\omega = 2\pi\nu$.

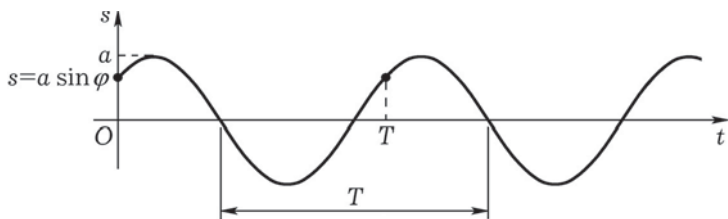


Рис. 2.1. Осциллограмма гармонического колебания

На рис. 2.1 графически представлена зависимость элонгации s гармонического колебания от времени t . Такое представление называется *осциллограммой* колебания.

2.1.2. Поперечные и продольные упругие волны. Под *упругой волной* понимают процесс распространения колебательного движения в упругой среде.

Если частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны, то такую волну называют *поперечной*; если частицы колеблются вдоль этого направления, говорят о *продольной* волне (рис. 2.2). Звук в воздухе — это продольная упругая волна, которая представляет собой перемещающиеся от источника области высокого и низкого давлений (области сжатий и разрежений) воздуха. Амплитуда колебаний частиц среды определяет громкость, частота их колебаний — высоту звука. В газах и жидкостях могут распространяться только продольные упругие волны. В твердых телах помимо продольных существуют поперечные и смешанные продольно-поперечные волны.

Поперечную и продольную упругие волны и их распространение удобно наблюдать, используя игрушечную пластмассовую пружину — *слинк*.

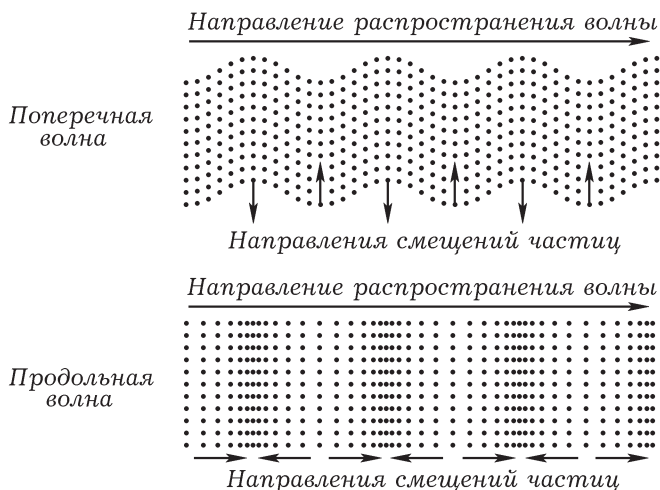


Рис. 2.2. Схематическое изображение смещений частиц в волне: в поперечной волне частицы смещаются перпендикулярно направлению распространения, в продольной — вдоль этого направления

Опыт 1. Продольные импульсы растяжения и сжатия. Расположите растянутую пружину на горизонтальной поверхности стола так, чтобы она лежала совершенно свободно. Возьмите один конец пружины в руку и резко дерните его так, чтобы пружина возле этого конца растянулась примерно на 10 см. Вы увидите, как вдоль пружины побежит продольный волновой импульс растяжения. Теперь резко ударьте по тому же концу пружины так, чтобы она сжалась — по пружине побежит продольный импульс сжатия.

Опыт 2. Отражение от свободного конца пружины. Повторите предыдущий опыт, но теперь сосредоточьте свое внимание на явлениях, которые происходят после того, как импульсы растяжения и сжатия доходят до свободного конца пружины. Вы обнаружите что эти импульсы отражаются и идут обратно, причем растяжение остается растяжением, а сжатие — сжатием. Это означает, что от свободного конца пружины упругая волна отражается без изменения фазы.

Опыт 3. Отражение от закрепленного конца пружины. Зафиксируйте свободный конец пружины, например, в лапке штатива. Вы обнаружите, что при отражении от него волна растяжения сменяется на волну сжатия, а волна сжатия — на волну растя-

жения. Отсюда следует, что отражение от закрепленного конца пружины сопровождается изменением фазы волны на противоположную.

Опыт 4. Возбуждение продольной гармонической волны. Попробуйте конец пружины привести в периодическое колебательное движение в направлении лежащей пружины. При этом по пружине побежит близкая к гармонической продольная волна. Отразившись от конца пружины, она пойдет обратно. Наложение падающей и отраженной волн приводит к их интерференции. Так как интерферирующие волны распространяются навстречу друг другу, то в результате на пружине устанавливается стоячая волна с неизменным во времени распределением узлов и пучностей вдоль пружины.

Опыт 5. Поперечные волны. Повторите всю серию описанных опытов, создавая возмущение возле одного из концов лежащей на столе пружины в направлении, перпендикулярном пружине. Убедитесь, что при таких возмущениях по пружине распространяются поперечные импульсы, которые точно так же отражаются от свободного и закрепленного концов пружины, как продольные. Возбудите в пружине близкую к гармонической поперечную бегущую волну и добейтесь установившейся стоячей волны.

На рис. 2.3 представлены фотографии результатов некоторых из описанных выше опытов. Пользуясь ими, вы можете продумать порядок выполнения соответствующего исследования.

2.1.3. Уравнение гармонической волны. Если в среде с постоянной скоростью c распространяется гармоническая упругая волна, то все точки, через которые она проходит, совершают гармонические колебания с одинаковой амплитудой, но с монотонно увеличивающейся фазой. Направим ось x вдоль направления распространения волны. Пусть колебание в начале координат описывается уравнением (2.1): $s = a \sin(\omega t + \varphi)$. Тогда в произвольной точке с координатой x колебание происходит по тому же закону, но с запаздыванием на время $\tau = x/c$, равное времени распространения волны от начала координат до данной точки. Значит, колебание в точке с координатой x выражается уравнением

$$s = a \sin(\omega(t - \tau) + \varphi) = a \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c} x + \varphi\right). \quad (2.3)$$

Это уравнение описывает гармонические колебания в любой момент времени и во всех точках среды, через которые проходит волна, и поэтому называется *уравнением гармонической волны*. Понятно, что строго гармонических волн в природе не существует, иначе они должны были бы быть всегда и везде, как того требует уравнение (2.3). Реальные волны возникают в момент

начала излучения, распространяются в среде или пространстве и, потеряв энергию, исчезают.

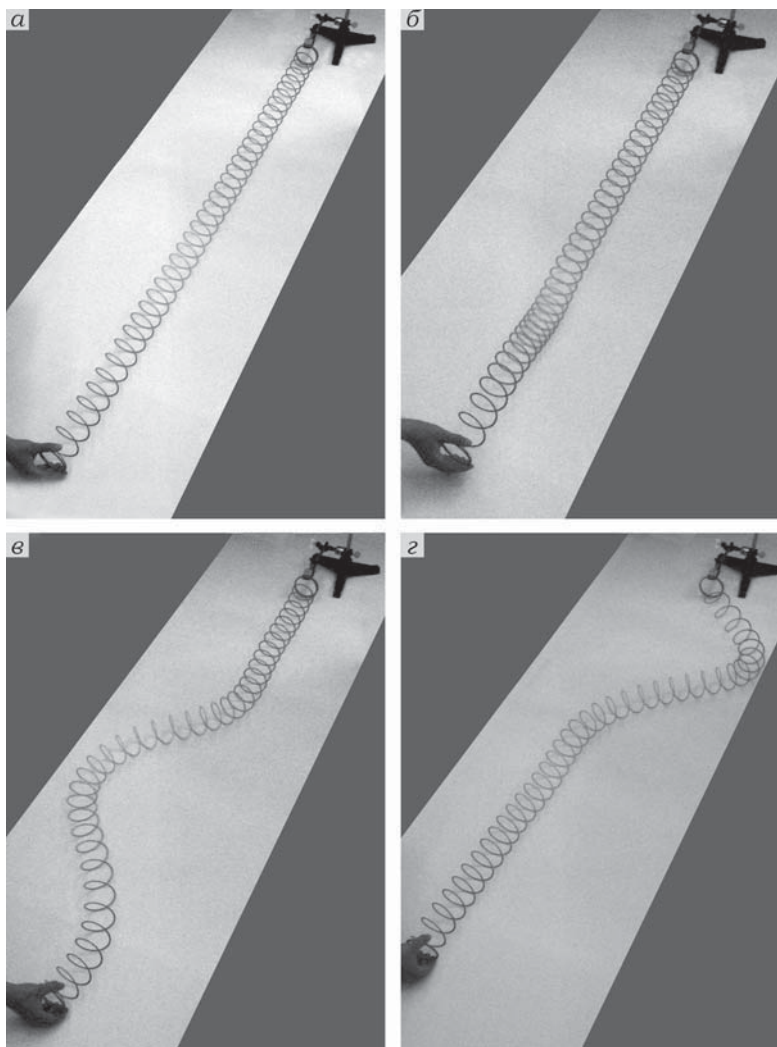


Рис. 2.3. Распространение волнового импульса в горизонтально расположенной пружине: *а* — лежащая на столе растянутая пружина, один конец которой закреплен; *б* — продольный импульс сжатия, бегущий вдоль пружины; *в* — поперечный импульс; *г* — отраженный от закрепленного конца пружины поперечный импульс

Все величины, характеризующие гармоническое колебание (см. п. 2.1.1), относятся и к гармонической волне. Новой является

величина

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{T \cdot c} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2.4)$$

которая получила название *волнового числа*. Произведение скорости распространения волны на ее период называется *длиной волны*

$$\lambda = cT. \quad (2.5)$$

С учетом введенных обозначений уравнение волны (2.3) можно записать в виде

$$s = a \sin(\omega t - kx + \varphi). \quad (2.6)$$

Длина волны λ является *пространственным периодом* волны. Чтобы убедиться в этом, выясним, насколько изменится аргумент гармонической функции в уравнении волны (2.6), если к координате x добавить пространственный период λ : $\omega t - k(x + \lambda) + \varphi = \omega t - kx + \varphi - 2\pi$. Видим, что это изменение составляет 2π , то есть как раз равно периоду синусоидальной функции, значит λ тоже период функции (2.6).

Таким образом, *гармоническая волна периодична не только во времени, но и в пространстве*; ее временной период T равен периоду переносимых волной колебаний, а пространственный период λ равен длине волны, то есть минимальному расстоянию между точками среды, в которых колебания происходят в фазе.

Во многих случаях начальную фазу φ в уравнении волны (2.6) можно положить равной нулю. Тогда уравнение гармонической волны примет вид

$$s = a \sin(\omega t - kx). \quad (2.7)$$

На рис. 2.4 сверху изображена продольная упругая волна для определенного момента времени; ниже графически представлена зависимость элонгации волны от координаты в тот же момент времени. Такое представление называется *моментальной фотографией волны*. На этом же рисунке показаны осциллограммы колебаний, происходящих в точках O , M_1 , M_2 , M_3 и M_4 среды. Точки M_1 и M_3 отстоят друг от друга на длину волны, и колебания в них происходят в фазе. Точка M_2 отстоит от точек M_1 и M_3 на полволны, и колебание в ней происходит в противофазе с колебаниями в указанных точках.

2.1.4. Фазовая скорость волны. Физический смысл скорости гармонической волны c заключается в том, что она характеризует скорость переноса фиксированного значения фазы волны. Чтобы убедиться в этом, в уравнении волны (2.6) зафиксируем произвольное значение фазы

$$\psi = \omega t - kx + \varphi = \text{const.}$$

Спустя время Δt это значение фазы переместится на величину Δx , и выражение для того же самого значения фазы примет вид

$$\psi = \omega(t + \Delta t) - k(x + \Delta x) + \varphi = \text{const.}$$

Вычитая из последнего равенства предыдущее, получаем: $\omega\Delta t - k\Delta x = 0$. Отсюда *фазовая скорость волны*

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi/T}{2\pi/\lambda} = \frac{\lambda}{T} \quad \text{или} \quad c = \frac{dx}{dt} = \frac{\lambda}{T} \quad (2.8)$$

В дальнейшем мы без лишних слов будем переходить от конечных приращений к бесконечно малым приращениям или *дифференциалам*. В физике такие предельные переходы делаются постоянно, поэтому к ним надо просто привыкнуть: реально бесконечно малые величины не существуют, зато есть очень маленькие, которые для удобства можно приближенно считать бесконечно малыми.

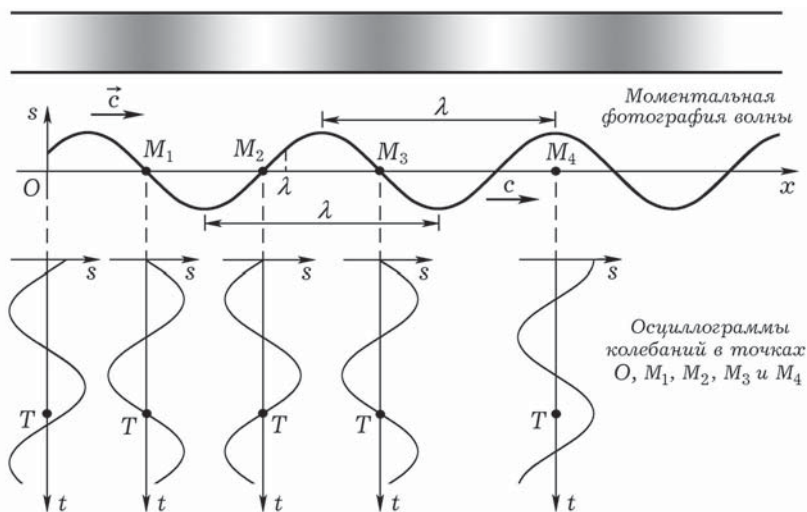


Рис. 2.4. Продольная упругая волна: изображение бегущих со скоростью c сжатий и разрежений волны, моментальная фотография волны, осциллограммы колебаний в различных точках среды

2.1.5. Физическая модель бегущей гармонической волны. Уравнения (2.6) и (2.7) представляют собой математическую модель гармонической волны. Мы уже отмечали, что в природе гармонических волн не существует. Однако любую как угодно сложную волну можно представить в виде суммы (конечной или бесконечной) гармонических волн. Именно поэтому простая гармоническая модель имеет важное значение в волновой физике.

Нетрудно поставить модельный эксперимент, показывающий распространение гармонической волны и основные ее свойства. Для этого приготовьте электронный осциллограф, генератор звуковой частоты и секундомер. Из картона или плотной бумаги изготовьте три планшета с прорезями шириной 2 мм; один из планшетов должен полностью перекрывать экран осциллографа, а два других иметь вид полосок шириной по 20 мм.

Включите осциллограф, переведите его в режим внешней синхронизации и на вход усилителя вертикального отклонения подайте переменное напряжение частотой порядка 3 кГц от генератора звуковой частоты. Подберите частоту горизонтальной развертки осциллографа так, чтобы на экране получилось изображение нескольких периодов синусоиды, равномерно плывущих слева направо со скоростью 2–6 см/с. Это изображение и моделирует гармоническую волну (рис. 2.5).

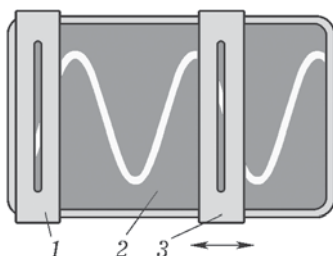


Рис. 2.5. Модель гармонической волны: 1, 3 — узкие планшеты с прорезями; 2 — экран осциллографа

Опыт 1. Гармоническая волна как распространение гармонических колебаний. Большой планшет с вертикальной прорезью придвиньте вплотную к экрану осциллографа так, чтобы экран оказался полностью перекрытым, и в прорези была видна колеблющаяся светлая точка. Перемещая планшет в горизонтальном направлении, убедитесь, что *в каждой точке, через которую проходит гармоническая волна, происходит гармоническое колебание.*

Опыт 2. Гармоническое колебание как источник гармонической волны. Вплотную к левому краю экрана осциллографа поместите узкий планшет с вертикальной прорезью. Вы увидите, что колеблющаяся в прорези точка моделирует *источник (осциллятор)*, от которого по оставшейся открытой части экрана бежит гармоническая волна.

Опыт 3. Колебания в различных точках, через которые проходит волна. Два узких планшета расположите так, чтобы их прорезями были выделены произвольные точки, через которые проходит волна. Вы обнаружите, что в общем случае *в различных точках, через которые проходит гармоническая волна, колебания несинфазны.*

Опыт 4. Длина гармонической волны. Расположите два планшета рядом, один из них оставьте неподвижным, а другой перемещайте до тех пор, пока колебания светящихся точек в про-

резях не станут синфазными. Измерьте расстояние между прорезями и получите значение *длины волны*, как *минимального расстояния между двумя точками, колебания в которых синфазны*.

Опыт 5. Фазовая скорость гармонической волны. Определите фазовую скорость волны. Для этого перемещайте планшет с прорезью вдоль направления движения синусоиды с такой скоростью, чтобы колеблющаяся в его прорези точка казалась неподвижной. При этом фаза волны относительно движущегося планшета остается неизменной. В условиях опыта секундомером измерьте время перемещения планшета на известное расстояние (например, на ширину экрана) и вычислите фазовую скорость волны. В одном из наших опытов получилось: $c = \Delta x / \Delta t = 12 \text{ см} / 2 \text{ с} = 6 \text{ см/с}$. Проверьте правильность полученного значения, для чего измерьте скорость перемещения по экрану «горба», «впадины» и нулевого значения элонгации бегущей гармонической волны.

Опыт 6. Связь фазовой скорости с длиной и периодом волны. Докажите, что фазовая скорость гармонической волны равна частному от деления длины волны на период. Для этого с помощью секундомера определите время 10 колебаний светлого пятна в прорези неподвижного планшета и затем вычислите период колебаний T . Пользуясь значением длины волны λ , полученным в опыте 4, по формуле $c = \lambda / T$ вычислите фазовую скорость волны и убедитесь, что в пределах ошибок эксперимента она совпадает со значением, найденным в опыте 5.

Опыт 7. Частота колебаний в точках, через которые проходит волна. Докажите, что при неподвижных источнике и приемнике частота волны, воспринимаемой приемником, равна частоте волны, испускаемой источником. Для этого вплотную к левому краю экрана расположите узкий планшет с прорезью, колеблющаяся точка в которой моделирует источник волны. Второй планшет, моделирующий приемник, расположите на некотором расстоянии от источника. Секундомером измерьте периоды колебаний светлых пятен в прорезях источника и приемника и убедитесь, что они одинаковы. Если расстояние между планшетами кратно половине длины волны, то колебания светлых пятен в прорезях либо синфазны, либо противофазны и непосредственно видно, что частоты их одинаковы.

Опыт 8. Эффект Доплера. Докажите, что при приближении приемника к источнику частота воспринимаемой приемником волны увеличивается, а при удалении уменьшается (*эффект Доплера*). Для этого в условиях предыдущего опыта планшет, моделирующий приемник, перемещайте в направлении распро-

странения волны со скоростью, сравнимой с фазовой, но не достигающей ее. Вы обнаружите, что при приближении приемника к источнику частота колебаний светлого пятна в прорези приемника заметно увеличивается, а при удалении уменьшается, что и подтверждает существование эффекта Доплера для модели гармонической волны.

2.1.6. Компьютерная модель бегущей гармонической волны. Вместо того чтобы собирать установку из генератора звуковой частоты, осциллографа и планшетов с прорезями, для моделирования бегущей гармонической волны можно воспользоваться компьютером. С этой целью на экране дисплея нужно получить бегущую слева направо с небольшой скоростью синусоиду. Теперь осталось только сделать планшеты с прорезями, и все описанные выше опыты можно повторить. Однако вместо этого лучше получить на экране два-три изображения планшетов, с таким расчетом, чтобы их можно было перемещать с произвольными скоростями мышкой вдоль оси синусоиды. На рис. 2.6 показан внешний вид дисплея при работе с рекомендуемой компьютерной моделью бегущей волны.

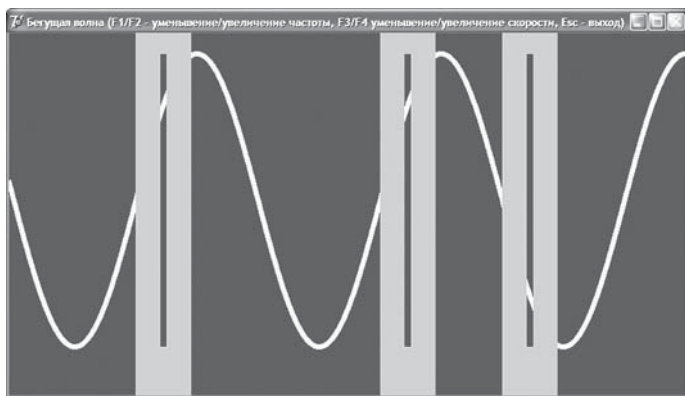


Рис. 2.6. Внешний вид дисплея при работе с моделью бегущей гармонической волны. Изображения планшетов можно перемещать мышкой с различными скоростями

Мы не собираемся учить вас программированию, поэтому приводим здесь готовую программу *volna*, сценарий которой только что обрисован. Перефотографируйте или отсканируйте, распознайте и запустите эту программу. Поработайте с ней, повторив все те эксперименты, которые мы подробно описали, рассматривая физическую модель гармонической волны. Не спешите. Чем полнее вы усвоите основные свойства волны на ее

компьютерной модели, тем быстрее сформируется интуитивное представление о реальной волне, которое так пригодится вам в дальнейшем.

[volna]

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics,
  Controls, Forms, Dialogs, OpenGL;

type
  TForm1 = class(TForm)
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure FormResize(Sender: TObject);
    procedure FormKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
      Shift: TShiftState);
    procedure FormMouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
      Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
    procedure FormMouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState;
      X, Y: Integer);
    procedure FormMouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;
      Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
  public
    DC : HDC;           // контекст устройства (display)
    HRC: HGLRC;         // контекст воспроизведения OpenGL
    Speed, Freq: Integer; // скорость и частота
    Pause: Boolean;     // пауза воспроизведения
    Phi0 : Real;        // фаза
    ActiveBar: Byte;     // перемещаемый планшет
    Bars: array[1..3] of Word; // массив из координат планшето
    procedure glDraw();
    procedure RUN();
  end;
var Form1: TForm1;

implementation

{$R *.dfm}

const
  w  = 68; // ширина планшета
  w1 = 30; // ширина планшета до прорези
  w2 = 8;  // ширина прорези

var OldCursorPos: integer; // предыдущая координата курсора

// Установка формата пикселя
procedure SetDCPixelFormat(hdc : HDC); var
  pfd: TPixelFormatDescriptor;
  nPixelFormat: Integer;
begin
  FillChar (pfd, SizeOf (pfd), 0); // заполнение 0
  pfd.dwFlags := PFD_DRAW_TO_WINDOW or PFD_SUPPORT_OPENGL or
    PFD_DOUBLEBUFFER;
  nPixelFormat := ChoosePixelFormat (hdc, @pfd);
  SetPixelFormat (hdc, nPixelFormat, @pfd);
end;
// Обработка события создания формы
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject); begin
  // Установка начальных значений
  Pause := TRUE; Phi0 := 0; Speed := 1000; Freq := 300;
  Bars[1] := 100; Bars[2] := 300; Bars[3] := 500; ActiveBar := 0;
end;
// Замена Application.Run
procedure TForm1.RUN; var Msg: TMsg; begin
  DC := GetDC(Handle); // получение контекста display
  SetDCPixelFormat(DC); // задание формата пикселя
```

[volna]

```

hrc := wglCreateContext(DC); // создание контекста воспроизведения
wglMakeCurrent(DC, HRC);    // установка контекста
glLineWidth(5.0);           // толщина линии
glTranslatef(-1.0, 0, 0);    // смещение начала координат
Form1.Visible := TRUE;      // отображение формы

while TRUE do
    // Проверка наличия сообщения для окна
    if (PeekMessage(Msg, 0, 0, 0, PM_REMOVE)) then begin
        // Если получено сообщение WM_QUIT, то выход из программы
        if (Msg.message = WM_QUIT) then break
        else begin // иначе обработка полученного сообщения
            TranslateMessage(Msg);
            DispatchMessage(Msg);
        end;
    end else begin
        if not Pause then Phi0 := Phi0 + pi/Speed;
        glDraw; SwapBuffers(DC); // прорисовка
    end;
    // Освобождение контекстов
    wglDeleteContext(HRC); ReleaseDC(Handle, DC);
end;

procedure TForm1.FormResize(Sender: TObject); begin
    glViewport(0, 0, Width, Height); // изменение области вывода
end;

procedure TForm1.FormKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
    Shift: TShiftState);
begin
    // Обработка нажатия клавиш
    case Key of
        VK_ESCAPE: Close;
        VK_SPACE : Pause := not Pause;
        VK_F1    : if Freq < 1000 then inc(Freq, 50);
        VK_F2    : if Freq > 100 then dec(Freq, 50);
        VK_F3    : if Speed < 2000 then inc(Speed, 50);
        VK_F4    : if Speed > 100 then dec(Speed, 50);
    end;
end;

procedure TForm1.glDraw; var
    x, i: integer; y: Real;
begin
    glClearColor(0.0, 0.0, 0.0, 1.0); // цвет фона
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);      // очистка буфера цвета
    // Рисование синусоиды
    glColor3f(1.0, 1.0, 0.0); // цвет примитивов
    glEnable(GL_LINE_SMOOTH);
    glBegin(GL_LINE_STRIP);
    for x := 0 to Form1.Width do begin
        y := Sin(2*pi*x/Freq - Phi0)*0.75;
        glVertex2f(2*x/Width, y);
    end;
    glEnd;
    // Рисование планшетов
    glColor3f(0.5, 0.5, 0.5); // цвет примитивов
    for i := 1 to 3 do begin
        x := Bars[i];
        glRectf(2*x/Width, 1, 2*(x+w1)/Width, -1);
        glRectf(2*(x+w1+w2)/Width, 1, 2*(x+w)/Width, -1);
        glRectf(2*(x+w1)/Width, 1, 2*(x+w1+w2)/Width, 0.75);
        glRectf(2*(x+w1)/Width, -0.75, 2*(x+w1+w2)/Width, -1);
    end;
    glDisable(GL_LINE_SMOOTH);
end;

// Обработка нажатия на кнопку мыши
procedure TForm1.FormMouseDown(Sender: TObject; Button:
    TMouseButton;
    Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
var i: integer; begin

```

[volna]

```

// Поиск планшета, на котором произошло нажатие кнопки мыши
for i := 1 to 3 do
  if (x > Bars[i]) and (x < (Bars[i] + w)) then begin
    ActiveBar := i; OldCursorPos := X; Break;
  end;
end;
// Обработка перемещения курсора мыши
procedure TForm1.FormMouseMove(Sender: TObject; Shift:
TShiftState;
X, Y: Integer);
begin
  if ActiveBar > 0 then begin // перемещение планшета
    Bars[ActiveBar] := Bars[ActiveBar] - (OldCursorPos - X);
    OldCursorPos := X;
  end;
end;
// Обработка отпускания кнопки мыши
procedure TForm1.FormMouseUp(Sender: TObject; Button:
TMouseButton;
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
begin
  ActiveBar := 0;
end; end.

```

2.2. Величины, характеризующие упругую волну

Элонгация, амплитуда, фаза, частота, период, длина волны представляют собой величины, которые характеризуют любую гармоническую волну независимо от ее физической природы. Но упругие волны резко отличаются, например, от электромагнитных, капиллярных или гравитационных на поверхности жидкости. Рассмотрим основные физические величины, характеризующие упругие волны, распространяющиеся в газах, жидкостях и твердых телах.

2.2.1. Смещение, скорость и ускорение в гармонической волне. Частицы среды, в которой распространяется волна, совершают колебательные движения, смещаясь около своих положений равновесия. При этом периодически изменяются, то есть совершают колебания, не только смещения, но и скорости, и ускорения колеблющихся частиц. Скорость есть первая производная, а ускорение — вторая производная смещения по времени, поэтому в гармонической волне изменения скорости и ускорения колеблющихся частиц происходят также по гармоническим законам. Значит, в зависимости от решаемой задачи упругую гармоническую волну в среде можно рассматривать как волну смещений, скоростей или ускорений и т. д.

Чтобы получить уравнение *волны скоростей*, продифференцируем выражение (2.7) $s = a \sin(\omega t - kx)$ по времени:

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega a \cos(\omega t - kx) = v_m \cos(\omega t - kx). \quad (2.9)$$

Величину v называют *колебательной скоростью* волны, чтобы не путать ее с величиной c — фазовой скоростью распространения волны (см. п. 2.1.4). Амплитуда колебательной скорости v_m равна произведению амплитуды смещения на частоту волны $v_m = a\omega$. Колебательная скорость показывает, с какой скоростью при распространении волны движутся (колеблются) частицы среды в точке с координатой x в момент времени t . Из уравнения (2.9) видно, что колебательная скорость частиц в бегущей волне сдвинута по фазе относительно смещения (2.7) на $\pi/2$.

Продифференцировав по времени выражение (2.9) для колебательной скорости, получим уравнение *волны ускорений* b :

$$b = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -\omega^2 a \sin(\omega t - kx) = -b_m \sin(\omega t - kx). \quad (2.10)$$

Сопоставляя эту формулу с уравнением волны (2.7), замечаем, что в упругой волне ускорения колеблющихся частиц противофазны смещениям, причем их амплитуда b_m равна произведению амплитуды смещения на квадрат частоты волны: $b_m = a\omega^2$.

2.2.2. Давление в гармонической волне. При возбуждении продольной упругой волны в газообразной и жидкой среде возникают периодически следующие друг за другом в направлении распространения волны области сжатия и разрежения. Появляющееся при этом переменное давление называется *звуковым давлением*.

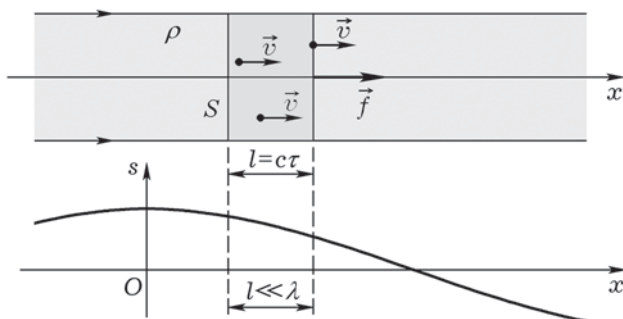


Рис. 2.7. К вычислению переменного звукового давления в гармонической упругой волне

Чтобы получить аналитическое выражение для переменного звукового давления, рассмотрим площадку S , перпендикулярную направлению распространения продольной волны (рис. 2.7). В некоторый момент времени t колеблющиеся частицы проходят через данную площадку с колебательной скоростью, выражающейся формулой (2.9). Если за небольшое время τ волна проходит расстояние l со скоростью $c = l/\tau$, то в движение

приходит объем среды $V = Sl = Sct$, скорость которого равна колебательной скорости v . Импульс этого объема среды равен $mv = \rho Vv = \rho Sctv$, где ρ — плотность среды, в которой распространяется волна. С другой стороны, импульс рассмотренного объема равен произведению силы давления f на время τ , в течение которого она действует: $f\tau = p'S\tau$, где p' — переменное звуковое давление. Так как $mv = f\tau$, то приравнявая правые части двух предшествующих выражений, имеем $\rho Sctv = p'S\tau$. Производя необходимые сокращения и учитывая формулу (2.9), получаем, что переменное звуковое давление в гармонической продольной волне описывается уравнением

$$p' = \rho cv = \rho caw \cos(\omega t - kx) = p_m \cos(\omega t - kx), \quad (2.11)$$

где $p_m = \rho cv_m = \rho caw$ — амплитуда звукового давления.

Полное давление при распространении упругой волны в газообразной или жидкой среде мы получим, добавив к этому выражению давление p_0 в невозмущенной среде при отсутствии в ней волны:

$$p = p_0 + p' = p_0 + \rho cv = p_0 + \rho caw \cos(\omega t - kx). \quad (2.12)$$

Сравнивая это выражение с формулой (2.9), приходим к выводу, что звуковое давление в продольной упругой волне изменяется синфазно колебательной скорости этой волны.

2.2.3. Деформация в гармонической волне. Будем считать теперь, что продольная гармоническая упругая волна распространяется в твердом теле вдоль оси x . Пусть для некоторого момента времени смещение частиц среды, вызванное упругой волной, может быть представлено графиком, изображенным на рис. 2.8 снизу. Тогда частицы среды, находящиеся в точках

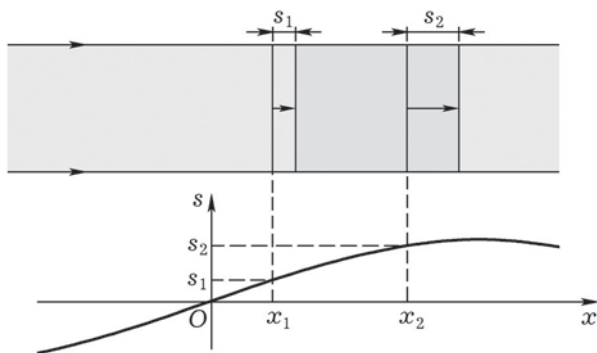


Рис. 2.8. К нахождению относительной деформации среды в гармонической упругой волне

с координатами x_1 и x_2 , окажутся смещенными из положения равновесия на величины s_1 и s_2 соответственно. Понятно, что при этом объем среды между точками x_1 и x_2 проходящая упругая волна деформировала на величину $s_2 - s_1$ (рис. 2.8, сверху). Относительная деформация части твердого тела равна отношению абсолютной деформации к длине этой части тела в недеформированном состоянии:

$$\varepsilon = \frac{s_2 - s_1}{x_2 - x_1}. \quad (2.13)$$

Переходя в этом равенстве к пределу и дифференцируя уравнение волны (2.7) $s = a \sin(\omega t - kx)$ по координате x , получаем, что уравнение волны деформаций имеет вид

$$\varepsilon = \frac{ds}{dx} = -ka \cos(\omega t - kx) = -\frac{\omega a}{c} \cos(\omega t - kx). \quad (2.14)$$

Отсюда следует, что при распространении гармонической волны в твердом теле по нему бежит гармоническая волна деформаций, которая противофазна волне скоростей (2.9). Понятно, что выражение (2.14) относится также к упругим волнам в жидкостях и газах.

2.2.4. Энергия волны. Колебания каждой частицы среды в волне происходят около положения равновесия частицы в отсутствие волны, поэтому переноса вещества в волне нет. Однако поскольку в колебательное движение приходят частицы среды одна за другой, вместе с распространением волны происходит перенос энергии. Полная энергия волны складывается из кинетической энергии колеблющихся частиц среды и потенциальной энергии деформации в областях сжатия и разрежения среды. Найдем кинетическую и потенциальную энергии небольшого объема среды, сквозь который проходит упругая волна.

Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v , равна $W_k = mv^2/2$. Значит кинетическая энергия малого объема V среды, внутри которого колебательные скорости частиц можно считать одинаковыми, при распространении в ней упругой волны выражается формулой

$$W_k = \frac{\rho V v^2}{2}, \quad (2.15)$$

где ρ — плотность, v — колебательная скорость частиц среды.

Чтобы найти потенциальную энергию W_p , рассмотрим цилиндрический объем V площадью сечения S и длиной L , расположенный вдоль направления распространения волны (рис. 2.9). Не ограничивая общности рассуждений, можно считать, что в некоторый момент времени левое основание цилиндрического объе-

ма остается неподвижным, а правое основание бегущая волна смещает в направлении своего распространения на величину l .

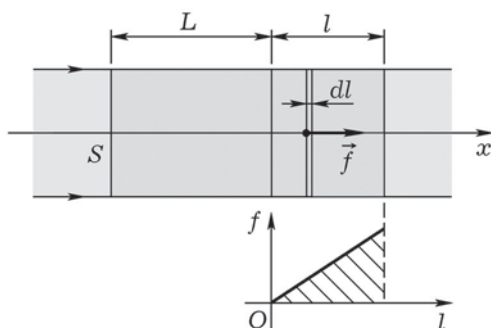


Рис. 2.9. К вычислению потенциальной энергии деформированного участка среды в гармонической упругой волне

Тогда на него начинает действовать сила упругости, равная по модулю силе, под действием которой происходит деформация. Она определяется как произведение механического напряжения σ на площадь сечения S : $f = \sigma S$. Напряжение, согласно закону Гука, пропорционально относительному удлинению ε : $\sigma = E\varepsilon$, где E — модуль Юнга. В нашем случае относительное удлинение (деформация) $\varepsilon = l/L$. Исходя из сказанного, получаем

$$f = \sigma S = E\varepsilon S = ES \frac{l}{L}. \quad (2.16)$$

Потенциальная энергия деформированного участка среды численно равна работе силы упругости, которая вследствие зависимости силы от величины деформации определяется интегрированием:

$$W_{\text{п}} = \int_0^l f \, dl = \frac{ES}{L} \int_0^l l \, dl = \frac{ES}{L} \frac{l^2}{2} = \frac{ESL}{2} \varepsilon^2 = \frac{EV}{2} \varepsilon^2. \quad (2.17)$$

Вместо того, чтобы вычислять интеграл, можно найти площадь под графиком функции $f = f(l)$ (рис. 2.9).

Формулы (2.15) и (2.17) позволяют вычислить кинетическую и потенциальную энергии, заключенные в небольшом объеме V , через который проходит упругая волна. Понятно, что более общая энергетическая характеристика волны не должна зависеть от объема среды.

Акустическая энергия, заключенная в единице объема среды, через которую проходит упругая волна, называется *плотностью энергии*:

$$w = \frac{W}{V}, \quad (2.18)$$

где W — полная энергия, которая включает кинетическую W_k и потенциальную W_p энергии, V — объем среды, обладающий энергией W . Плотность кинетической энергии из (2.15)

$$w_k = \frac{\rho v^2}{2}. \quad (2.19)$$

Чтобы найти плотность потенциальной энергии $w_p = W_p/V$, разделим выражение (2.17) на объем V . Тогда

$$w_p = \frac{E \varepsilon^2}{2}. \quad (2.20)$$

Плотность полной энергии равна сумме плотности кинетической и потенциальной энергий:

$$w = \frac{\rho v^2}{2} + \frac{E \varepsilon^2}{2}. \quad (2.21)$$

Колебательная скорость определяется выражением (2.9), а деформация среды определяется отношением (2.14). Поэтому плотность полной энергии составляет:

$$w = \frac{\rho}{2} \omega^2 a^2 \cos^2(\omega t - kx) + \frac{E}{2} \frac{\omega^2 a^2}{c^2} \cos^2(\omega t - kx). \quad (2.22)$$

Закон сохранения энергии требует, чтобы в упругой волне максимальные значения потенциальной и кинетической энергий были равны между собой. Поэтому из предыдущей формулы следует:

$$\frac{\rho}{2} \omega^2 a^2 = \frac{E}{2} \cdot \frac{\omega^2 a^2}{c^2}.$$

Отсюда, производя очевидные сокращения, получаем, что фазовая скорость распространения продольной упругой волны в твердом теле:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.23)$$

где E — модуль упругости Юнга, ρ — плотность вещества твердого тела.

Подставляя полученное значение скорости c в формулу (2.22) для плотности полной энергии, имеем

$$w = \rho \omega^2 a^2 \cos^2(\omega t - kx). \quad (2.24)$$

Среднее значение квадрата косинуса по времени t и координате x равно $1/2$, следовательно, средняя плотность энергии равна

$$\bar{w} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 a^2 = 2\pi^2 \rho a^2 \nu^2 = \frac{1}{2} \rho v_m^2, \quad (2.25)$$

где v_m — амплитуда колебательной скорости. Эту формулу легко запомнить, так как она напоминает выражение для кинетической энергии движущегося тела.

На рис. 2.10 даны моментальные фотографии гармонической волны смещений и соответствующей ей волны плотностей полной энергии. Видно, что среднее значение плотности полной энергии по координате в гармонической волне равно половине его максимального значения.

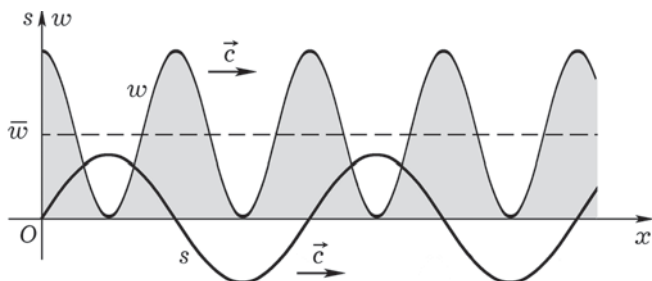


Рис. 2.10. Моментальные фотографии волны смещений и плотностей энергии

2.2.5. Интенсивность волны. Еще одной общепринятой характеристикой упругой волны является *интенсивность*, которая определяется как количество энергии, переносимой волной за единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной к направлению распространения волны

$$I = \frac{W}{St}. \quad (2.26)$$

Полная энергия волны W в некотором объеме V равна произведению средней по времени энергии на этот объем. Так как скорость волны равна c , то за время t через площадку S волна переносит энергию, заключенную в объеме среды $V = S \cdot ct$, значит $W = \bar{w}Sct$. Подставляя это выражение в формулу (2.26), получаем, что интенсивность I равна произведению средней плотности энергии на скорость распространения волны:

$$I = c\bar{w} = \frac{1}{2} \omega^2 a^2 \rho c = 2\pi^2 a^2 \nu^2 \rho c = \frac{1}{2} v_m^2 \rho c. \quad (2.27)$$

В системе единиц СИ интенсивность упругой волны измеряется в Вт/м². В ультразвуке часто оказывается удобнее использовать более крупную единицу Вт/см², что в дальнейшем мы и будем делать.

2.2.6. Волновое сопротивление среды. Произведение ρc , входящее в формулу (2.27), получило название *волнового* или *акустического сопротивления среды*. Обращаясь к формулам

(2.11) и (2.26), замечаем, что амплитуда звукового давления связана с интенсивностью соотношением

$$I = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho c}, \quad (2.28)$$

которое показывает, что интенсивность упругой волны прямо пропорциональна квадрату амплитуды звукового давления и обратно пропорциональна акустическому сопротивлению среды.

Из формулы (2.11) видно, что отношение амплитуд звукового давления и колебательной скорости равно акустическому сопротивлению среды:

$$\frac{p_m}{v_m} = \rho c. \quad (2.29)$$

От соотношения между значениями волновых сопротивлений двух граничащих сред зависит то, как на границе раздела сред поведет себя упругая волна. Чем больше друг от друга отличаются волновые сопротивления, тем меньшая часть энергии перейдет из одной среды в другую и большая — отразится, и наоборот. Совершенно разные среды, обладающие одинаковыми волновыми сопротивлениями, вообще не дают отраженной волны от границы раздела. Если волновое сопротивление среды, из которой падает волна больше того, которое характеризует вторую среду, то фаза волны при отражении не изменяется, и наоборот, если волновое сопротивление первой среды меньше, чем второй, то волна отражается с противоположной по знаку фазой.

2.2.7. Затухание волны. При распространении упругой волны одни слои среды вследствие колебательного движения частиц перемещаются относительно других, и благодаря трению среда нагревается, а интенсивность упругой волны уменьшается. Явление уменьшения интенсивности упругой волны за счет перехода ее энергии во внутреннюю энергию среды получило название *поглощения* или *затухания* волны. Поглощение упругой волны зависит от свойств среды (вязкости, теплопроводности) и частоты волны. Как правило, чем выше частота, тем быстрее волна затухает по мере распространения в среде.

Для того чтобы получить аналитическое выражение для закона поглощения, достаточно допустить, что в слое среды небольшой толщины dx (рис. 2.11) интенсивность волны уменьшается на величину dI , пропорциональную самой интенсивности I и толщине слоя: $dI = -\alpha I dx$ (знак «минус» означает, что с ростом координаты x интенсивность I волны уменьшается). Разделив переменные в написанном дифференциальном уравнении и

проинтегрировав его, получаем

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\alpha \int_0^x dx \quad \text{или} \quad \ln I - \ln I_0 = \ln \frac{I}{I_0} = -\alpha x.$$

Отсюда интенсивность при распространении упругой волны изменяется по экспоненциальному закону

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (2.30)$$

где α — величина, обратная расстоянию, на котором интенсивность уменьшается в e раз, называется *коэффициентом поглощения* волны по интенсивности.

С другими величинами, характеризующими упругую волну, мы будем знакомиться по мере возникающей в этом необходимости при рассмотрении конкретных физических явлений акустики и ультраакустики.

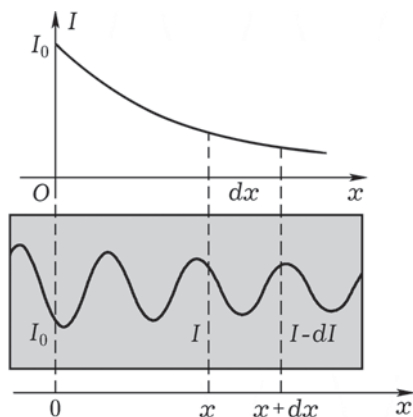


Рис. 2.11. К выводу закона поглощения упругой волны

2.3. Экспериментальное исследование упругой волны в воздухе

Уравнение гармонической упругой волны и величины, характеризующие упругую волну, вам уже знакомы. Гармоническую волну вы достаточно подробно изучили на физической и компьютерной моделях. Настало время сопоставить теоретические сведения с реальностью. Для этого в качестве объекта исследования выберем звук в воздухе и экспериментально докажем, что он представляет собой упругую волну, близкую к гармонической, то есть такую, которая может быть описана уравнением (2.7) $s = a \sin(\omega t - kx)$. При этом мы будем использовать тот язык, который дается теорией (см. § 2.1, 2.2): колебание, амплитуда, фаза, частота, длина волны и т. д. — вся эта терминология найдет применение в наших рассуждениях и экспериментах.

2.3.1. Доказательство волновой природы звука. Общеизвестно, что звук — это упругая волна, то есть возмущение воздуха, периодичное в пространстве и во времени. Но откуда мы это знаем? Очевидно, это обобщение многочисленных фактов,

которые получены в физических исследованиях, проведенных, начиная с конца XVI века. Мы хотим независимо от выполненных ранее исследований *серией простых опытов доказать*, что излучаемый, например, динамиком звук действительно является упругой волной, которая может быть описана гармоническим уравнением волны (2.7) $s = a \sin(\omega t - kx)$.

Для этого нужно в эксперименте установить, что в любой точке *звукового поля* переменное звуковое давление изменяется с течением времени t по гармоническому закону с временным периодом T , и в любой момент времени вдоль оси x , направленной от источника, звуковое давление изменяется также по гармоническому закону с пространственным периодом λ .

Сделать это проще всего, используя в качестве приемника звука *микрофон* — прибор, преобразующий давление в электрический сигнал.

Если на выходе микрофона, находящегося в звуковом поле, появится переменное напряжение, значит на микрофон действует переменное звуковое давление, а оно может возникнуть, если в среде имеется переменное упругое возмущение.

Гармоничность колебания звукового давления и, следовательно, периодичность звуковой волны во времени можно установить по осциллограмме принятого сигнала. Если во всех точках звукового поля осциллограмма звукового давления представляет собой синусоиду одного и того же периода, то исследуемая звуковая волна периодична во времени.

Периодичность звуковой волны в пространстве можно определить, сравнивая идущий от микрофона сигнал с *опорным сигналом*, имеющим ту же частоту и амплитуду. Уравнение волны (2.7) $s = a \sin(\omega t - kx)$ показывает, что при монотонном изменении координаты x монотонно изменяется и фаза волны $\omega t - kx$. Фаза же опорного сигнала остается неизменной, а результат сложения исследуемого и опорного сигналов зависит от их разности фаз. Амплитуда результирующего сигнала максимальна, когда фаза исследуемого сигнала совпадает с фазой опорного, и равна нулю, когда фазы этих сигналов противоположны. Поэтому, если при перемещении микрофона в звуковом поле будет обнаружено периодическое изменение амплитуды результирующего колебания, то периодичность звуковой волны в пространстве будет доказана.

2.3.2. Осциллограмма звуковой волны. Исследование звука на слух не позволяет получить количественные результаты. Звуковые колебания диффузора динамика можно наблюдать только при очень низких частотах и при достаточно больших амплитудах. Таким образом, исследовать звуковые

колебания непосредственно органами чувств практически невозможно.

Поэтому вместо звукового колебания для исследования используют его *осциллограмму* — зависимость элонгации колеблющейся величины от времени.

Существует немало методов получения осциллограммы колебания. Например, можно к колеблющемуся телу прикрепить иглу и провести ею по закопченной пластинке; оставшийся на пластинке волнистый след и будет представлять собой осциллограмму смещений иглы. Можно на тело, совершающее колебание, приклеить маленькое зеркальце и направить на него пучок света от лазера так, чтобы он отразился сначала на вращающемся зеркале, а затем — на экране; тогда на экране получится осциллограмма колебания, нарисованная световым пятном.

Подобные способы устарели и в настоящее время для получения осциллограммы используются либо электронный осциллограф, либо компьютер. Но эти приборы работают только с электрическими колебаниями (*сигналами*). Поэтому звуковые колебания нужно вначале преобразовать в электрические.

Как уже говорилось, для звуковой волны в воздухе в качестве такого преобразователя следует использовать микрофон — устройство, напряжение на выходе которого в идеале пропорционально звуковому давлению в той области пространства, где он расположен. Микрофоны бывают разных типов: угольные, электромагнитные, электродинамические, конденсаторные и т. д.

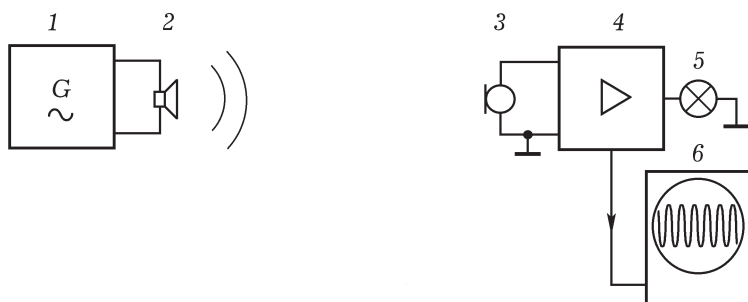


Рис. 2.12. Функциональная схема экспериментальной установки для изучения звуковой волны в воздухе: 1 — генератор переменного напряжения звуковой частоты; 2 — динамик; 3 — микрофон; 4 — усилитель звуковой частоты; 5 — лампа накаливания; 6 — электронный осциллограф

В наши дни наиболее удобен *электретный микрофон*, обладающий постоянной чувствительностью в широком частотном диапазоне.

Переменное напряжение на выходе микрофона мало по сравнению с напряжением на динамике и неспособно дать сигнал,

непосредственно воспринимаемый органами чувств. Поэтому переменное напряжение с микрофона следует вначале усилить, а уже затем подать на устройства, визуализирующие зависимость этого напряжения от времени и его амплитуду. Такими устройствами могут явиться электронный осциллограф и лампа накаливания.

На рис. 2.12 представлена функциональная схема возможной экспериментальной установки: к генератору переменного напряжения звуковой частоты подключен динамик, испускающий звуковую волну; сигнал с микрофона поступает на вход усилителя и после усиления — на лампу накаливания и осциллограф.

2.3.3. Индикатор интенсивности звука. Это прибор, который позволяет по яркости свечения лампы накаливания или светодиода оценить интенсивность звука в той точке, где расположен микрофон. Напомним, что интенсивность, то есть энергия звука, проходящая за единицу времени через единицу площади, пропорциональна квадрату амплитуды звуковой волны (п. 2.2.5). Поэтому индикатор интенсивности позволяет оценивать не только интенсивность, но и амплитуду звука.

На рис. 2.13 изображена принципиальная схема индикатора интенсивности звука. Прибор состоит из предварительного усилителя напряжения, выполненного на операционном усилителе DA1, и усилителя мощности, собранного на транзисторе VT1.

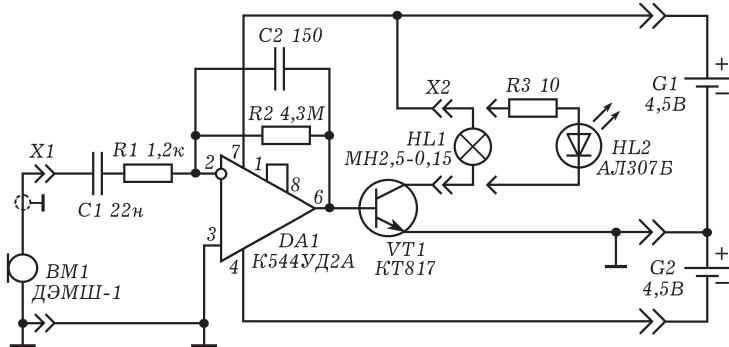


Рис. 2.13. Принципиальная схема индикатора интенсивности звука

В качестве микрофона ВМ1 использован электромагнитный капсюль типа ДЭМШ-1 (п. 1.4.2). Такой микрофон реагирует не непосредственно на звуковое давление, а на разность давлений с противоположных сторон его мембраны. Достоинством электромагнитного капсюля является простота включения, недостатком — неравномерная частотная характеристика с резко выраженными резонансными частотами. Электрический сигнал

с микрофона через разделительный конденсатор $C1$ и резистор $R1$ поступает на инвертирующий вход операционного усилителя $DA1$. Резистор $R2$ определяет величину отрицательной обратной связи в усилителе; отношение сопротивлений R_2 и R_1 дает коэффициент усиления: $K = R_2/R_1$. Конденсатор $C2$ шунтирует резистор $R2$ по переменной составляющей и повышает помехоустойчивость усилителя. Усиленный сигнал поступает на базу транзистора $VT1$, нагрузкой которого является лампа накаливания $HL1$ или последовательно включенные резистор $R3$ и светодиод $HL2$. Питание прибора осуществляется от двух последовательно соединенных батарей, дающих напряжение 4,5 В.

2.3.4. Индикация фазы звуковой волны. Непосредственное определение фазы колебания невозможно, поскольку фаза — это безразмерный аргумент гармонической функции, не являющийся физической величиной. Поэтому фазу колебания тем или иным способом связывают с амплитудой, которая, как мы уже знаем, легко поддается измерению. Одним из способов сведения изменения фазы колебания к изменению амплитуды является использование опорного колебания неизменной фазы и той же частоты и амплитуды, что и исследуемое (см. п. 2.3.1).

Пусть от находящегося в звуковом поле микрофона на вход усилителя поступает исследуемое колебание $s_1 = a \sin(\omega t - kx)$. Подадим на тот же вход опорное колебание $s_2 = a \sin \omega t$, амплитуда и частота которого равны амплитуде и частоте исследуемого. Результирующее колебание представляет собой сумму исследуемого и опорного и имеет ту же частоту, что и складываемые колебания:

$$s = s_1 + s_2 = 2a \cos \frac{kx}{2} \sin \left(\omega t - \frac{kx}{2} \right). \quad (2.31)$$

Из полученной формулы видно, что результирующее колебание условно можно считать гармоническим, амплитуда которого $2a \cos(kx/2)$ медленно меняется с изменением координаты. Яркость свечения индикаторной лампы пропорциональна интенсивности или квадрату амплитуды результирующего колебания

$$I \sim 4a^2 \cos^2 \frac{kx}{2} = 2a^2(1 + \cos kx), \quad (2.32)$$

где волновое число $k = 2\pi/\lambda$. Отсюда следует, что в поле гармонической звуковой волны яркость свечения индикаторной лампы должна быть гармонической функцией координаты, период которой равен длине звуковой волны λ .

2.3.5. Экспериментальная установка. На рис. 2.14 представлена функциональная схема установки, обеспечивающей экспериментальное доказательство существования гармонических

упругих волн в воздухе. Подключенный к генератору динамик является источником звука. Микрофон, усилитель и лампа на-

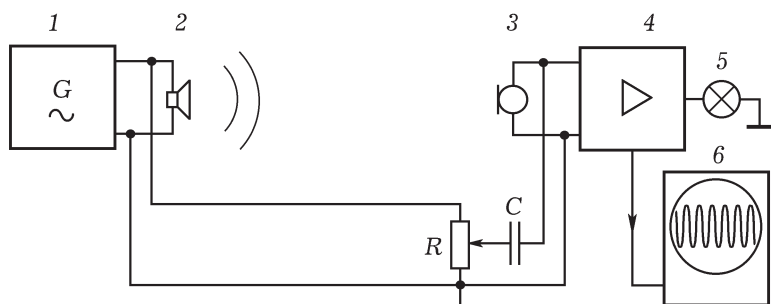


Рис. 2.14. Функциональная схема экспериментальной установки для обоснования временной и пространственной периодичности звуковой волны в воздухе: 1 — электронный генератор звуковой частоты; 2 — динамик; 3 — микрофон; 4 — усилитель звуковой частоты; 5 — индикаторная лампа накаливания; 6 — электронный осциллограф

каливания образуют *звуковой индикатор*. В состав индикатора также входят потенциометр R , предназначенный для регулировки амплитуды опорного сигнала, и конденсатор C , предотвращающий шунтирование входа усилителя потенциометром. Электронный осциллограф позволяет получить осциллограмму звукового давления.

Принципиальная схема рекомендуемого звукового индикатора изображена на рис. 2.15. Она отличается от рассмотренной выше схемы индикатора интенсивности звука (см. рис. 2.13) тем, что добавлены потенциометр R и конденсатор C для работы

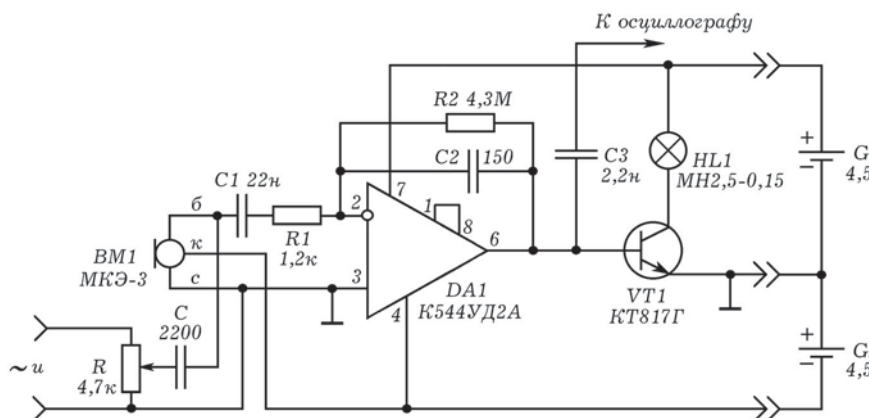


Рис. 2.15. Принципиальная схема индикатора интенсивности и фазы звуковой волны

с опорным сигналом, а также конденсатор $C3$, обеспечивающий подключение к усилителю осциллографа. Приемником звука служит электретный микрофон типа МКЭ-3; его выводы: *белый* — выход, *красный* — питание —4,5 В, *синий* — общий. В принципе

вместо электретного микрофона можно использовать электромагнитный капсюль, например, типа ДЭМШ-1.

На рис. 2.16 дана фотография индикатора интенсивности и фазы звуковой волны. Чтобы устройство прибора было видно, стойка прибора выполнена из оргстекла. Сверху на стойке расположена индикаторная лампа. Под ней закреплен микрофон. Усилитель собран методом навесного монтажа. В центре стойки расположен потенциометр, снизу находятся разъемы для опорного сигнала, осциллографа и питания.



Рис. 2.16. Индикатор интенсивности и фазы звуковой волны

2.3.6. Экспериментальное обоснование существования гармонической звуковой волны. На демонстрационном столе в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.14, соберите

экспериментальную установку, состоящую из генератора звуковой частоты типа ФГ-100, динамика типа 2ГД-36, самодельного индикатора (рис. 2.16) и электронного осциллографа, например, типа С1-65А (рис. 2.17). Микрофон индикатора расположите на расстоянии 0,5–1,0 м от динамика.

Опыт 1. Источник звука. Включите генератор, индикатор и осциллограф. Вы услышите звук, увидите свечение индикаторной лампы и будете наблюдать осциллограмму. Прикоснитесь к звучащему динамику и убедитесь в том, что его диффузор колеблется. Таким образом, опыт показывает, что колеблющийся диффузор динамика является источником звука в воздухе.

Опыт 2. Интенсивность звука. Увеличьте переменное напряжение на динамике. При этом вы услышите звук все возрастающей громкости, увидите, что амплитуда осциллограммы растет и яркость свечения индикаторной лампы увеличивается. Таким образом, интенсивность звука определяется амплитудой колебания источника.

Опыт 3. Частотный диапазон звука. Оставьте напряжение на динамике неизменным и регулируйте его частоту. Это приведет к изменению тона слышимого звука. Чем меньше частота генератора, тем ниже тон звука и тем хуже звук слышен. При частотах меньше 20 Гц слышимый звук переходит в инфразвук и перестает восприниматься на слух; при частотах выше 20 кГц он переходит в ультразвук, который тоже неслышим. Однако осциллограммы сигналов с микрофона показывают, что неслышимые инфра- и ультразвуки реально существуют.

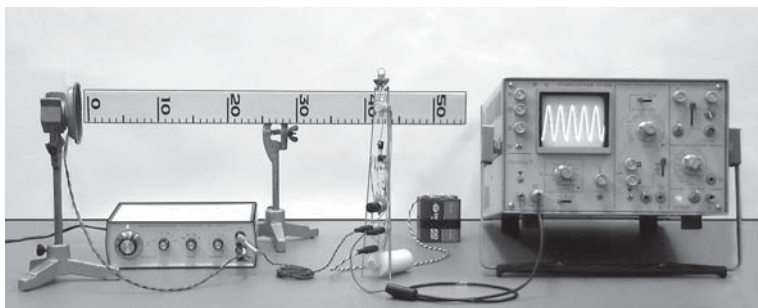


Рис. 2.17. Внешний вид экспериментальной установки для обоснования существования гармонической звуковой волны в воздухе

Опыт 4. Колебания звукового давления. На генераторе установите частоту звука порядка 5 кГц. Выберите необходимую амплитуду напряжения генератора, потенциометром установите нулевую амплитуду опорного сигнала, отрегулируйте чувствительность, частоту развертки и синхронизацию осциллографа.

В результате вы будете наблюдать свечение лампы индикатора и осциллограмму принимаемого микрофоном сигнала. По яркости свечения можно судить об интенсивности звука, а по осциллограмме — об амплитуде, частоте и характере звуковых колебаний среды вблизи микрофона. Опыт свидетельствует о периодичности во времени звукового давления в точке, где расположен микрофон.

По осциллограмме определите период T колебания давления в звуковой волне. Обратите внимание на то, что осциллограмма сигнала с микрофона похожа на синусоиду. Уравнение синусоиды, период которой равен 2π , имеет вид: $y = y_0 \sin z$. Попробуем уравнение колебаний звукового давления записать в таком же виде. Для этого нужно вместо безразмерного аргумента z использовать время t . Но время имеет размерность, поэтому подставить его непосредственно под знак синуса нельзя. А вот если перед t поставить коэффициент $2\pi/T$, то для звукового

давления получится выражение

$$\Delta p = p_0 \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (2.33)$$

которое, как вы хорошо знаете, имеет вполне определенный физический смысл. Теперь осталось измерить (в условных единицах) по осциллограмме на экране осциллографа амплитуду звукового давления p_0 , по формуле (2.33) вычислить значения Δp , на прозрачной бумаге в масштабе построить график функции (2.33), приложить его к экрану осциллографа и убедиться, что он в пределах ошибок опыта совпадает с осциллограммой.

Отсюда следует, что колебания звукового давления в каждой точке области, в которой в условиях рассматриваемого эксперимента существует звук, происходят по гармоническому закону.

Опыт 5. Распространение колебаний звукового давления в среде. Переместите микрофон в звуковом поле, изменяя расстояние между ним и источником звуковых колебаний. При этом меняются амплитуда и интенсивность звука, но частота остается неизменной. Регулируя частоту и амплитуду выходного напряжения генератора, наблюдайте изменения соответствующих параметров звука. Из этого и предшествующего опытов следует вывод, что звук представляет собой распространяющиеся от источника колебания давления среды.

Опыт 6. Гармоническое распределение колебаний в среде. Потенциометром увеличивайте амплитуду опорного сигнала до тех пор, пока она не станет равна амплитуде звукового сигнала. Для достижения этого переместите индикатор в точку, где звуковое колебание происходит в противофазе с опорным — здесь яркость горения лампы минимальна — и отрегулируйте опорный сигнал так, чтобы индикаторная лампа погасла совсем.

После этого, не меняя опорного сигнала, перемещайте индикатор в направлении распространения звука, и вы увидите, что яркость горения индикаторной лампы периодически плавно изменяется. Линейкой измерьте пространственный период звукового поля λ . Допустим, что обнаруженное изменение происходит в соответствии с формулой $y = y_0 \sin z$, то есть по гармоническому закону.

Найдем уравнение, описывающее гармоническое распределение гармонических колебаний в области звукового поля. Замечаем, что с этой целью в аргумент синуса уравнения гармонических колебаний (2.33) $\Delta p = p_0 \sin(2\pi/T)t$ достаточно добавить слагаемое, подобное этому аргументу, но вместо времени t имеющее координату x , а вместо временного периода T — пространственный период λ . Поскольку чем дальше расположена точка с координатой x от источника звука, тем позже происходят в ней такие

же колебания, и перед вторым слагаемым в аргументе синуса нужно поставить знак «минус»:

$$\Delta p = p_0 \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\lambda} x \right). \quad (2.34)$$

Это уравнение распределения колебаний в звуковом поле получено непосредственно из анализа результатов эксперимента. Оно показывает, что звук представляет собой периодический во времени и в пространстве процесс, который в первом приближении может быть описан гармонической функцией. Обозначив $2\pi/T = \omega$ и $2\pi/\lambda = k$, получаем уравнение гармонической волны давлений $\Delta p = p_0 \sin(\omega t - kx)$

Опыт 7. Фазовая скорость звуковой волны в воздухе. Определите фазовую скорость звуковой волны в воздухе. Для этого найдите отношение пространственного периода волны, измеренного в опыте 6, к временному периоду, измеренному в опыте 4: $c = \lambda/T$, и убедитесь, что в пределах ошибок опыта оно совпадает с табличным значением скорости звука в воздухе $c = 340$ м/с.

Таким образом, программа этого параграфа выполнена полностью: вы доказали, что звук определенной частоты в воздухе является упругой волной, близкой к гармонической.

Глава 3

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ УПРУГОЙ ВОЛНЫ

С магнитострикционным эффектом мы кратко познакомились в первой главе. Теперь постараемся подробнее разобраться с физической сущностью этого эффекта и его применением для получения и приема ультразвуковых волн. Магнитострикционные преобразователи электрических колебаний в механические и механических в электрические часто используются на практике. Они отличаются простотой и надежностью конструкции, достаточно высокой эффективностью, технологичны и дешевы. Особенно удобны магнитострикционные излучатели в учебных экспериментальных исследованиях упругих волн. Поэтому в главе рассмотрены эксперименты, раскрывающие физическую сущность магнитострикционного эффекта и описаны конструкции магнитострикционных излучателей звука и ультразвука.

3.1. Прямой магнитострикционный эффект

Сущность *прямого магнитострикционного эффекта* состоит в изменении размеров (деформации) *ферромагнетика* при изменении окружающего магнитного поля. Впервые это явление обнаружено английским ученым Джоулем в 1847 году.

Наиболее ярко магнитострикционный эффект проявляется у никеля, кобальта, железа и некоторых ферромагнитных сплавов. На практике также часто используют искусственный ферромагнитный материал — феррит.

3.1.1. Явление магнитострикции. Идея опытов по наблюдению прямого магнитострикционного эффекта очень проста и состоит в следующем. Ферромагнитный материал помещают в магнитное поле, создаваемое, например, катушкой с током, и тем или иным способом наблюдают изменение размеров ферромагнетика. Сложность этих экспериментов заключается в том, что магнитострикционный эффект очень мал по величине. Например, никелевый стержень длиной 100 мм укорачивается в магнитном поле на величину порядка нескольких тысячных миллиметра. Поэтому необходимо найти простые способы, позволяющие измерить столь незначительную величину.



ДЖОУЛЬ Джеймс Прескотт (1818–1889). Английский физик. Внес значительный вклад в исследования электромагнетизма, тепловых явлений, физики низких температур, в экспериментальное обоснование закона сохранения энергии. Установил зависимость выделяемого в проводнике количества тепла от силы тока, сопротивления проводника и времени. Обнаружил и изучил явления магнитострикции и насыщения при намагничивании ферромагнетиков.

Вспомним явление теплового расширения, которое также не слишком велико. Для его обнаружения в учебных опытах используют, например, биметаллическую пластинку, которая состоит из соединенных вместе одинаковых полосок из двух металлов с разными коэффициентами теплового расширения. При нагревании такой пластинки составляющие ее полоски удлиняются в разной степени, в результате чего пластинка изгибается. Есть еще один простой способ обнаружить изменение размеров стержня при нагревании: нужно прикоснуться его боковой поверхностью к лежащей на ровной поверхности игле небольшого радиуса. Тогда удлиняющийся стержень будет поворачивать иглу на угол, который нетрудно измерить оптическим методом по смещению зайчика, отраженного от закрепленного на игле зеркала.

Пригодны ли эти методы для исследования магнитострикционного эффекта? Наиболее убедительный ответ на этот вопрос может дать только прямой эксперимент. Чтобы вы смогли продумать его условия, на рис. 3.1 приведены графики зависимости линейной деформации некоторых ферромагнитных материалов от напряженности магнитного поля. Из графиков видно, что наиболее сильно и самым простым образом магнитострикционный эффект проявляется у никеля. Более сложна зависимость деформации от напряженности магнитного поля у железа и литого кобальта. Железный стержень, например, в слабом магнитном поле удлиняется (*положительная магнитострикция*), а в сильном — укор-

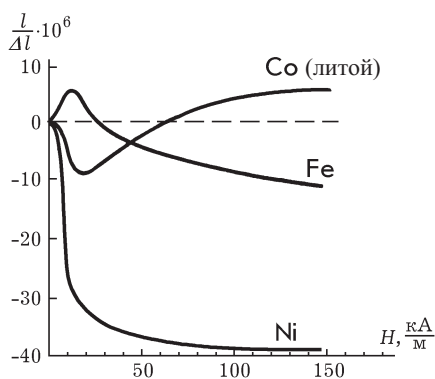


Рис. 3.1. Графики зависимости деформации стержней из никеля, железа и литого кобальта от напряженности магнитного поля, направленного по оси этих стержней

рачивается (*отрицательная магнитострикция*). В доступной литературе отсутствуют данные о магнитострикционном эффекте феррита, поэтому вы должны самостоятельно исследовать на магнитострикцию этот материал.

3.1.2. Наблюдение прямого магнитострикционного эффекта. Начать следует с качественных опытов, доказывающих сам факт существования магнитострикционного эффекта. Чтобы заметить малую величину деформации ферромагнетика, попробуем использовать *биметаллический элемент*, состоящий из полоски исследуемого ферромагнетика и металла, не изменяющего свои размеры в магнитном поле. В этом случае даже небольшое сжатие или удлинение полоски ферромагнетика должно привести к заметному изгибу биметаллического элемента.

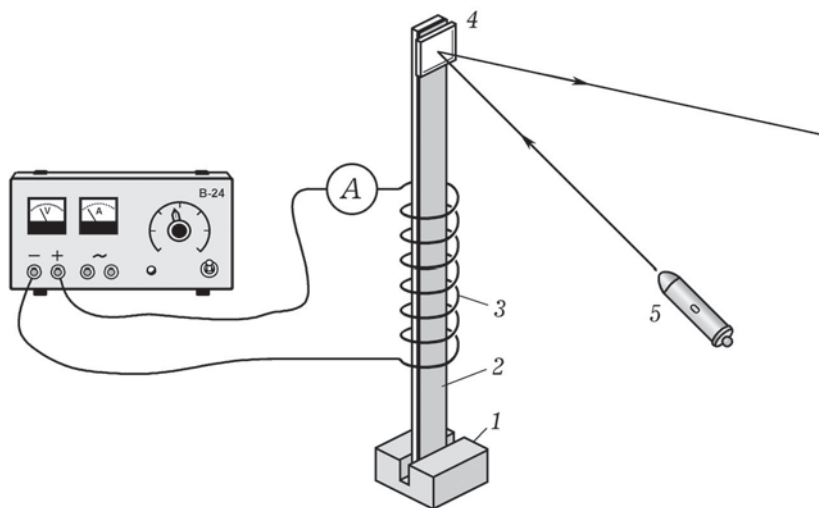


Рис. 3.2. Функциональная схема установки для наблюдения прямого магнито-стрикционного эффекта по изгибу биметаллического элемента: 1 — держатель; 2 — биметаллический элемент; 3 — катушка; 4 — зеркальце; 5 — полупроводниковый лазер

Вырежьте две одинаковые полоски из разных ферромагнитных материалов, например, никеля и железа (жести), и две такие же полоски из неферромагнитного материала, например, латуни. Размеры полосок не критичны, мы рекомендуем $0,2 \times 8 \times 160$ мм. Тщательно обработайте поверхности всех металлических полосок мелкой шкуркой, промойте водой с мылом, высушите, обезжирьте спиртом или ацетоном и склейте попарно ферромагнитную и неферромагнитную полоски предназначенным для металла клеем, например, «Момент». Вблизи одного из концов каждого

из получившихся биметаллических элементов со стороны латуни приклейте небольшое (размером порядка 6×6 мм) тонкое (толщиной не более 2 мм) зеркальце, вырезанное стеклорезом из карманного зеркала. В принципе можно обойтись и без зеркальца, но тогда нужно полировальной пастой отполировать небольшие участки возле концов латунных полосок.

Функциональная схема экспериментальной установки показана на рис. 3.2, ее внешний вид представлен на рис. 3.3. Закрепите биметаллический элемент в держателе вертикально и расположите его вдоль оси катушки (подойдет катушка на 220 В

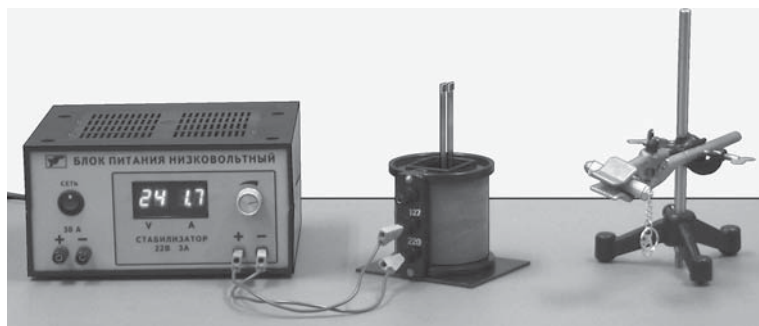


Рис. 3.3. Экспериментальная установка для исследования магнитострикции. В катушке расположены сразу два биметаллических элемента: никель–латунь и железо–латунь

от школьного разборного трансформатора). На зеркальце направьте пучок света от полупроводникового лазера так, чтобы отраженный пучок попал на экран (стену, потолок), удаленный на 4–8 м от зеркальца. Подключите катушку к стабилизированному источнику питания, позволяющему регулировать силу постоянного тока в пределах от нуля до нескольких ампер. Можно использовать выпускаемый промышленностью для школ блок питания низковольтный, дающий регулируемое от 0 до 30 В напряжение при максимальном токе 3 А.

Опыт 1. Существование магнитострикционного эффекта. В качестве биметаллического элемента используйте пару никель–латунь. Включите источник питания и, постепенно увеличивая силу тока через катушку, наблюдайте за смещением зайчика на экране. Вы увидите, что он смещается в направлении, которое определяется изгибом биметаллического элемента, соответствующим укорочению никелевой полоски. При указанных выше условиях опыта, силе тока 1,7 А и расстоянии до экрана 8,5 м смещение зайчика составляет величину порядка 15 см. Медленно уменьшая силу тока до нуля, вы увидите, как зайчик

на экране возвращается в исходное положение. Таким образом, эксперимент показывает, что магнитоотрицательный эффект действительно существует, и для никеля он отрицателен.

Опыт 2. Четность магнитоотрицательного эффекта. В условиях предыдущего опыта смените на противоположную полярность подключения источника тока к катушке. Увеличивая ток через катушку, вы заметите, что зайчик смещается по экрану в том же направлении и на ту же величину, что и раньше. Следовательно, никелевая полоска в магнитном поле по-прежнему укорачивается, несмотря на то, что направление магнитного поля, вызывающего это укорочение, сменилось на противоположное! Обнаруженное вами в эксперименте явление независимости деформации ферромагнетика от направления магнитного поля получило название *четности магнитоотрицательного эффекта*.

Опыт 3. Инверсия магнитоотрицательного эффекта. Теперь введите внутрь катушки биметаллический элемент, склеенный из жестяной (железной) и латунной полосок. Увеличивая ток, вы заметите, что вначале зайчик смещается в направлении, противоположном его смещениям в предыдущих опытах, причем это смещение существенно меньше, чем при использовании биметаллического элемента с никелем (примерно 3 см вместо 15 см, как в опыте 1). При дальнейшем увеличении силы тока смещение зайчика по экрану не только не увеличивается, но и, напротив, уменьшается до нуля и затем меняется на противоположное! Значит, в слабых магнитных полях железо обладает положительной магнитоотрицательностью, а в сильных — отрицательной. Это явление получило название *инверсии магнитоотрицательности*.

В последнем эксперименте вместо катушки от школьного разборного трансформатора лучше использовать самодельную катушку, обеспечивающую получение магнитного поля более высокой напряженности. Для этого на каркас длиной $L = 100$ мм и внутренним диаметром 25 мм нужно намотать $N = 1000$ витков провода диаметром 1,0 мм в лаковой изоляции. В такой катушке рекомендованный выше источник питания обеспечит максимальный ток $I = 3$ А. Напряженность магнитного поля H в катушке можно оценить по формуле, выведенной для бесконечно длинного соленоида

$$H = \frac{N}{L} I. \quad (3.1)$$

Подстановка в эту формулу числовых значений дает оценку максимальной напряженности магнитного поля $H = 30 \cdot 10^3$ А/м. Это значение, как показывает график, приведенный на рис. 3.1, вполне достаточно, чтобы убедиться в инверсии магнитоотрицательности для железа.

В наших опытах использовалась катушка с $N = 1125$ витков и $L = 105$ мм. Максимальная положительная магнитострикция наблюдалась при $H \approx 7 \cdot 10^3$ А/м, при $H \approx 20 \cdot 10^3$ А/м магнитострикция обращалась в нуль и при дальнейшем увеличении магнитного поля она становилась отрицательной.

В заключение заметим, что биметаллические элементы позволяют поставить опыт по обнаружению магнитострикционного эффекта даже в домашних условиях. Для этого в качестве катушки можно использовать обмотку возбуждения описанного ниже магнитострикционного излучателя низкой частоты (см. п. 3.3.4), а в качестве источника тока — одну или две соединенные последовательно батарейки на 4,5 В. При подключении катушки к этому источнику вы заметите смещение зайчика по экрану. Рекомендуем самостоятельно исследовать условия и результаты такого эксперимента подробнее.

3.1.3. Исследование прямого магнитострикционного эффекта методом поворота иглы. Описанные в предыдущем пункте эксперименты могут вызвать некоторые сомнения. В самом деле, вы хорошо знаете, что на ферромагнитные материалы со стороны магнита действует сила притяжения. Магнитное поле внутри катушки школьного трансформатора вряд ли можно считать слишком однородным. Поэтому на ферромагнитную полосу в нем может действовать сила, которая приведет к деформации полосы и изгибу биметаллического элемента. В этом случае магнитострикционный эффект ни при чем.

Чтобы исключить сомнения в корректности обсуждаемых экспериментов, нужно повторить их, помещая биметаллический элемент в разные области внутри катушки так, чтобы он оставался параллельным ее оси. Контрольные опыты покажут, что в них изгиб биметаллического элемента, бесспорно, обусловлен именно магнитострикционным эффектом. Однако этот вывод станет более убедительным, если существование магнитострикции вы сможете подтвердить иным методом, лучше таким, который позволяет исследовать магнитострикционный эффект количественно.

К ушку швейной иглы диаметром 0,5 мм приклейте зеркальце размером примерно 5×5 мм и толщиной не более 2 мм. Подберите стальной стержень диаметром примерно 10 мм и длиной около 30 см (входит в комплект к школьному универсальному штативу). Из гетинакса толщиной 5 мм вырежьте полосу шириной 10 мм, длина которой равна длине стального стержня. Полосу и стержень сложите вместе и возле одного из концов обмотайте их изолейтой. Между стальным стержнем и гетинаксовой полоской возле другого их конца введите иглу с зеркальцем (рис. 3.4) и скрепите стержень и полосу вместе еще одной обмоткой изолейты.

Вы получили чувствительный элемент: в магнитном поле гетинакс не меняет своих размеров, а железо деформируется, причем эта деформация крайне мала. Поскольку изолянта не сможет воспрепятствовать небольшому смещению стержня относительно полоски, то следует ожидать, что это смещение приведет к повороту иглы.

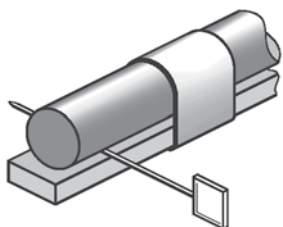


Рис. 3.4. Ферромагнитный стержень, скрепленный изолянтной с полоской гетинакса; боковой поверхностью стержень прижимает иглу с приклеенным к ней зеркальцем

Катушку на 220 В от разборного трансформатора расположите горизонтально. Чувствительный элемент положите на подходящую подставку свободно и симметрично относительно катушки по ее оси так, чтобы при включении тока ферромагнитный стержень элемента не втягивался в катушку. На расстоянии примерно 0,5 м в лапке

штатива закрепите полупроводниковый лазер, свет от которого направьте на вертикально ориентированное зеркальце под углом $5\text{--}10^\circ$ снизу так, чтобы отражаясь, световой пучок падал на экран, удаленный от зеркальца на несколько метров. Катушку соедините с источником постоянного регулируемого напряжения.

Внимательно наблюдайте за зайчиком на экране. Вы увидите, что при увеличении силы тока в катушке зайчик смещается в определенном направлении. Следовательно, увеличение магнитного поля ведет к повороту иглы с зеркальцем на некоторый угол. Уменьшая силу тока, вы заметите, что зайчик возвращается обратно. Отсюда следует, что когда по катушке проходит электрический ток, боковая поверхность стержня, прижимающая иглу к полоске, перемещается в одну сторону, а при исчезновении тока — в обратную. Это можно объяснить только тем, что при появлении магнитного поля, вызванного током в катушке, стержень изменяет свои линейные размеры. В отсутствие поля стержень восстанавливает исходные размеры.

По направлению смещения зайчика на экране определите направление поворота зеркальца и направление смещения боковой поверхности стального стержня относительно гетинаксовой полоски. Зная это направление, вы сможете судить о знаке магнитоотрицательности. Еще раз убедитесь, что железный стержень в слабых магнитных полях удлиняется, а в сильных — укорачивается.

Теперь исследуйте явление магнитоотрицательности для феррита. С этой целью используйте ферритовый стержень диаметром 8 мм и длиной 160 мм. Из гетинакса толщиной 5 мм вырежьте полоску шириной 8–10 мм и длиной 160 мм. Как и прежде соедините

стержень и полосу возле их концов обмотками изолянта, не забывая в нужном месте зажать между ними иглу с зеркальцем. Повторите описанные выше эксперименты и убедитесь, что феррит обладает значительно большей, чем железо, магнитоотрицательностью, причем она отрицательна.

Обнаружить магнитоотрицательность ферритового стержня можно и в домашних условиях, если в качестве катушки использовать обмотку возбуждения описанного ниже магнитоотрицательного излучателя низкой частоты (см. п. 3.3.4), а в качестве источника питания — две последовательно соединенные батарейки на 4,5 В. При подключении такого источника к обмотке возбуждения, внутри которой находится ферромагнитный стержень с прижатой к его поверхности иглой с зеркальцем, игла скачком поворачивается, и зайчик прыгает по экрану в новое положение.

3.1.4. Количественное исследование магнитоотрицательности.

Оценим величину деформации ферромагнетика в магнитном поле. Определить ее можно по смещению зайчика, вызванному поворотом иглы с зеркальцем. Чтобы получить более точные результаты, ферромагнитный стержень нужно расположить в катушке симметрично относительно ее центра так, чтобы его концы лишь незначительно выходили за пределы обмотки. Кроме того, ферромагнитный стержень и гетинаксовую полосу, прижимающую иглу к его боковой поверхности возле конца стержня, следует скрепить изолянтной в их центре.

Пусть скрепленный с прижимающей полоской в середине ферромагнитный стержень удлиняется на величину x , то есть его боковая поверхность вблизи незакрепленного торца перемещается на $x/2$ (рис. 3.5). Если проскальзывания между иглой и поверхностью стержня нет, то при этом точка на поверхности иглы описывает дугу длиной $x/2 = r\alpha$, где r — радиус иглы, α — угол, на который повернулась игла. При повороте закрепленного на игле зеркальца на угол α отраженный пучок поворачивается на удвоенный угол 2α . Этот угол нетрудно определить, измерив смещение y зайчика по экрану, удаленному от зеркальца на расстояние z : $2\alpha \approx y/z$. Отсюда абсолютная деформация ферромагнитного стержня, помещенного в магнитное поле, определяется по приближенной формуле:

$$x = 2r\alpha = \frac{ry}{z}. \quad (3.2)$$

В наших опытах с ферритовым стержнем марки М400НН длиной $l = 0,16$ м при расстоянии до экрана $z = 8,5$ м, радиусе иглы $r = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м и силе тока $I = 3,1$ А в катушке из $N = 1125$ витков (напряженность магнитного поля согласно формуле (3.1) $H = 33$ кА/м) смещение зайчика по экрану оказалось равным $y = 3 \cdot 10^{-2}$ м. Подставляя эти данные в формулу

(3.2), получаем, что величина абсолютной деформации $x = 8,8 \times 10^{-7}$ м. Отсюда относительная деформация феррита в условиях опыта составляет $x/l = 5,5 \cdot 10^{-6}$.

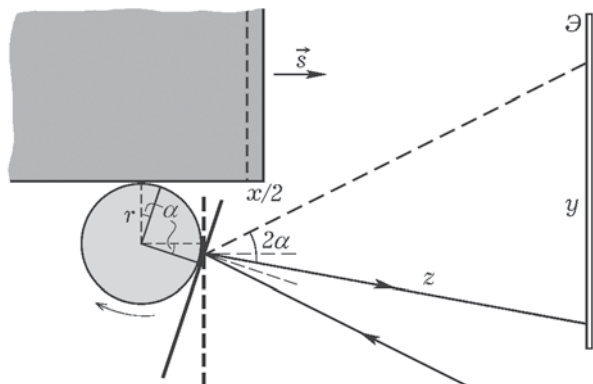


Рис. 3.5. К вычислению деформации ферромагнитного стержня по повороту иглы, которой он касается: штриховыми линиями обозначены исходные положения торца, радиусов иглы, зеркала и отраженного луча

В тех же условиях мы проделали опыты с другими ферромагнетиками. Стальной стержень длиной $l = 0,3$ м дал смещение зайчика $y = 4 \cdot 10^{-2}$ м, поэтому его абсолютная и относительная деформации получились равными $x = 11,8 \cdot 10^{-7}$ м и $x/l = 3,9 \cdot 10^{-6}$. Никелевый стержень сечением 8×8 мм и длиной $l = 0,105$ м дал смещение зайчика по экрану $y = 8,5 \cdot 10^{-2}$ м, следовательно его абсолютная и относительная деформации составили $x = 25 \cdot 10^{-7}$ м и $x/l = 24 \cdot 10^{-6}$. Сопоставляя полученные

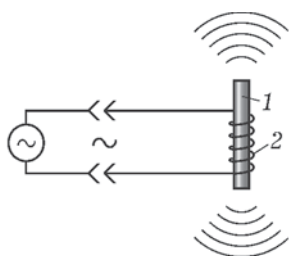


Рис. 3.6. Возбуждение упругой волны. Ферромагнитный стержень 1 находится в катушке 2, по которой проходит переменный ток от электронного генератора

результаты с приведенными на рис. 3.1 графиками, приходим к выводу, что феррит имеет магнитоstriction, несколько большую, чем железо, но существенно меньшую, чем никель.

3.1.5. Использование прямого магнитоstrictionного эффекта для получения упругой волны.

Если по катушке, вдоль оси которой расположен ферромагнитный стержень, пропускать переменный ток достаточно высокой частоты, то стержень будет периодически изменять свои размеры, и его колеблющиеся

концы смогут возбудить в окружающей среде упругую звуковую или ультразвуковую волну (рис. 3.6).

Чтобы убедиться в этом, поставьте следующий опыт. На ферритовый стержень длиной 100–160 мм намотайте (можно внавал) 2000 витков медного провода диаметром 0,2 мм в лаковой изоляции. Подключите обмотку к выходу генератора звуковой частоты (можно использовать генератор типа ФГ-100) и подайте на нее переменное напряжение частотой 4–8 кГц. Вы услышите слабый звук высокой частоты, появление которого свидетельствует о том, что ферритовый стержень за счет прямого магнитострикционного эффекта совершает вынужденные колебания. Изменяя частоту и амплитуду напряжения, вырабатываемого генератором, проследите за соответствующими изменениями слышимого звука.

3.2. Обратный магнитострикционный эффект

Обратный магнитострикционный эффект — это возникновение магнитного поля при деформации ферромагнетика. Пронаблюдать его можно, поместив ферромагнетик внутрь катушки и деформировав его, например, ударом. О появлении магнитного поля будет свидетельствовать ЭДС индукции в катушке. Докажите существование обратного магнитострикционного эффекта прямыми экспериментами.

3.2.1. Обнаружение обратного магнитострикционного эффекта. Для опыта используйте ферритовый стержень с обмоткой из 2000 витков провода (см. п. 3.1.5) и индикатор интенсивности звука (см. п. 2.3.3). Подключите выводы обмотки вместо микрофона ко входу индикатора (рис. 2.16). Держась за один конец ферритового стержня рукой, по другому слегка ударьте предметом из немагнитного материала, например, дюралюминия. Вы увидите, что при этом лампочка индикатора вспыхивает. В опыте вместо звукового индикатора можно использовать любой усилитель звуковой частоты, к выходу которого подключена маломощная лампа накаливания (рис. 3.7).

Проанализируем опыт. Поскольку вспыхнула лампа, значит, на выходе усилителя возникает ток, который может быть обусловлен лишь кратковременным появлением напряжения на его входе. Разность потенциалов на концах обмотки стержня могла возникнуть только за счет прохождения по обмотке тока. Но ток в обмотке может появиться лишь тогда, когда изменяется

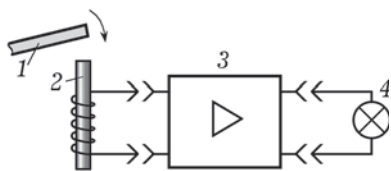


Рис. 3.7. К наблюдению обратного магнитострикционного эффекта: 1 — палочка из немагнитного материала; 2 — ферритовый стержень с обмоткой; 3 — усилитель; 4 — лампа накаливания

магнитное поле, пронизывающее ее витки. Следовательно, при ударе о ферритовый стержень за короткий промежуток времени изменилось пронизывающее обмотку магнитное поле, и, поскольку сам стержень был немагнитен, приходим к заключению, что при ударе вокруг стержня возникало магнитное поле. Тем самым факт существования обратного магнитострикционного эффекта экспериментально обоснован.

3.2.2. Осциллограмма упругих колебаний стержня. Подключите намотанную на ферритовый стержень обмотку (пп. 3.1.5 и 3.2.1) к входу усилителя вертикального отклонения электронного осциллографа. Ударяя по торцу стержня предметом из немагнитного материала, получите осциллограмму напряжения, возникающего на обмотке. Для этого, конечно, придется подобрать оптимальную чувствительность усилителя вертикального отклонения и частоту генератора горизонтальной развертки осциллографа. Вы обнаружите, что осциллограмма исследуемого сигнала имеет характер затухающего колебания, более или менее близкого к гармоническому. По осциллограмме нетрудно оценить частоту колебаний стержня. Количественные оценки показывают, что после удара ферритовый стержень действительно совершает затухающие колебания, главным образом, на основной собственной частоте.

Опыт можно поставить и в другом варианте. Расположите никелевый стержень размером примерно $10 \times 10 \times 160$ мм вертикально, зажав его нижний конец в лапке штатива. На стержень наденьте катушку, содержащую не менее 500 витков медного провода в лаковой изоляции диаметром около 0,2 мм. Катуш-

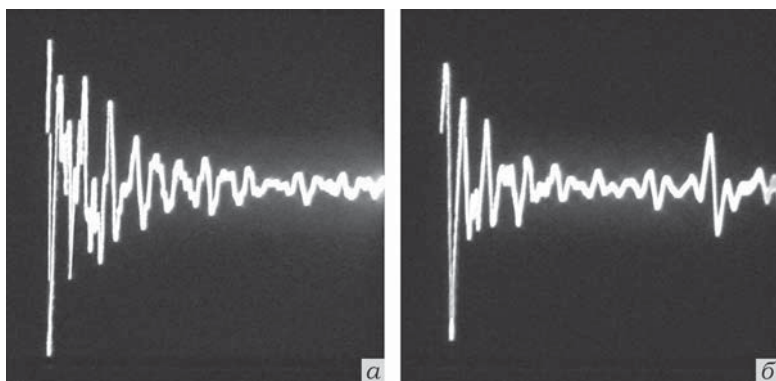


Рис. 3.8. Осциллограммы напряжений, возникающих в катушке, внутри которой расположен деформируемый ударом никелевый стержень: *а* — быстро затухающий импульс продольной волны в стержне; *б* — виден импульс, отраженный от места крепления стержня

ку подключите к электронному осциллографу и ударяйте по верхнему торцу стержня деревянной палочкой, возбуждая в нем продольную упругую волну. При достаточно кратковременном ударе на осциллограмме вы обнаружите не только возбужденный ударом импульс, но и импульс, отраженный от места крепления стержня (рис. 3.8). Как тут не вспомнить описанные в п. 2.1.2 опыты с пружиной!

Проделанные вами эксперименты свидетельствуют о том, что обратный магнитострикционный эффект может быть применен для создания приемников упругих волн, преобразующих механические колебания в электрические. Собственно, для постановки описанных выше опытов вы уже использовали простейшую модель магнитострикционного приемника. Она позволяет сразу осознать основной недостаток приемников упругих волн на основе магнитострикционного эффекта — их крайне низкую чувствительность. Поэтому в ультразвуке предпочитают пьезоэлектрические приемники ультразвука.

3.3. Магнитострикционный излучатель ультразвука низкой частоты

Итак, поместив ферромагнитный материал в переменное магнитное поле, можно добиться того, что он будет совершать вынужденные колебания и служить источником упругих волн (п. 3.1.5). Выясним, какова должна быть конструкция магнитострикционного излучателя, чтобы обеспечить получение максимальной интенсивности звука высокой частоты или ультразвука низкой частоты. Для этого вначале кратко рассмотрим конструкции промышленных излучателей ультразвука, затем разберемся с поляризацией вибратора и, наконец, изготовим пригодный для многих экспериментов учебный магнитострикционный излучатель.

3.3.1. Промышленные магнитострикционные излучатели. В гидроакустике, технике, медицине и других отраслях хозяйственной деятельности широко используются магнитострикционные излучатели ультразвука. В качестве ферромагнитного материала вибратора в них применяют никель и специальные сплавы с высокой магнитострикцией. Проходящий по обмотке возбуждения такого излучателя переменный ток ультразвуковой частоты помимо полезных вынужденных колебаний вибратора возбуждает в его металле вихревые токи. Это ведет к значительным потерям энергии, поскольку вихревые токи сильно нагревают вибратор. Для уменьшения потерь на вихревые токи все металлические вибраторы набирают, подобно сердечникам трансформаторов, из тонких изолированных друг от друга пластин.

На рис. 3.9 схематически изображена конструкция часто применяющегося в технике и гидроакустике магнитострикционного излучателя ультразвука частотой порядка 200 кГц, металлический наборный вибратор которого имеет плоскую излучающую поверхность большой площади. Обмотка возбуждения проложена в специальных прорезях вибратора.

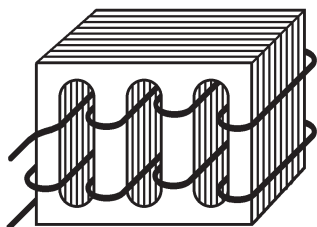


Рис. 3.9. Промышленный магнито-стрикционный излучатель, вибратор которого набран из пластин для уменьшения потерь на вихревые токи



Рис. 3.10. Промышленный магнито-стрикционный излучатель, вибратор которого совершает радиальные колебания

Если в гидроакустике возникает необходимость равномерного излучения ультразвука во все стороны в некоторой плоскости, то вибратор магнитострикционного излучателя набирают из тонких ферромагнитных пластин в виде кольца (рис. 3.10). При прохождении по обмотке возбуждения такого излучателя переменного тока ультразвуковой частоты его вибратор совершает радиальные упругие колебания, возбуждая в жидкости ультразвуковую волну, бегущую от него во все стороны в радиальных направлениях.

Другие конструкции промышленных магнитострикционных излучателей мы рассмотрим в последней главе книги, посвященной практическому применению ультразвука.

3.3.2. Подмагничивание вибратора магнитострикционного излучателя. Выше мы выяснили, что магнитострикционный эффект является четным (п. 3.1.2), то есть деформация ферромагнетика в магнитном поле не зависит от направления магнитного поля. Таким образом, если помещенный в продольное магнитное поле ферромагнитный стержень становится, например, короче, чем в отсутствие поля, то при изменении направления магнитного поля на противоположное стержень так и остается укороченным, а не удлиняется. Поэтому в магнито-стрикционном излучателе концы ферромагнитного стержня, расположенного в обмотке возбуждения, по которой проходит переменный ток (рис. 3.6), колеблются с частотой, в два раза превышающей частоту переменного тока. Чтобы подробнее рассмотреть эту особенность, обратимся к рис. 3.11.

Никелевый стержень длиной l_0 , внесенный в постоянное магнитное поле напряженностью H_0 , короче, чем в отсутствие поля

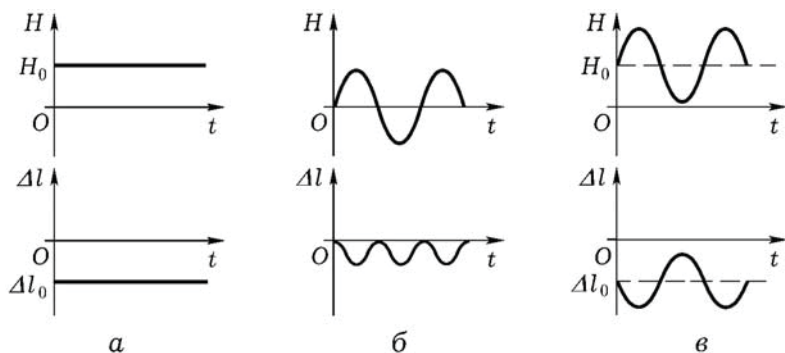


Рис. 3.11. Графики, поясняющие физическую сущность поляризации ферромагнитного стержня: *а* — стержень в постоянном магнитном поле; *б* — стержень в переменном магнитном поле; *в* — стержень в переменном поле дополнительно поляризован постоянным магнитным полем

на величину Δl_0 (рис. 3.11 *а*). Чтобы получить магнитострикционный излучатель, поместим никелевый стержень в переменное магнитное поле, напряженность которого H меняется по синусоидальному закону. В этом случае стержень излучателя будет укорачиваться всякий раз, когда напряженность магнитного поля — независимо от его направления — станет отлична от нуля (рис. 3.11 *б*). Таким образом, размеры стержня будут колебаться с удвоенной частотой по сравнению с частотой переменного магнитного поля.

Чтобы избежать этого часто нежелательного явления, на переменное магнитное поле H дополнительно накладывают постоянное, напряженность которого H_0 имеет вполне определенную величину. В этом случае под действием постоянного поля никелевый стержень все время короче, чем в своем естественном состоянии, а наличие переменного поля приводит к тому, что стержень станет изменять свои размеры синфазно с изменением этого поля: при увеличении напряженности магнитного поля вибратор будет укорачиваться, а при уменьшении — удлиняться (рис. 3.11 *в*). При этом частота колебаний стержня совпадет с частотой вызывающего эти колебания переменного магнитного поля, а амплитуда колебаний возрастет практически вдвое.

Наложение на переменное магнитное поле постоянного называется *подмагничиванием* или *поляризацией* вибратора магнитострикционного излучателя. Подмагничивание может быть осуществлено посредством постоянных магнитов или путем со-

здания магнитного поля проходящим по катушке электрическим током.

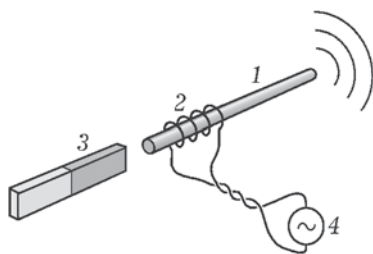


Рис. 3.12. Функциональная схема магнитоотрицательного излучателя ультразвука: 1 — вибратор; 2 — обмотка возбуждения; 3 — подмагничивающий магнит; 4 — генератор

На рис. 3.12 схематически изображен магнитоотрицательный излучатель. Ферромагнитный стержень 1, совершающий звуковые или ультразвуковые колебания, в дальнейшем будем называть *вибратором*; катушку 2 — *обмоткой возбуждения*; магнит 3 — *подмагничивающим* или *поляризующим*; источник переменного напряжения 4 — *ультразвуковым генератором*.

3.3.3. Ферритовый вибратор магнитоотрицательного излучателя. Вы уже знаете, что вибраторы промышленных магнитоотрицательных излучателей, как правило, изготавливаются из никеля или специальных ферромагнитных сплавов (п. 3.3.1). Сравнительно недавно для вибраторов магнитоотрицательных излучателей стал использоваться и феррит — ферромагнитный материал, сильно напоминающий по своим свойствам и способу получения керамику.

Феррит обладает значительной магнитоотрицательностью, сравнимой с магнитоотрицательностью никеля, и вместе с тем высоким удельным сопротивлением. Последнее свойство обеспечивает существенное преимущество ферритовых вибраторов перед никелевыми: на относительно низких ультразвуковых частотах потери в ферритовом вибраторе на вихревые токи незначительны, что позволяет изготавливать из феррита монолитные вибраторы практически любой необходимой формы. Напомним, что никелевые вибраторы для уменьшения потерь на вихревые токи обычно набирают — как и сердечники трансформаторов — в виде пакетов, состоящих из изолированных друг от друга тонких пластин.

Основным недостатком феррита является его малая механическая прочность: ферритовые вибраторы при достижении интенсивности ультразвука порядка $2\text{--}4\text{ Вт/см}^2$, как правило, терпят излом. К счастью ультразвук меньшей интенсивности все же позволяет поставить большую серию учебных опытов.

В качестве вибраторов магнитоотрицательных излучателей для учебных экспериментов мы рекомендуем использовать круглые ферритовые стержни марки М400НН диаметром 8 мм и длиной 140–160 мм от магнитных антенн радиоприемников. Более надежны (но и несколько менее доступны) ферритовые стержни

диаметром 10 мм и длиной 200 мм, которые также используются в магнитных антеннах.

3.3.4. Конструкция учебного излучателя. Рассмотренные выше промышленные магнитострикционные излучатели незаменимы в области своего применения, но для учебных целей они мало подходят. Дело в том, что никель и другие магнитострикционные материалы малодоступны, а изготовление из них вибраторов требует определенных навыков и немалого времени. Кроме того, генераторы для возбуждения ультразвуковых колебаний металлических вибраторов с достаточной для учебных экспериментов интенсивностью довольно сложны. Поэтому для учебного магнитострикционного излучателя лучше использовать ферритовый вибратор, который, хотя и менее прочен, чем металлический, но зато более доступен и требует для своего возбуждения менее мощного генератора.

Конструкция учебного магнитострикционного излучателя ультразвука представлена на рис. 3.13. В качестве вибратора *1* излучателя использован круглый ферритовый стержень марки М400НН диаметром 8 мм и длиной 100–160 мм. По его середине расположено резиновое колечко *2*, которое мягко крепит вибратор в каркасе *3* обмотки возбуждения *4*. Подмагничивающие ферритовый вибратор кольцевые керамические магниты *5* надеты на выступающую часть каркаса обмотки возбуждения так, чтобы нерабочий торец вибратора находился в одной плоскости с поверхностью ближайшего к нему магнита.

Каркас обмотки возбуждения можно выточить на токарном станке из подходящего материала (оргстекла, эбонита, текстолита, дерева и т. п.) или склеить из нескольких слоев бумаги. Обмотка возбуждения может содержать два слоя медного в лаковой изоляции провода диаметром 1,0 мм, намотанных виток к витку на длину, равную примерно половине длины вибратора. Выводы обмотки возбуждения нужно выполнить из многожильных проводников в полихлорвиниловой изоляции длиной 30–50 см, снабженных наконечниками для зажима под клеммы или штекерами для включения в гнезда. Обмотку возбуждения

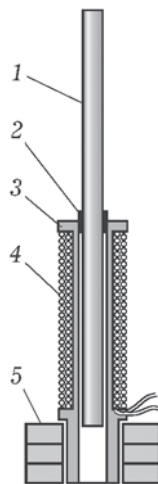


Рис. 3.13. Конструкция учебного магнитострикционного излучателя: *1* — ферритовый вибратор; *2* — резиновое колечко; *3* — каркас; *4* — обмотка возбуждения; *5* — подмагничивающие вибратор магниты

следует покрыть слоем лакокраски, высоковольтной изоляцией или несколькими слоями бумаги.

Впрочем, практика показывает, что лучше два слоя обмотки возбуждения намотать проводником в полихлорвиниловой изоляции, которая в этом случае не должна быть слишком толстой (диаметром не более 1,5 мм).

Для подмагничивания вибратора можно использовать два-три кольцевых керамических магнита диаметром 35 мм и толщиной 7 мм из школьного набора или один-два больших керамических магнита диаметром 50 мм и толщиной 8 мм от старых динамиков. В принципе подмагничивание можно осуществить постоянным током, проходящим по обмотке возбуждения одновременно с переменным. Однако это усложнение излучателя не даст сколько-нибудь заметного положительного эффекта, тем не менее несколько позже мы его рассмотрим.

3.3.5. Технология изготовления излучателя. Как уже говорилось, каркас обмотки возбуждения излучателя можно выточить на токарном станке. Однако это требует умения, времени, наличия станка и инструментов. Здесь мы опишем значительно более доступный способ изготовления магнитострикционного излучателя, который вполне подходит даже для домашних условий.

Вам понадобятся два листа бумаги формата А4 (то есть размером 21×30 см) плотностью 80 г/м², ножницы, оправка (стержень внешним диаметром примерно 10 мм), клей ПВА, многожильный гибкий провод длиной 7 м, сечением примерно 0,2 мм² в полихлорвиниловой изоляции диаметром примерно 1,3 мм, три кольцевых керамических магнита, ферритовый стержень диаметром 8 мм, резиновое колечко подходящего размера, карандаш, линейка, наждачная бумага или шкурка, шило, нитрокраска.

Изготовление излучателя начните с каркаса обмотки возбуждения. Длина каркаса должна быть равна сумме половины длины ферритового стержня и толщины набора кольцевых магнитов. Каркас склейте из бумаги в последовательности, показанной на рис. 3.14.

Вначале из подготовленного листа бумаги вырежьте прямоугольник, одна сторона которого равна вычисленной длине каркаса, другая — длинной стороне листа. Из бумажного прямоугольника изготовьте трубку, оборачивая оправку бумагой и тщательно проклеивая ее. Следите за тем, чтобы трубка не приклеилась к оправке и ее потом можно было легко снять (лучше предварительно обернуть оправку тонкой бумагой). По ширине подготовленного набора магнитов вырежьте из бумаги полосу и, оборачивая ее вокруг трубки, приклейте полосу возле одного из концов трубки. Эту операцию повторяйте до тех

пор, пока на трубке не получится цилиндрическое утолщение, внешний диаметр которого равен наименьшему внутреннему диаметру подготовленных для излучателя кольцевых керамических магнитов. Таким же способом из бумажных полосок шириной 4–6 мм сделайте щечки каркаса высотой 4–5 мм.

Готовый каркас просушите в течение суток, снимите с оправки и в щечке, возле которой будут находиться магниты, шилом проделайте два отверстия диаметром 1,5 мм для проводников. Если вы хотите работать с излучателем долго, то высушенный каркас обработайте мелкой шкуркой и покройте двумя слоями нитроэмали — изделие приобретет приятный вид и станет устойчивым к влаге.

Конец многожильного провода проденьте в одно из отверстий нижней щечки так, чтобы снаружи находилось примерно 30 см провода. Плотнo виток к витку намотайте два слоя обмотки возбуждения. Оставшийся конец провода проденьте через другое отверстие щечки.

Ферритовый стержень с помощью резинового колечка закрепите в каркасе обмотки возбуждения так, чтобы середина ферритового стержня, середина колечка и верхний торец каркаса совпали.

В соответствии с описанной технологией изготовлены десятки магнитострикционных излучателей (рис. 3.15), и все они безупречно работали.

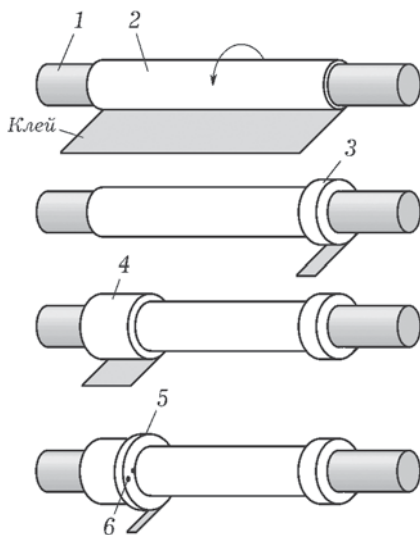


Рис. 3.14. Изготовление каркаса магнитострикционного излучателя: 1 — цилиндрическая оправка; 2 — склеиваемая из бумаги трубка; 3 — верхняя щечка; 4 — посадочное место для кольцевых магнитов; 5 — нижняя щечка; 6 — отверстия для выводов обмотки возбуждения



Рис. 3.15. Внешний вид магнитострикционного излучателя

Время, необходимое для изготовления излучателя, не превышает двух часов. Поэтому мы абсолютно уверены, что у каждого из вас, кто взялся за эту работу, обязательно получится все, что нужно.

3.3.6. Магнитоотрицательный излучатель низкой частоты для школьного физического кабинета. Для демонстрационных опытов в школе лучше сделать такой излучатель, который максимально удобен в работе. Наиболее приемлемая, на наш взгляд, конструкция изображена на рис. 3.16.

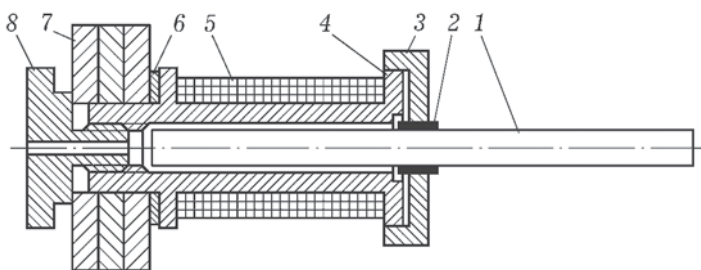


Рис. 3.16. Конструкция магнитоотрицательного излучателя: 1 — ферритовый вибратор; 2 — резиновое колечко, расположенное посередине вибратора; 3 — прижимная чашечка; 4 — каркас обмотки возбуждения; 5 — обмотка возбуждения; 6 — прижимное кольцо; 7 — поларизующие вибратор магниты; 8 — болт с отверстием, фиксирующий магниты

Все детали этого излучателя выточены на токарном станке из эбонита. Если в излучателе использован ферритовый вибратор диаметром 8 мм и длиной 140–160 мм, то размеры отдельных деталей могут быть примерно такими, которые указаны на рис. 3.17.

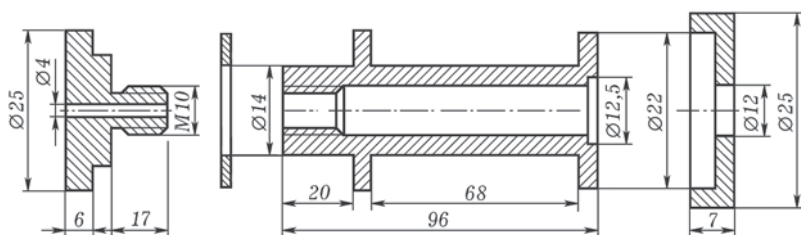


Рис. 3.17. Каркас обмотки возбуждения магнитоотрицательного излучателя

Излучатели, изображенные на рис. 3.18, удобно держать в руке, ставить вертикально на стол, зажимать в лапке штатива, вставлять в специально предназначенные для них посадочные места или фиксировать прижимной гайкой в специальных державках.

телях. Такие излучатели весьма надежны и, если бережно относиться к ферритовым вибраторам, могут годами использоваться в учебных экспериментах.

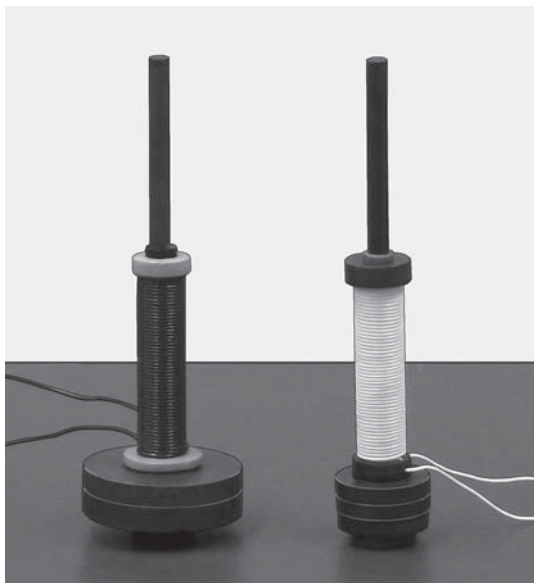


Рис. 3.18. Слева показан излучатель, каркас которого изготовлен из бумаги, справа — излучатель более основательной конструкции, его каркас обмотки возбуждения выточен из эбонита

3.3.7. Проверка излучателя в работе. Изготовленный излучатель при длине ферритового стержня 140–160 мм позволяет получать упругие волны частотой 16–19 кГц.

Для проверки работоспособности расположите магнестрикционный излучатель вертикально на столе, подключите его обмотку возбуждения к выходу выпускаемого современной промышленностью функционального генератора типа ФГ-100 (можно использовать и другие учебные генераторы звуковой частоты, например, устаревшие типа ГЗШ или ГЗМ). Включите генератор, установите режим синусоидального сигнала, перейдите в частотный диапазон 2–20 кГц и увеличьте амплитуду переменного напряжения от 0 до 5 В. Вы услышите, что излучатель издает слабый звук.

Поместите на верхний торец вибратора лезвие безопасной бритвы (рис. 3.19) или небольшую пластинку жести и плавно изменяйте частоту генератора. При некотором значении частоты лезвие начнет совершать интенсивные колебания, и будет слышен громкий дребезжащий звук.

Это означает, что вы достигли *электромеханического резонанса*: частота переменного магнитного поля, создаваемого проходящим по обмотке возбуждения переменным током, совпала

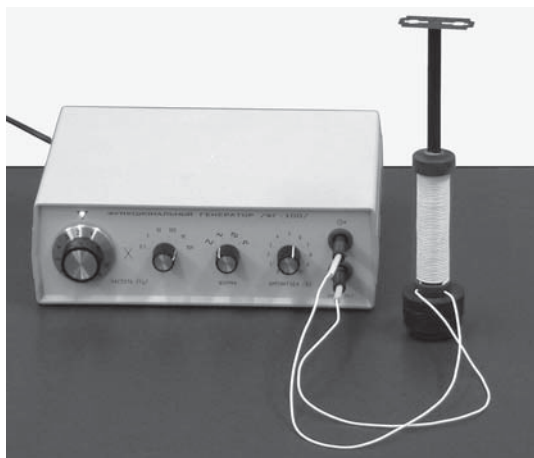


Рис. 3.19. Проверка магнитострикционного излучателя

с частотой собственных колебаний вибратора. При этом амплитуда колебаний вибратора резко возросла, лежащее на торце вибратора лезвие перестало успевать за его колебаниями, вибратор стал ударять по лезвию, в результате чего возник дребезжащий звук. Подробно это явление мы рассмотрим дальше, теперь же просто делаем вывод, что изготовленный вами излучатель работает: его вибратор колеблется и является источником упругой волны в окружающей среде. Надолго не оставляйте работающий в воздухе на резонансной частоте излучатель — почему, узнаете позже.

3.3.8. Подмагничивание вибратора постоянным током.

Как уже отмечалось выше (п. 3.3.2) для подмагничивания вибратора вместо постоянных керамических магнитов можно использовать электрический ток. На рис. 3.20 приведена принципиальная схема устройства, обеспечивающего прохождение по обмотке возбуждения наряду с переменным током ультразвуковой частоты от генератора постоянного тока подмагничивания. В этом устройстве конденсатор $C1$ емкостью $0,1$ мкФ выполняет функцию разделительного конденсатора, не пропуская постоянный ток на выходной каскад генератора. Дроссель $L1$ выполняет роль фильтра, препятствующего прохождению переменного тока через источник подмагничивающего напряжения. Поэтому дроссель в рабочем диапазоне частот генератора должен иметь большое индуктивное сопротивление и небольшое активное. Для

изготовления такого дросселя достаточно намотать на ферритовый стержень диаметром 8 мм и длиной 50 мм 250–500 витков медного провода диаметром 0,3–0,5 мм в лаковой изоляции.

Недостатком описанного способа подмагничивания является его низкая экономичность: поскольку обмотка возбуждения магнитострикционного излучателя содержит небольшое количество витков, для получения оптимального поля подмагничивания по ней приходится пропускать сравнительно большой постоянный ток. Кроме того, изображенная на рис. 3.20 схема может быть использована только совместно с ультразвуковым генератором, имеющим трансформаторный выход (см. ниже п. 4.2.1). Более простой генератор (см. ниже п. 4.3.1) имеет бестрансформаторный выход, поэтому включение последовательно с обмоткой возбуждения разделительного конденсатора, как это показано на рис. 3.20, приведет к тому, что генератор просто не будет работать.

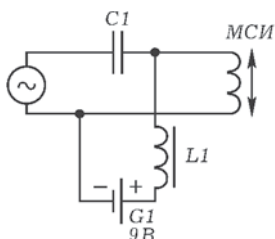


Рис. 3.20. Принципиальная схема, позволяющая подмагничивать вибратор постоянным током, проходящим по его обмотке возбуждения

Практика показывает, что если по каким-либо причинам кольцевые керамические магниты недоступны, то подмагничивание ферритового вибратора имеет смысл осуществить постоянным током, проходящим по специальной обмотке (рис. 3.21).

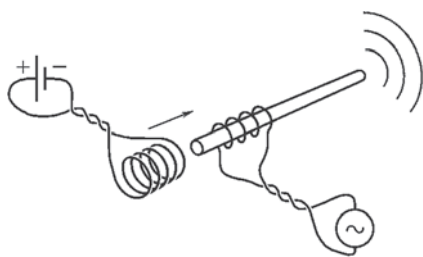


Рис. 3.21. Схема подмагничивания вибратора током, проходящим по специальной обмотке

Лучше если эта обмотка содержит порядка 1500 витков медного провода диаметром около 0,3 мм. Намотать их следует либо непосредственно на обмотку возбуждения излучателя, проложив бумажные прокладки, либо на отдельный каркас, свободно надеваемый на эту обмотку. Оптимальный подмагничивающий ток для указанной обмотки составляет порядка 100 мА, поэтому в качестве источника подмагничивающего тока могут быть использованы две последовательно соединенные батарейки карманного фонаря. В конструкции магнитострикционного излучателя имеет смысл предусмотреть специальный разъем, одновременно подключающий обмотки возбуждения и подмагничивания к ультразвуковому генератору и источнику постоянного тока.

В качестве источника подмагничивающего тока могут быть использованы две последовательно соединенные батарейки карманного фонаря. В конструкции магнитострикционного излучателя имеет смысл предусмотреть специальный разъем, одновременно подключающий обмотки возбуждения и подмагничивания к ультразвуковому генератору и источнику постоянного тока.

Глава 4

ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН

В качестве основного источника упругих волн для экспериментов мы выбрали магнитострикционный излучатель. Чтобы получить ультразвук достаточной интенсивности, необходимо резонансное возбуждение его вибратора. Для возбуждения вынужденных колебаний вибратора и достижения резонанса по обмотке возбуждения магнитострикционного излучателя нужно пропускать переменный ток регулируемой частоты. Обеспечить получение такого тока могут электронные генераторы. Рассмотрению принципа действия и конструкций электронных ультразвуковых генераторов посвящена настоящая глава.

4.1. Элементы электронного генератора на транзисторах

Прежде чем переходить к описанию ультразвуковых генераторов кратко напомним основные сведения, относящиеся к электромагнитным колебаниям и электронным устройствам на транзисторах.

4.1.1. Колебательный контур. Электромагнитные колебания могут быть получены с помощью колебательного контура, состоящего из соединенных параллельно катушки и конденсатора. От источника постоянного напряжения зарядим конденсатор C и соединим его с катушкой L так, чтобы получился *параллельный колебательный контур* (рис. 4.1). При разряде конденсатора через катушку в контуре возникает электрический ток. Накопленная в конденсаторе энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля катушки. Ток через катушку и энергия магнитного поля достигают максимума, когда напряжение на конденсаторе и энергия электрического поля становятся равными нулю. Затем ток через катушку уменьшается, сохраняя свое направление, и конденсатор перезаряжается до тех пор, пока ток в контуре не станет равным нулю. В этом случае напряжение на конденсаторе достигает максимума, и вся энергия вновь оказывается сосредоточена в электрическом поле. Далее процесс повторяется.

Так происходят *свободные электромагнитные колебания* в параллельном колебательном контуре. Их частота определяется выражением

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (4.1)$$

где L — индуктивность катушки, C — емкость конденсатора.

Подобрав параметры катушки и конденсатора так, чтобы в контуре происходили колебания нужной частоты, можно было

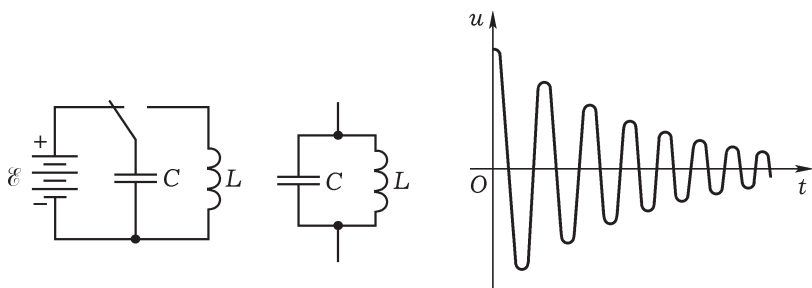


Рис. 4.1. В параллельном колебательном контуре возникают свободные колебания, амплитуда которых с течением времени уменьшается — колебания затухают

бы использовать получаемое переменное напряжение для питания обмотки возбуждения магнитоэлектрического излучателя. Но кроме указанных переходов энергии из электрической в магнитную и наоборот, в колебательном контуре происходит необратимый переход электромагнитной энергии во внутреннюю энергию элементов контура. Это происходит потому, что переменный электрический ток, проходя через катушку, соединительные провода и диэлектрик конденсатора, вызывает их нагревание. Поэтому свободные колебания в контуре затухают. В результате заряд конденсатора с каждым периодом свободных колебаний несколько уменьшается, пока не исчезает совсем.

4.1.2. Автоколебательная система. Чтобы в контуре могли существовать незатухающие колебания, каждый период необходимо подзаряжать конденсатор от внешнего источника. Для этого пластины конденсатора можно кратковременно соединять с источником постоянного напряжения. При этом надо учесть, что полярность напряжения на конденсаторе периодически меняется, поэтому подзарядка должна происходить только в те моменты времени, когда полярность конденсатора совпадает с полярностью источника питания. Значит, источник питания следует соединить с конденсатором через ключ, который в нужные моменты времени замыкается (рис. 4.2). В качестве такого ключа

можно использовать транзистор. Понятно, что управление работой транзистора должно осуществляться автоматически посредством самого колебательного контура.

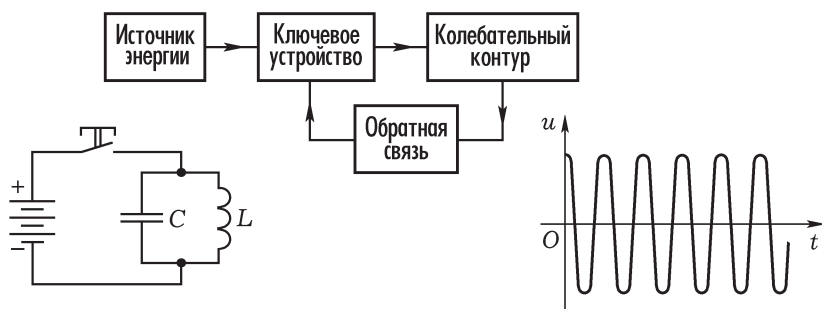


Рис. 4.2. Если каждый период пополнять потери энергии в контуре, замыкая и размыкая ключ, возникают незатухающие колебания; введение положительной обратной связи делает систему автоколебательной

Иными словами, для получения незатухающих колебаний в контуре нужно построить *автоколебательную систему*, состоящую из источника энергии, колебательного контура, ключевого устройства и звена обратной связи. Посредством обратной связи контур сам автоматически управляет поступлениями энергии из источника. Если энергия поступает в контур в такие моменты времени, что происходит компенсация потерь, то обратная связь называется *положительной*. Если, напротив, обратная связь усиливает затухание колебаний, то ее называют *отрицательной*. Обо всем этом мы уже говорили раньше, когда исследовали тепловой автогенератор Рийке (см. п. 1.3.4).

Автоколебательную систему, предназначенную для получения переменного напряжения или тока, называют *автогенератором* или просто *генератором*.

4.1.3. Транзистор в качестве ключа. Кратко напомним устройство и принцип действия биполярного транзистора, работающего в ключевом режиме.

Транзистор состоит из коллектра, эмиттера и базы. В транзисторе *n-p-n*-типа база обладает дырочной проводимостью, эмиттер и коллектор — электронной. На коллектор транзистора подают положительный потенциал относительно эмиттера. При этом коллекторный переход включен в обратном направлении и ток коллектора близок к нулю.

Если на базу подать положительный потенциал относительно эмиттера, то через переход база-эмиттер течет прямой ток. Основные носители заряда (электроны) инжектируются из эмит-

тера в базу и, поскольку толщина ее мала, быстро диффундируют к коллекторному переходу, уменьшая его толщину и сопротивление. При этом возрастает ток коллектора (рис. 4.3 а). Такое состояние транзистора называют *открытым*. В открытом состоянии транзистора ток коллектора значительно превышает ток базы.

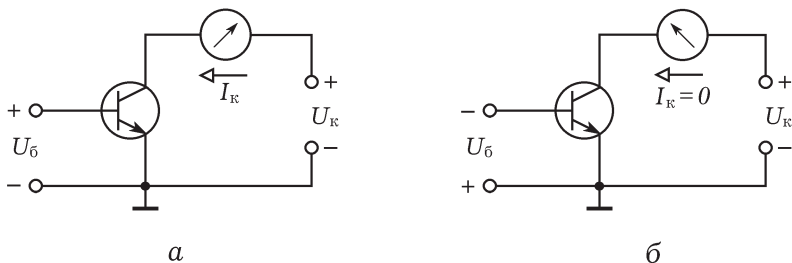


Рис. 4.3. К объяснению использования биполярного транзистора в качестве электронного ключа: а — транзистор открыт; б — транзистор закрыт

Если на базу подать отрицательный потенциал относительно эмиттера, то инжекция электронов из эмиттера в базу прекращается, сопротивление коллекторного перехода увеличивается, ток через него уменьшается практически до нуля (рис. 4.3 б). Такое состояние транзистора называют *закрытым*.

Так как небольшой ток базы управляет большим током коллектора, то транзисторный ключ можно рассматривать как *усилитель тока*.

4.1.4. Транзисторные усилители. Усилители на биполярных транзисторах во многих случаях целесообразно собирать по схеме с общим эмиттером (рис. 4.4 а). Делитель напряжения на резисторах $R1, R2$ задает положительный потенциал базы транзистора или, как говорят, смещает рабочую точку в положительную область. При этом транзистор «приоткрыт» так, что через коллекторный переход идет некоторый ток покоя. Если теперь через разделительный конденсатор $C1$ на вход транзистора подано переменное напряжение, амплитуда которого меньше постоянного напряжения смещения, то степень «приоткрытости» транзистора будет изменяться в соответствии с изменением этого напряжения. В результате таким же образом будет меняться коллекторный ток. Проходя по сопротивлению нагрузки $R3$, он создаст на нем падение напряжения, переменная составляющая которого имеет амплитуду, существенно превышающую амплитуду входного напряжения. Через разделительный конденсатор $C3$ это напряжение подается на выход усилителя. Таким образом, получается *резисторный усилитель напряжения*. Ячейка $R4, C2$ в цепи эмиттера транзистора стабилизирует постоянное

напряжение смещения на базе транзистора. Усилитель, выполненный по схеме с общим эмиттером, усиливает не только входное напряжение, но и входной ток, поэтому является *усилителем мощности входного сигнала*.

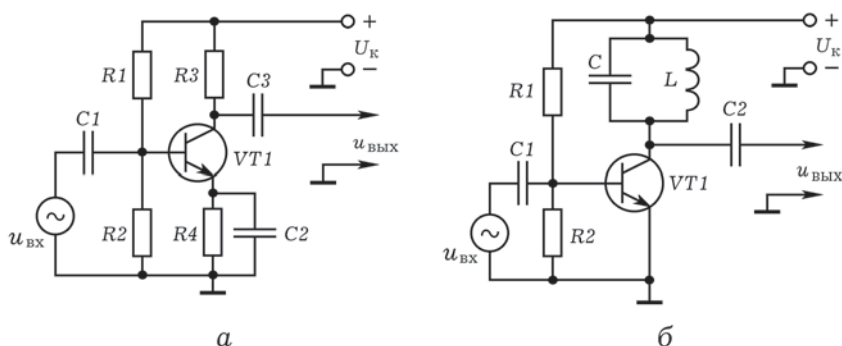


Рис. 4.4. Усилитель напряжения на биполярном транзисторе, собранный по схеме с общим эмиттером: *а* — резисторный усилитель; *б* — резонансный усилитель

Если вместо коллекторного резистора включить параллельный колебательный контур, то получится *резонансный усилитель напряжения* (рис. 4.4 б). Когда частота входного напряжения становится равной частоте собственных колебаний параллельного контура, его сопротивление резко увеличивается и напряжение на нем значительно возрастает. Конденсаторы $C1$ и $C2$ здесь раздельные, они пропускают переменную составляющую тока и не пропускают постоянную; делитель напряжения $R1, R2$ обеспечивает постоянное напряжение смещения на базе транзистора; стабилизирующая RC -ячейка в цепи эмиттера отсутствует.

4.1.5. Обратная связь. Нетрудно видеть, что резонансный усилитель на транзисторе, подключенный к источнику питания, можно рассматривать как источник энергии, соединенный с колебательным контуром через ключевое устройство (п. 4.1.2). Поэтому достаточно добавить звено положительной обратной связи, чтобы резонансный усилитель превратился в генератор.

Отбор энергии из колебательного контура для осуществления обратной связи чаще всего осуществляют посредством катушки или конденсатора. В первом случае обратную связь называют индуктивной, во втором — емкостной.

Индуктивная обратная связь реализуется посредством катушки, индуктивно связанной (то есть расположенной рядом) с катушкой колебательного контура. Чтобы обратная связь оказалась положительной, достаточно правильно включить концы

катушки связи или контурной катушки. На рис. 4.5 а изображена принципиальная схема генератора с индуктивной обратной связью. Вместо отдельной катушки для осуществления индуктивной обратной связи нередко используют часть контурной катушки. Поскольку в этом случае колебательный контур оказывается включенным тремя точками, соответствующую схему генератора называют *трехточечной* (рис. 4.5 б).

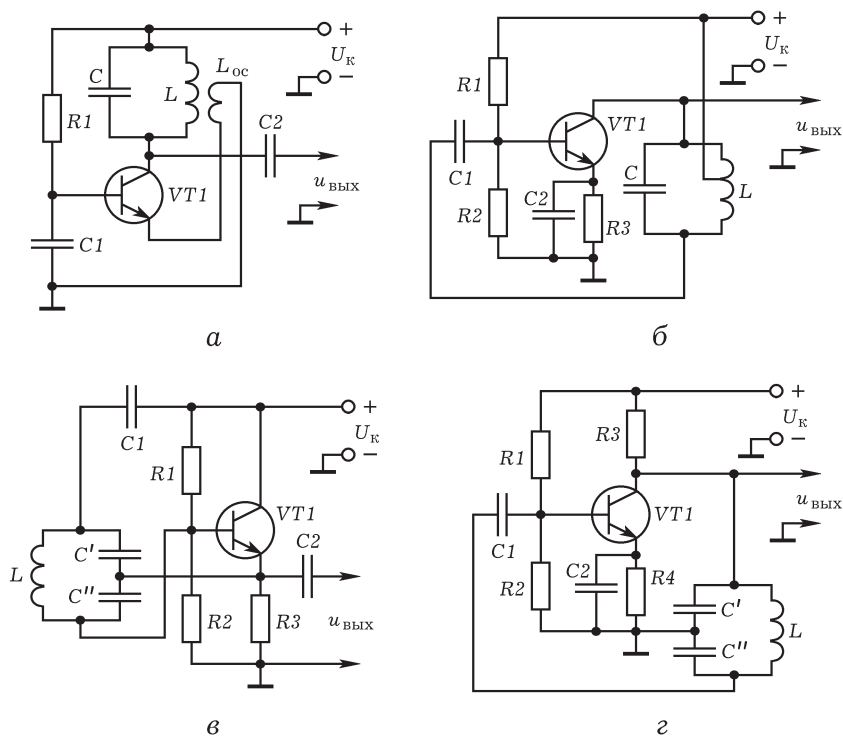


Рис. 4.5. Типовые схемы автогенераторов на биполярных транзисторах: а — трансформаторная индуктивная обратная связь; б — автотрансформаторная или трехточечная индуктивная обратная связь; в, г — трехточечная емкостная обратная связь

При *емкостной обратной связи* переменное напряжение с колебательного контура посредством конденсаторов подается на вход ключевого устройства, которое и управляет поступлением энергии в контур. Детально проследить емкостную связь в конкретном транзисторном генераторе бывает непросто, так как нужно учитывать влияние многих параметров схемы. На рис. 4.5 в, г представлены трехточечные схемы транзисторных генераторов с емкостной обратной связью.

4.2. Мощный ультразвуковой генератор

В некоторых экспериментах потребуется ультразвук такой интенсивности, при которой даже нагруженный ферритовый вибратор магнитострикционного излучателя совершает колебания на пределе прочности. Столь значительную интенсивность ультразвука обеспечит описанный ниже мощный электронный генератор.

4.2.1. Принципиальная схема ультразвукового генератора. Электронный генератор колебаний ультразвуковой частоты (рис. 4.6) состоит из двух каскадов: задающего генератора, выполненного на транзисторе $VT1$, и усилителя мощности, собранного на транзисторе $VT2$.

Задающий каскад представляет собой автогенератор с индуктивной обратной связью. Частота генерируемых колебаний определяется параметрами параллельного колебательного контура, состоящего из катушки индуктивности $L1$ и конденсатора $C2$. Контур включен в коллекторную цепь транзистора $VT1$ частью катушки $L1$, чтобы уменьшить потери энергии на нагревание. Регулировка частоты генератора осуществляется изменением индуктивности контурной катушки $L1$, что достигается перемещением внутри нее ферритового сердечника.

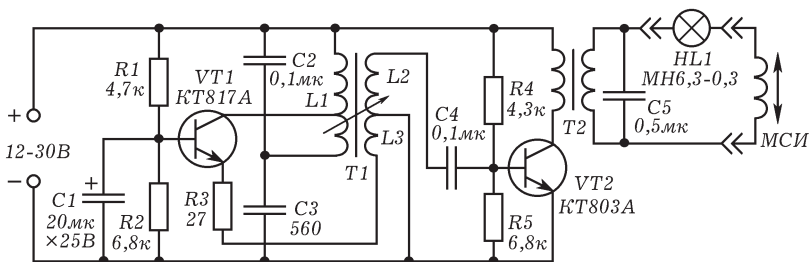


Рис. 4.6. Принципиальная схема мощного ультразвукового генератора

Обмотки (катушки) $L1$, $L2$ и $L3$, имеющие общий сердечник, образуют высокочастотный трансформатор $T1$. Обмотка $L3$ трансформатора является катушкой обратной связи. С нее переменное напряжение через ячейку $C1$, $R2$ подается на базу транзистора $VT1$. Для самовозбуждения генератора обратную связь необходимо установить положительной.

Усилительный каскад прибора собран на транзисторе $VT2$ по типовой схеме с общим эмиттером. Напряжение высокой частоты, вырабатываемое автогенератором, через катушку связи $L2$ и конденсатор $C4$ подается на базу транзистора $VT2$. Нагрузкой усилительного каскада является выходной трансформатор $T2$.

Ко вторичной обмотке этого трансформатора через лампочку накаливания *HL1* подключен магнитострикционный излучатель ультразвука *МСИ*. Конденсатор *C5* предназначен для оптимального согласования магнитострикционного излучателя с выходом генератора. Лампа накаливания *HL1* обеспечивает визуальный контроль за настройкой генератора в резонанс с вибратором излучателя.

Режим работы транзисторов по постоянному току задается соответствующими смещениями на их базах, которые осуществляются делителями напряжения *R1*, *R2* и *R4*, *R5*. Температурная стабилизация режима работы транзистора *VT1* производится резистором *R3*. Конденсатор *C1* сглаживает пульсации напряжения на базе транзистора *VT1*, обеспечивая стабильность его рабочей точки.

4.2.2. Изготовление ультразвукового генератора. Самодельными деталями прибора являются только трансформаторы *T1* и *T2*. Высокочастотный трансформатор *T1* (рис. 4.7) намотан на каркасе длиной 50 мм, имеющем сквозное отверстие для ферритового сердечника диаметром 8 мм. Первичная обмотка (катушка) *L1* трансформатора содержит 160 витков, намотанных виток к витку с отводом от середины. Катушки *L2* и *L3* содержат соответственно 20 и 30 витков. Все катушки намотаны в одну сторону медным проводом в лаковой изоляции диаметром 0,5 мм.

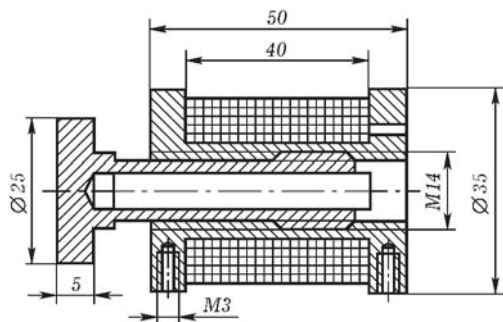


Рис. 4.7. Конструкция высокочастотного настроечного трансформатора

Выходной трансформатор намотан на тороидальном ферритовом сердечнике внешним диаметром 31 мм, внутренним 18 мм и толщиной 7 мм. Обе обмотки его одинаковы и содержат по 100 витков медного провода диаметром 0,5 мм, намотанных виток к витку. Вместо тороидального можно использовать цилиндрический сердечник длиной 40 мм из ферритового стержня марки *M400НН* диаметром 8 мм.

Транзистор $VT2$ генератора обязательно должен быть снабжен радиатором. Если необходимо получить максимальную мощность, то транзистор $VT1$ нужно взять тоже типа КТ803 и установить его на такой же радиатор, как и выходной транзистор.

Для питания генератора следует использовать выпрямитель, дающий постоянное напряжение, регулируемое в пределах от 0 до 30 В, и обеспечивающий ток до 3 А. Если имеется выпрямитель без фильтра, например, типа В-24, его нужно снабдить фильтрующим электролитическим конденсатором емкостью 1000–2000 мкФ на рабочее напряжение 50 В.

4.2.3. Настройка ультразвукового генератора. Настройка генератора производят следующим образом. К выходу прибора подключают магнестрикционный излучатель низкой частоты (см. § 3.3), ставят его вертикально и на верхний торец помещают полоску жести или лезвие безопасной бритвы (рис. 4.8). Включают блок питания и подают на генератор напряжение 10 В. Полностью вводят ферритовый сердечник в высоко-

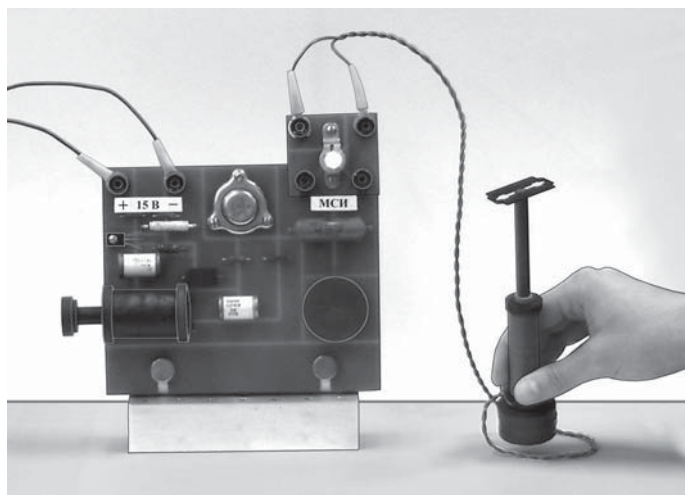


Рис. 4.8. Ультразвуковой генератор, собранный по схеме, представленной на рис. 4.6. Транзисторы не имеют радиаторов, поэтому максимальное напряжение питания не должно превышать 20 В

частотный трансформатор. Если при этом слышен слабый звук, значит, задающий генератор работает. Если звук не слышен, то меняют концы контурной катушки $L1$ (см. рис. 4.6) так, чтобы обратная связь стала положительной. При этом лампа $HL1$ начинает гореть.

Далее перемещают внутри трансформатора $T1$ настроечный сердечник, наблюдая за свечением лампы. По мере приближения к резонансу лампа горит все слабее. В момент наступления резонанса излучатель от генератора потребляет максимальную мощность, и лампа горит с минимальным накалом. Одновременно слышен дребезг лезвия, лежащего на торце вибратора. Индикаторная лампа несколько снижает выделяемую на излучателе мощность, поэтому ее можно удалить, а настройку в резонанс производить по дребезгу лежащего на вибраторе лезвия.

На этом налаживание генератора заканчивается. Максимальное напряжение питания на генератор можно подавать при условии, что вибратор магнитострикционного излучателя нагружен, например, на воду. Но и в этом случае мощность генератора настолько велика, что при настройке в резонанс ферритовый вибратор может быть разорван на части.

4.3. Учебный ультразвуковой генератор

Недостатками описанного в предыдущем параграфе генератора являются его относительная сложность и необходимость применения сетевого блока питания. Поэтому мы специально разработали настолько простой, доступный и безопасный генератор, что его можно собрать даже у себя дома, а в качестве источника питания использовать батарейки карманного фонаря. Этот генератор в дальнейшем мы будем называть *учебным*, поскольку он наиболее пригоден для простых учебных экспериментальных исследований.

4.3.1. Принцип действия учебного генератора. Принципиальная схема рекомендуемого ультразвукового генератора изображена на рис. 4.9. На транзисторе $VT1$ выполнен задающий генератор с емкостной обратной связью, а на транзисторе

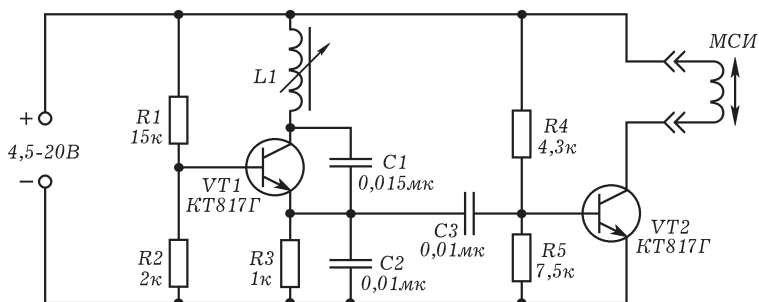


Рис. 4.9. Принципиальная схема учебного ультразвукового генератора низкой частоты

$VT2$ — усилитель мощности. Задающий генератор вырабатывает синусоидальные колебания, частота которых определяется последовательным колебательным контуром $L1, C1$, то есть индуктивностью катушки $L1$ и емкостью конденсатора $C1$. Регулировка частоты производится перемещением внутри каркаса катушки $L1$ настроечного ферритового сердечника. Режим работы транзисторов задается делителями напряжения $R1, R2$ и $R4, R5$. Конденсатор $C2$ сглаживает пульсации эмиттерного тока, идущего через резистор $R3$, и стабилизирует положение рабочей точки транзистора $VT1$. Разделительный конденсатор $C3$ предотвращает попадание постоянного напряжения с резистора $R3$ на базу транзистора $VT2$. Нагрузкой генератора является непосредственно обмотка возбуждения магнитоотрицательного излучателя МСИ, поэтому форма выходного напряжения генератора далека от синусоидальной.

4.3.2. Конструкция ультразвукового генератора. Сборку генератора можно осуществить методом навесного монтажа (рис. 4.10). Преимущества его в том, что не надо тратить время и материалы на разработку и изготовление платы, панели, корпуса, установку клемм, гнезд, тумблеров, разъемов и т. п. Наша задача не в том, чтобы сделать внешне красивый прибор и затем



Рис. 4.10. Возможный способ сборки генератора, не требующий значительных временных и материальных затрат

любоваться им на досуге. Нам нужно быстро и качественно изготовить ультразвуковой генератор, пусть даже внешне неприглядный, но внутренне, безусловно, прекрасный и, главное, надежный в работе, всегда готовый к изменениям, переделкам, совершенствованиям. Последнее весьма существенно, поэтому места соединений радиодеталей нужно делать так, чтобы при перепайке они не разваливались.

Для не слишком опытных электронщиков ниже на рис. 4.11 приведена монтажная схема ультразвукового генератора.

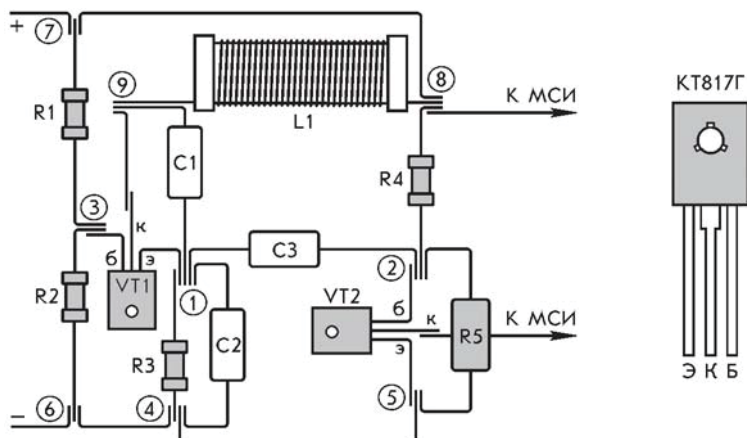


Рис. 4.11. Монтажная схема ультразвукового генератора; справа приведена цоколевка используемого транзистора

4.3.3. Технология изготовления прибора. Начинать изготовление генератора следует с намотки контурной катушки $L1$ (рис. 4.9). Основой ее является каркас длиной 40–50 мм с осевым отверстием диаметром 9 мм. Сделать каркас можно из бумаги по описанной в п. 3.3.5 технологии изготовления магнитострикционного излучателя. Однако проще в качестве каркаса контурной катушки использовать отрезок полихлорвиниловой трубки 1 диаметром 10 мм и длиной 60 мм (рис. 4.12). На трубку наденьте резиновые колечки 2 шириной 5 мм, под них проденьте лепестки 3 и 4 , к которым припаяйте начало, а после намотки, конец провода 5 . Наматывать катушку нужно виток к витку, прокладывая между соседними слоями тонкую бумагу 6 . Обмотка должна содержать 500 витков медного провода в лаковой изоляции диаметром около 0,5 мм. Настраечным сердечником 7 контурной катушки гене-

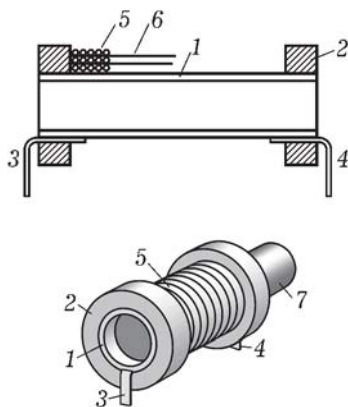


Рис. 4.12. Конструкция контурной катушки ультразвукового генератора: 1 — полихлорвиниловая трубка; 2 — резиновые колечки; $3, 4$ — лепестки; 5 — провод; 6 — тонкая бумага; 7 — настраечный сердечник

ратора является отрезок ферритового стержня диаметром 8 мм и длиной 60–70 мм.

При работе генератора на транзисторе *VT2* (см. рис. 4.9) выделяется довольно значительная мощность. Чтобы исключить перегрев и выход из строя транзистора, его следует снабдить радиатором, в качестве которого можно использовать пластинку дюралюминия минимальным размером 5×20×50 мм. К такому радиатору транзистор плотно прижимают винтом М3 с гайкой.

Радиодетали удобно соединять в порядке обозначения узлов на монтажной схеме (рис. 4.11). Если раньше вам никогда не приходилось держать в руках паяльник, то необходимо дать вам несколько советов. Прежде чем паять, плоскогубцами выпрямите и ножом зачистите выводы всех радиодеталей и концы соединительных проводов. Сделать это нужно для того, чтобы снять с проводников изоляцию и оксидную пленку, которые препятствуют их электрическому контакту. От аккуратности и тщательности этих операций зависит надежность работы вашего прибора.

Затем облудите жало паяльника. Для этого на мгновение погрузите очищенное жало паяльника в канифоль и быстро перенесите на припой, стараясь расплавить его. Повторяйте операцию до тех пор, пока жало паяльника равномерно не покроется серебристым слоем расплавленного припоя. После этого последовательно облудите выводы всех радиодеталей и соединительных проводов. Делается это так. Зачищенный конец проводника накладывают на кусок канифоли, облуженным жалом паяльника расплавляют припой так, чтобы на жале осталась небольшая капля и этой каплей расплавленного припоя проводят по концу проводника, одновременно поворачивая проводник вокруг оси с тем, чтобы он равномерно покрылся тонким слоем припоя. Как правило, облуженные концы радиодеталей и проводов должны быть не длиннее 5 мм. Облуживание следует производить достаточно быстро, чтобы не допустить перегрева радиодеталей (особенно бояться перегрева полупроводниковые приборы).

Сам процесс пайки генератора прост и приятен: нужно соединяемые детали привести в соприкосновение, затем прикоснуться к месту их соединения жалом паяльника с каплей расплавленного припоя на его конце, выждать небольшое время, пока не расплавится полуда на концах соединяемых деталей и припой равномерно не растечется по месту соединения, убрать паяльник и подождать, пока припой не затвердеет, приобретая матовый оттенок. При соединении трех или более выводов, а также в том случае, если к данной точке впоследствии предполагается припаивать что-то еще, выводы можно предварительно соединить тонким медным проводом, который заранее необходимо очистить от изоляции и облудить.

4.3.4. Налаживание и проверка генератора в работе.

Для питания генератора можно использовать 2–4 последовательно соединенные батарейки на напряжение 4,5 В каждая. В некоторых опытах достаточно напряжения, даваемого одной батарейкой, большинство опытов обеспечивается напряжением питания генератора 9 В. Правильно собранный генератор никакого налаживания не требует. Иногда в силу разброса параметров радиодеталей резонансная частота магнитострикционного излучателя не попадает в диапазон частот генератора. Тогда нужно подобрать емкость конденсатора $C1$ или количество витков катушки $L1$ (см. рис. 4.9).

Проверку работоспособности генератора проведите в такой последовательности. Магнитострикционный излучатель поставьте вертикально на стол и на торец его вибратора поместите лезвие. Настроечный ферритовый сердечник контурной катушки генератора полностью вдвиньте в каркас этой катушки (рис. 4.12). Включите питание генератора. При этом вы должны услышать слабый звук высокой частоты. Медленно, поворачивая вокруг оси, выдвигайте настроечный сердечник из каркаса контурной катушки. Звук будет ослабевать и, возможно, при определенном положении сердечника вы вообще перестанете его слышать. Продолжайте выдвигать сердечник до тех пор, пока лезвие не начнет дребезжать на торце вибратора. Проскочите это положение и вновь вернитесь к нему. При найденном положении сердечника имеет место резонанс: частота генератора совпадает с основной собственной частотой вибратора и амплитуда его колебаний резко возрастает.

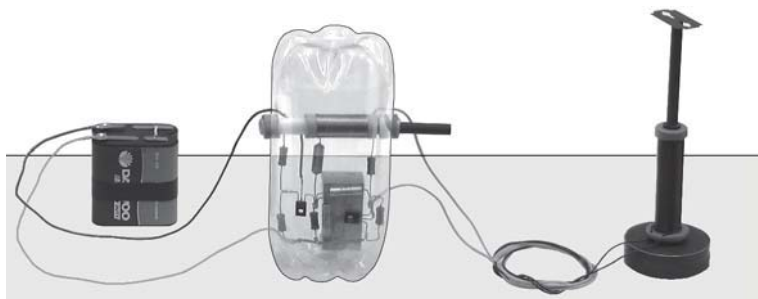


Рис. 4.13. Внешний вид приборов для получения ультразвука низкой частоты: ультразвуковой генератор для удобства можно поместить внутри пластиковой бутылки, а его питание может осуществляться от батареек

Чтобы окончательно убедиться, что изготовленные вами приборы работают как надо, уберите с торца вибратора лезвие и аккуратно нанесите на него каплю воды. Настройте генератор в резонанс с вибратором магнитострикционного излучателя. Если

при этом капля воды немедленно распыляется, то ваши приборы действительно обеспечивают получение ультразвука необходимой интенсивности.

Для удобства работы с генератором его следует заключить в пластиковый корпус, изготовленный из подходящей упаковки, например, из пластиковой бутылки, как это показано на рис. 4.13.

4.4. Получение ультразвука средней частоты

Рассмотренные выше электронные генераторы и магнито-стрикционные излучатели обеспечивают получение *ультразвука низкой частоты* в диапазоне от 15 до 25 кГц. Упругие волны частотой от 25 до 500 кГц условно можно назвать *ультразвуком средней частоты*. В экспериментальных исследованиях этой книги используется ультразвук частотой примерно до 150 кГц. Колебания такой частоты при возбуждении на основной гармонике дает ферритовый вибратор длиной около 15 мм. Но для их получения необходимо внести изменения в конструкции генератора и излучателя. Для определенности ниже будем иметь в виду учебный ультразвуковой генератор, описанный в предыдущем параграфе.

4.4.1. Частотный диапазон ультразвукового генератора.

Как уже было сказано раньше, частота вырабатываемых генератором колебаний определяется параметрами колебательного контура, состоящего из катушки переменной индуктивности $L1$ и конденсатора $C1$ (см. рис. 4.9).

Чтобы определить частотный диапазон учебного ультразвукового генератора, к его выходу подключите обмотку возбуждения магнито-стрикционного излучателя (см. § 3.3) и подайте на генератор напряжение питания в пределах 5–10 В. Переменное напряжение с выхода генератора подайте на вход усилителя вертикального отклонения осциллографа, например, типа С1-65А. Установите чувствительность осциллографа 1–10 В/дел, частоту развертки 50 мкс. Эти параметры можно подобрать экспериментально так, чтобы на экране осциллографа отчетливо была видна осциллограмма вырабатываемого генератором напряжения.

Перемещая настроенный ферритовый сердечник внутри контурной катушки генератора, вы увидите, что осциллограмма сигнала на экране осциллографа сжимается или растягивается. Пользуясь значениями длительности развертки, по осциллограмме определите максимальный период колебаний, когда ферритовый сердечник полностью вдвинут в каркас контурной катушки, и минимальный период, когда сердечник вообще удален из катушки. По этим значениям вычислите минимальную и

максимальную границы частотного диапазона, обеспечиваемого генератором. Произведя указанные действия, вы получите, что колебательный контур, имеющий рекомендованные в п. 4.3.2 параметры, обеспечивает перестройку генератора в пределах диапазона частот примерно от 15 до 25 кГц.

Таким образом, учебный ультразвуковой генератор (см. п. 4.3.2) вместе с магнитострикционным излучателем (см. п. 3.3.4) позволяет получить звук вблизи верхней границы слышимости и ультразвук, непосредственно примыкающий к этой границе. Упругие волны указанного диапазона вполне естественно назвать звуком высокой частоты или *ультразвуком низкой частоты* (пессимисты предпочитают первое название, оптимисты — второе).

4.4.2. Ультразвуковой генератор средней частоты. Понятно, что для получения переменного напряжения средней ультразвуковой частоты необходимо изменить параметры колебательного контура генератора. Экспериментально установлено, что близким к оптимальному решением этой задачи является использование колебательного контура, катушка $L1$ которого содержит 420–450 витков медного провода в лаковой изоляции диаметром около 0,3 мм, а конденсатор $C1$ имеет емкость 510 пФ.

Вместо того, чтобы делать новый генератор, лучше в прежнюю конструкцию внести необходимые изменения. В первую очередь надо переделать катушку $L1$ колебательного контура: она по-прежнему должна содержать 550 витков, но при ее намотке нужно сделать отвод от 450 витка и продолжать намотку в ту же сторону. Далее генератор надо снабдить двухполюсным переключателем, позволяющим низкочастотный колебательный контур заменять на контур средней частоты. В результате принципиальная схема прибора приобретает вид, показанный на (рис. 4.14). Заметим, что в генераторе вместо обозначенного на

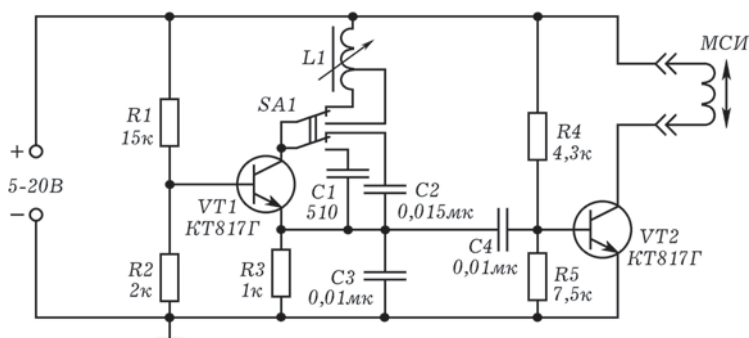


Рис. 4.14. Принципиальная схема двухдиапазонного генератора: изменяя положение переключателей, можно получать упругие волны от ультразвука низкой частоты до средней

схеме (см. рис. 4.9) транзистора $VT2$ типа КТ817Г можно использовать более мощный транзистор типа КТ829А или 2N3055, которые в таком случае должны быть снабжены мощными радиаторами.

4.4.3. Магнитострикционные излучатели ультразвука на частоту до 50 кГц. Излучатели с вибраторами длиной 60–120 мм могут быть изготовлены так, как показано на рис. 4.15. Ферритовый вибратор нижним торцом помещен на поверхность

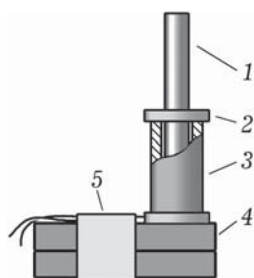


Рис. 4.15. Конструкция магнитострикционного излучателя с длиной вибратора 60–100 мм: 1 — вибратор; 2 — резиновые колечки; 3 — обмотка возбуждения; 4 — магниты; 5 — изолянта

поляризующего магнита. Оптимальную величину магнитного поля проще всего подобрать, изменяя число магнитов. Мы рекомендуем использовать плоские керамические магниты размером $7 \times 16 \times 46$ мм от мебельных магнитных защелок. Обычно требуемое число таких магнитов колеблется от двух до четырех. Обмотка возбуждения содержит порядка 80 витков медного провода диаметром 0,5 мм, намотанных на каркас из отрезка стеклянной или полихлорвиниловой трубки внутренним диаметром 9–10 мм и длиной 5–7 см с ограничителями в виде резиновых колечек. Лучшее количество витков обмотки

возбуждения для каждого вибратора подбирать экспериментально. Для этого на каркас нужно намотать заведомо большее число витков (скажем, 150) и затем, постепенно отматывая витки, добиться максимально возможной амплитуды колебаний вибратора. Для успешной работы излучателя необходимо, чтобы вибратор не касался каркаса обмотки возбуждения.

Изготовленный описанным способом излучатель подключите к выходу ультразвукового генератора низкой частоты. На верхний торец вибратора поместите каплю воды и настройте генератор в резонанс с вибратором. О нормальной работе всех приборов будет свидетельствовать интенсивное распыление капли воды и разрыв ненагруженного вибратора.

4.4.4. Магнитострикционные излучатели ультразвука средней частоты. В дальнейшем вам потребуется получать упругую волну более высокой частоты, а именно, в диапазоне 100–150 кГц. Для этого ферритовый вибратор должен иметь длину в пределах 15–30 мм. Экспериментально установлено, что для вибратора длиной 15–20 мм оптимальная обмотка

возбуждения должна состоять из 15–20 витков медного провода диаметром 0,5–0,7 мм в лаковой изоляции.

В п. 4.4.2 описан электронный генератор, обеспечивающий получение ультразвука средней частоты. Для наладки генератора вам потребуется простейший излучатель. Обмотку возбуждения для него можно выполнить без каркаса, воспользовавшись круглой оправкой диаметром около 9 мм. На оправку компактно намотайте нужное число витков и получившуюся обмотку снимите с оправки. Для надежности можно скрепить витки узкими полосками изоленды и припаять к выводам обмотки многожильные проводники. Вибратор должен свободно находиться внутри обмотки.

Ферритовый вибратор указанного размера, находящийся внутри обмотки возбуждения, поместите нижним торцом на стопку магнитов (рис. 4.16). На верхний торец нанесите каплю воды. На вход генератора подайте напряжение 20 В. При настройке в резонанс слышен низкий звук, который возникает благодаря механическому взаимодействию вибратора с магнитами. Капля на торце излучателя мутнеет, начинает совершать колебания, возникает шипящий звук, и капля может распылиться.

При работе с излучателями средней частоты вначале от вас может потребоваться значительное внимание, поскольку резонанс на средних частотах при малых интенсивностях ультразвука

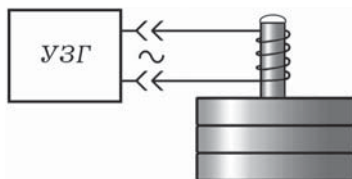


Рис. 4.16. Простейшая конструкция излучателя ультразвука средней частоты

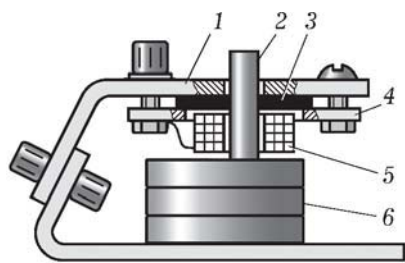


Рис. 4.17. Излучатель ультразвука средней частоты: 1 — стойка излучателя; 2 — ферритовый вибратор; 3 — резиновый диск; 4 — шайба из текстолита; 5 — обмотка возбуждения; 6 — магниты

6 мм, просверленном в резиновом диске. Диаметр резинового диска 20–30 мм, а толщина его 2–3 мм. Этот диск с помощью вы-

не так заметен, как при использовании магнитоstrictionных излучателей низкой частоты. Однако спустя небольшое время вы, безусловно, освоитесь и сможете обнаруживать явление резонанса не только на основной частоте, но и на второй гармонике. Это особенно хорошо удастся, если вибратор имеет длину не менее 30 мм.

Конструкция более надежного варианта излучателя представлена на рис. 4.17. Ферритовый вибратор закреплен посередине в отверстии диаметром

резанной из тонкого текстолита шайбы и четырех болтов с гайками (два из них одновременно являются клеммами, к которым подключены концы обмотки возбуждения) крепится к стойке излучателя. Стойку лучше всего изготовить из винипласта или оргстекла, причем так, чтобы можно было поднимать и опускать ее верхнюю часть вместе с закрепленным на ней вибратором. Подмагничивание вибратора осуществляется стопой из 3–5 кольцевых или плоских керамических магнитов, верхний из которых

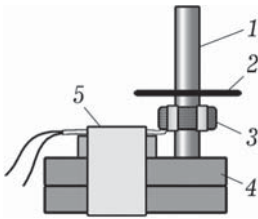


Рис. 4.18. Возможная конструкция магнитострикционного излучателя средней частоты: 1 — вибратор; 2 — резиновая пластинка; 3 — обмотка возбуждения; 4 — магниты; 5 — изолента

касается нижнего торца вибратора. Обмотка возбуждения излучателя не должна соприкасаться с вибратором.

Прост в изготовлении и удобен в работе магнитострикционный излучатель ультразвука средней частоты, конструкция которого понятна из рис. 4.18. Обмотка возбуждения представляет собой 30 витков провода диаметром 0,5–0,7 мм, компактно намотанных в виде катушки длиной 5–10 мм, внутренним диаметром несколько больше диаметра вибратора. Витки катушки скреплены узкими полосками изолянта.

К выводам катушки припаяны многожильные проводники длиной около 30 см. Посередине вибратора расположена тонкая резиновая пластинка произвольной формы, необходимая для защиты нижнего торца вибратора от жидкости. Для подмагничивания вибратора использованы плоские керамические магниты размером $7 \times 16 \times 46$ мм. Выводы обмотки возбуждения изолянтной зафиксированы на магнитах. Вибратор нижним торцом стоит на магнитах, практически не касаясь обмотки возбуждения.

Рекомендуем тщательно исследовать описанные в параграфе генератор и магнитострикционные излучатели ультразвука средней частоты.

Глава 5

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Теперь, когда в вашем распоряжении имеются приборы для получения ультразвука низкой и средней частоты, можно более подробно исследовать физические особенности и возможности магнитострикционных излучателей с ферритовыми вибраторами. Попутно вы познакомитесь с замечательными явлениями физики упругих волн, которые не только интересны сами по себе, но и имеют важное практическое значение.

5.1. Собственные колебания стержня

Магнитострикционный излучатель ультразвука представляет собой просто упругий стержень, совершающий вынужденные незатухающие колебания на ультразвуковой частоте. Прделанные вами опыты показали, что интенсивность этих колебаний на разных частотах различна и поэтому для получения ультразвука максимальной интенсивности следует использовать явление резонанса. Прежде чем говорить о резонансе, исследуем свободные колебания, которые может совершать упругий стержень.

5.1.1. Возбуждение колебаний стержня ударом. Любая колебательная система совершает свободные колебания с частотой, которая зависит от ее параметров. Например, частота колебаний близкого к математическому нитяного маятника зависит от длины нити, пружинного — от жесткости пружины и массы груза, свободные электромагнитные колебания в контуре совершаются с частотой, определяемой параметрами катушки и конденсатора и т. д.

Исследуйте кратко рассмотренное в п.1.2.1 явление возбуждения ударом продольных упругих колебаний стержня. Для этого дюралевый (или стальной) стержень длиной около метра закрепите горизонтально за середину в лапке штатива или возьмите в руку. На расстоянии нескольких сантиметров от одного из торцов стержня расположите микрофон, подключенный к усилителю низкой частоты, сигнал с которого поступает на осциллограф и лампу накаливания (рис. 5.1). Подобную эксперимен-

тальную установку с индикатором звука вы уже использовали (см. § 2.3).

Опыт 1. Свободные затухающие колебания стержня. По наиболее удаленному от микрофона торцу стержня в направлении его оси резко ударьте легким молотком. При этом вы услышите высокий чистый звук, увидите, что лампа индикатора горит, а на экране осциллографа появилась осциллограмма звуковых колебаний давления в точке, где расположен микрофон. Однако этот звук довольно быстро ослабевает, амплитуда осциллограммы на экране уменьшается, лампа горит слабее. Спустя небольшое время звук исчезает, и лампа звукового индикатора гаснет.

Из опыта следует, что кратковременным ударом можно возбудить свободные продольные колебания стержня, которые излучаются в упругую среду в виде почти гармонической волны. Объяснить возбуждение колебаний можно тем, что при ударе возникает кратковременный импульс сжатия, который со скоростью звука в материале стержня распространяется от одного его торца до другого и обратно, заставляя их совершать колебания. Эта упрощенная модель явления дальше будет уточнена.

В результате излучения и по другим причинам энергия колебаний стержня уменьшается, и сами колебания затухают.

Отношение энергии, запасенной колебательной системой, к энергии, теряемой за период ее колебаний, характеризует *добротность* системы. Опыт показывает, что поскольку продольные колебания закрепленного за середину упругого стержня затухают сравнительно медленно, такая колебательная система обладает сравнительно высокой добротностью.

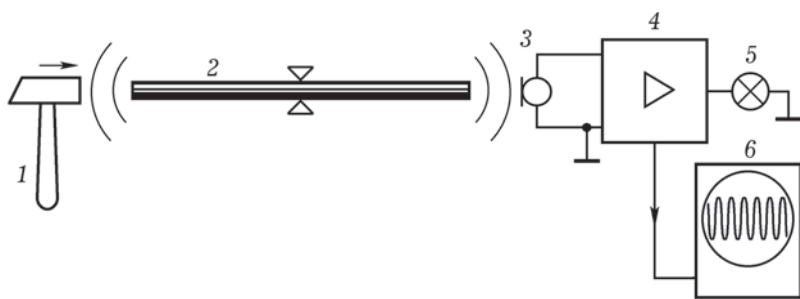


Рис. 5.1. К исследованию колебаний стержня: 1 — молоток; 2 — стержень; 3 — микрофон; 4 — усилитель звуковой частоты; 5 — лампа накаливания; 6 — осциллограф

Опыт 2. Зависимость частоты собственных колебаний от длины стержня. Повторите опыт 1 со стержнями разной длины, изготовленными из одного и того же материала. На слух и

по осциллограмме вы обнаружите, что высота звука зависит от длины стержня: чем короче стержень, тем при прочих равных условиях выше звук и тем больше частота осциллограммы звуковых колебаний.

Объясняется это, например, тем, что чем короче стержень, тем меньшее расстояние нужно пройти импульсу сжатия от одного торца до другого и обратно, а значит, тем больше частота свободных колебаний стержня.

Опыт 3. Зависимость добротности колебательной системы от потерь энергии в ней. Прикоснитесь к боковой поверхности колеблющегося стержня пальцами руки — громкость звука и амплитуда осциллограммы будут быстро уменьшаться. Чем дальше от середины стержня, в которой он закреплен, вы прикоснетесь к стержню, тем быстрее при прочих равных условиях убывает амплитуда звуковых колебаний.

Очевидно, потери энергии в этом опыте возрастают за счет трения стержня о пальцы. Так как затухание колебаний стержня возрастает, добротность рассматриваемой колебательной системы уменьшается.

Опыт 4. Крепление стержня в произвольной точке. Закрепите стержень не за середину, а за какой-либо иной участок, расположенный ближе к его концу. После кратковременного удара легким молотком по торцу стержня вы практически не заметите возникновения сколько-нибудь чистого и продолжительного звука. Отсюда следует, что добротность стержня как колебательной системы сильно зависит от положения места, за которое он закреплен.

Опыт 5. Возбуждение стержня на более высоких частотах. Закрепите стержень не за середину, а за место, расположенное на расстоянии четверти его длины от конца. При ударном возбуждении продольных колебаний стержня вы услышите более высокий звук, меньшей громкости и быстрее затухающий, чем в том случае, когда тот же стержень был закреплен за середину. Осциллограмма показывает увеличение частоты излучаемого звука в два раза и значительное уменьшение его амплитуды. Из опыта следует, что имеются такие места, крепление стержня за которые обеспечивает при ударном возбуждении получение достаточно интенсивных упругих колебаний.

5.1.2. Стоячая волна в стержне. Полученные в эксперименте факты позволяют предположить, что при кратковременном ударе в стержне устанавливается стоячая упругая волна. Можно представить себе, что распространяющийся по стержню кратковременный импульс сжатия быстро расползается так, что спустя небольшое время после удара торцы стержня совершают почти

гармонические колебания. Поэтому анализ явления возможно провести как на языке импульсов, так и на языке гармонических волн. Первый язык мы используем позже (см. п. 5.3.1), здесь же рассмотрим собственные колебания на языке гармонических волн, распространяющихся в стержне.

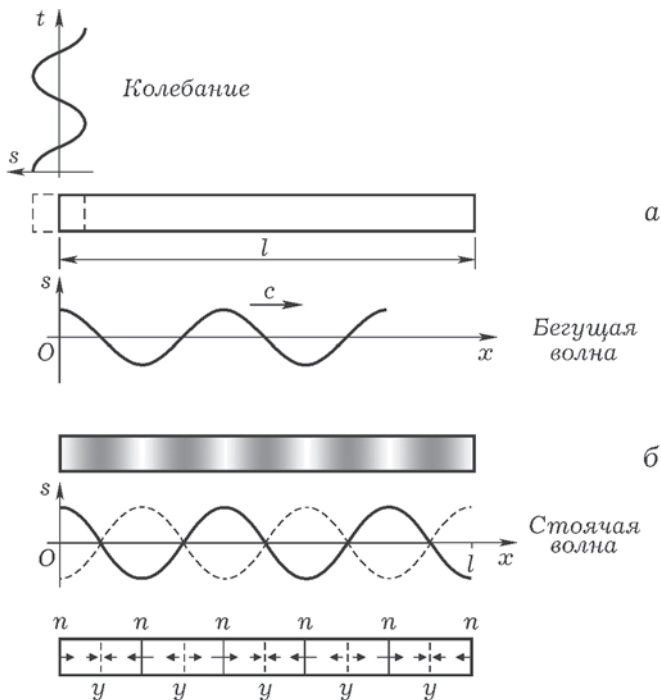


Рис. 5.2. Если один торец стержня совершает гармонические колебания, по стержню начинает распространяться упругая волна; дойдя до противоположного конца, волна отражается и интерферирует с падающей, в результате в стержне возникает стоячая волна; пучности и узлы этой волны обозначены соответственно через n и y

Пусть один из концов свободного (незакрепленного) стержня длиной l (рис. 5.2 а) под действием вынуждающей силы совершает колебания по гармоническому закону

$$s_1 = a \sin \omega t, \quad (5.1)$$

где s_1 — смещение торца, a — амплитуда колебания, $\omega = 2\pi\nu$ — круговая частота и t — время. Тогда по стержню побежит упругая синусоидальная волна, которая, дойдя до второго конца стержня, отразится без изменения фазы и вернется к первому. Если пренебречь потерями, то первый конец стержня под действием отраженной волны будет участвовать в колебательном

движении

$$s_2 = a \sin \left[\omega \left(t - \frac{2l}{c} \right) \right], \quad (5.2)$$

где c — скорость звуковой волны в стержне. Результирующее колебание этого конца стержня, происходящее под действием вынуждающей силы и силы, развиваемой отраженной волной, описывается формулой

$$s = s_1 + s_2 = 2a \cos \frac{\omega l}{c} \cdot \sin \left[\omega \left(t - \frac{l}{c} \right) \right]. \quad (5.3)$$

Таким образом, левый конец стержня совершает гармоническое колебание с амплитудой $A = 2a \cos(\omega l/c)$.

Стержень начинает излучать упругую волну наибольшей интенсивности при таких частотах ω , при которых амплитуда A вынужденных колебаний его торцов максимальна, то есть при выполнении условий

$$\cos \frac{\omega l}{c} = 1 \quad \text{или} \quad \frac{\omega l}{c} = k\pi, \quad \text{где} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Выражая ω через ν , из последней формулы получаем

$$\nu = \frac{kc}{2l}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (5.4)$$

5.1.3. Собственные частоты стержня. Частоты, определяемые формулой (5.4), называются *собственными частотами* свободного стержня. При $k = 0$ собственная частота стержня равна нулю (стержень покоится). Собственная частота при $k = 1$

$$\nu = \frac{c}{2l} \quad (5.5)$$

называется *основной собственной частотой*. Остальные собственные частоты принято называть *гармониками* соответствующего порядка. Если говорят, что вибратор возбуждается на третьей гармонике, то под этим подразумевается, что он колеблется с частотой $\nu = 3c/2l$.

Закрепив стержень не за середину, а на расстоянии четверти его длины от конца (п. 5.1.1, опыт 5), вы определили положение одного из узлов смещений стоячей волны. Поэтому ударом вы возбудили его колебания на второй гармонике, так что на длине стержня стали укладываться две полуволны звука. В результате излучаемый в воздух звук стал выше в два раза по сравнению со звуком, излучаемым стержнем на основной частоте.

Пользуясь выражением (2.5) для длины волны $\lambda = c/\nu$, из формулы (5.4) получаем

$$l = \frac{kc}{2\nu} = \frac{1}{2} k\lambda, \quad k = 1, 2, \dots \quad (5.6)$$

Следовательно, при возбуждении стержня на k -й гармонике вдоль его длины укладывается k длин полуволн звука, то есть

в стержне действительно устанавливается стоячая звуковая волна, получающаяся в результате интерференции падающей на второй конец стержня и отраженной от него волн (рис. 5.2 б).

Если стержень возбуждается на основной собственной частоте, то на нем укладывается половина длины волны звука, так что в середине стержня образуется узел смещений стоячей волны. Именно этим объясняется то, что когда вы закрепили стержень за середину, при ударе по торцу он излучал звуковую волну, а когда закрепили за любую другую точку — нет (п. 5.1.1).

5.2. Резонансное возбуждение вибратора магнитострикционного излучателя

В предыдущем параграфе выяснилось, что закрепленный за середину металлический стержень совершает свободные затухающие колебания, если ударить по его торцу. В магнитострикционном излучателе получение упругих волн происходит тоже за счет колебаний стержня — ферритового вибратора, закрепленного за середину. Исследуйте работу магнитострикционного излучателя.

5.2.1. Явление резонанса. Начните с более детального изучения явления, которое уже было рассмотрено в пп. 3.3.4 и 4.3.2. Подключите излучатель к ультразвуковому генератору. На верхний торец ферритового вибратора положите лезвие безопасной бритвы (рис. 3.14 или 4.13). Включите генератор и постепенно увеличивайте частоту переменного тока, проходящего по обмотке возбуждения.

При увеличении частоты тон слабого звука, издаваемого излучателем, повышается. При некотором значении частоты слышен резкий дребезжащий звук, издаваемый лежащим на вибраторе лезвием. Для вибратора длиной 160 мм эта частота составляет 18 кГц.

Объясним наблюдаемое явление. За счет чего появляется дребезжание лезвия? По-видимому, если вибратор колеблется, а лежащее на нем лезвие не успевает совершать колебания вместе с вибратором, то торец вибратора будет то ударять по лезвию, то уходить от него, и тогда возникает дребезжащий звук. Но почему нет этого звука при частотах, отличных от 18 кГц? Видимо, следует предположить, что амплитуда колебаний вибратора на всех других частотах много меньше, чем на частоте 18 кГц, и лезвие успевает совершать колебания вместе с вибратором.

Действительно, из графиков рис. 3.1 (см. п. 3.1.1) видно, что величина деформации ферромагнетика за счет магнитострикционного эффекта невелика. Относительное изменение длины

вибратора $\Delta l/l$ не превышает 10^{-5} – 10^{-4} , поэтому мала и амплитуда вынужденных колебаний вибратора. Но при некоторой частоте переменного тока, проходящего по обмотке возбуждения, амплитуда колебаний торца вибратора увеличивается настолько, что лезвие вследствие инерции не успевает за ним.

Проверьте правильность этих рассуждений. Уберите с вибратора лезвие и вновь медленно подводите частоту к тому ее значению, при котором ранее появлялся дребезжащий звук. Как только вы достигнете его, почувствуется давление на барабанные перепонки, а звука по-прежнему слышно почти не будет. Это вновь говорит о том, что при найденной частоте вибратор излучателя колеблется со значительной амплитудой, возбуждая в воздухе почти неслышимую ухом, но воспринимаемую им ультразвуковую волну.

Итак, из выполненного опыта следует, что для получения с помощью данного магнитострикционного излучателя ультразвука максимальной интенсивности следует использовать резонансное возбуждение вибратора на одной из собственных частот.

5.2.2. Стоячая волна в вибраторе. Подключите магнитострикционный излучатель к выходу генератора и подберите такую частоту генератора, при которой лезвие, помещенное на торец вибратора, дребезжит наиболее громко. Не выключая генератор, уберите лезвие и пальцем коснитесь торца излучателя. Вы почувствуете, что торец «скользкий» (рис. 5.3 *а*). Таким же

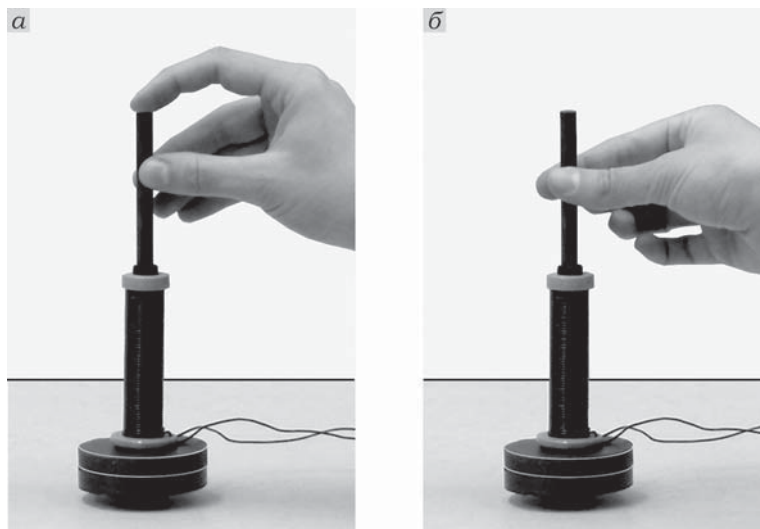


Рис. 5.3. Торец и боковая поверхность колеблющегося вибратора магнитострикционного излучателя воспринимаются скользкими

он воспринимается, если двумя пальцами обхватить конец вибратора (рис. 5.3 б).

Перемещая пальцы к середине вибратора, вы заметите, что ощущение скользкости уменьшается и совсем исчезает возле места крепления вибратора в каркасе обмотки возбуждения.

Проделанные наблюдения показывают, что амплитуда колебаний вибратора максимальна вблизи торца и уменьшается к его середине, где становится равной нулю.

Отсюда следует, что вдоль вибратора колебания распределены неравномерно. Но неравномерное распределение амплитуды колебаний характерно для стоячей волны, в которой чередуются области максимальной и минимальной амплитуды (*пучности* и *узлы*) колебаний.

Таким образом, простое ощупывание работающего вибратора показывает, что в нем устанавливается стоячая упругая волна с пучностями смещения s на концах и узлом смещения посередине вибратора (рис. 5.4). Значит, на длине вибратора l

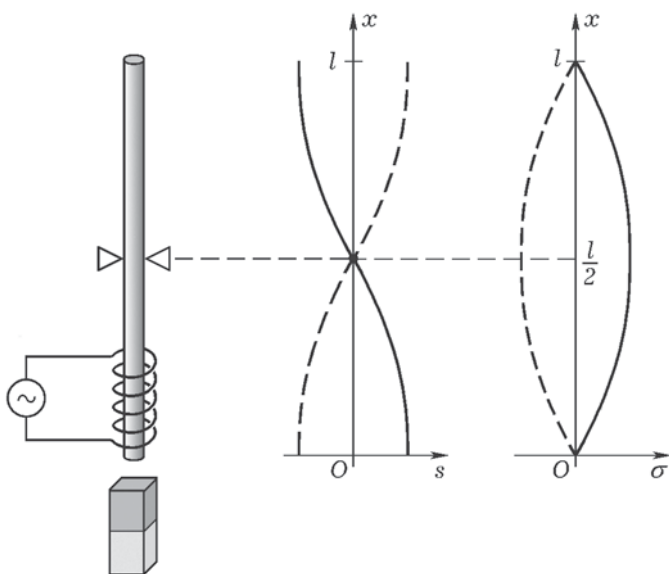


Рис. 5.4. Стоячая волна в вибраторе магнестрикционного излучателя

укладывается половина длины волны λ ультразвука в материале вибратора

$$l = \frac{\lambda}{2}. \quad (5.7)$$

Этой наибольшей длине волны соответствует наименьшая частота, на которой можно возбудить данный вибратор. Она, как вы знаете, называется *основной собственной частотой* виб-

ратора. Возможны резонансные колебания вибратора на более высоких собственных частотах, которые называются *гармониками*. В этом случае в вибраторе тоже устанавливаются стоячие волны так, что на длине вибратора укладывается несколько длин полуволн ультразвука.

Вы чаще всего будете работать на основной собственной частоте вибратора, поскольку амплитуда колебаний на этой частоте больше, чем на любой из гармоник. В этом нетрудно убедиться, добываясь резонансных колебаний вибратора на более высоких частотах, чем основная.

5.2.3. Механические напряжения в вибраторе. Авторы ощущают свою вину перед вами, поскольку лишь здесь решились подробно обсудить неприятную особенность феррита как материала для вибратора. Дело в том, что интенсивность ультразвуковых колебаний находящегося в воздухе ферритового вибратора настолько велика, что при достаточно длительной работе он неизбежно будет разорван на части! Извиняет нас только то, что мы хотели, чтобы вы сами открыли это замечательное проявление резонанса.

Разве не восхитительно, что вы научились так преобразовывать энергию одной-двух батареек, что ее хватает для разрыва прочного стержня! Конечно, феррит хрупок и стержень из него нетрудно переломить руками. Но попробуйте, растягивая руками, разорвать этот стержень! Конечно, у вас ничего не получится, поскольку прочность феррита на разрыв достаточно велика.

Настало время разобраться с физикой явления. Начнем с тщательного анализа того, как оно происходит, а для этого в первую очередь вспомним условия эксперимента. Вы располагаете магнитострикционный излучатель вертикально, его вибратор мягко закреплен за середину и полностью находится в воздухе. Далее вы настраиваете генератор в резонанс с вибратором. Сразу вибратор никогда не разрывается. Должно пройти некоторое время, в течение которого вибратор совершает колебания с максимальной амплитудой, и затем происходит его разрыв. Чаще всего область разрыва находится вблизи середины вибратора.

Но вблизи середины смещение s стоячей волны минимально, то есть вибратор там практически не колеблется. Зато деформация стержня и механическое напряжение, равное отношению силы упругости к площади поперечного сечения вибратора, максимальны (см. рис. 5.4)! Это еще раз подтверждает, что в стержне устанавливается стоячая ультразвуковая волна.

Чтобы сломать стальную проволоку, вам приходится изгибать ее в ту и другую сторону столько раз, пока вы не достигни-

те предела усталостной прочности материала. Точно также при колебаниях «устает» ферритовый стержень и ломается тогда, когда наступает соответствующий предел. Можно количественно оценить, сколько колебаний должно произойти, чтобы феррит порвался, и определить максимальное время, которое способен проработать ферритовый вибратор в воздухе. Сделаем мы это позже (см. п. 5.4.6), сейчас же возьмем себе за правило, не держать в воздухе работающий вибратор сколько-нибудь длительное время и выключать ультразвук сразу по окончании эксперимента.

5.2.4. Почему второй торец вибратора должен быть сухим? Значит ли все это, что ферритовый вибратор магнитострикционного излучателя никуда не годится? Конечно, нет. Дело в том, что в воздухе работает практически ненагруженный вибратор. Коэффициент отражения упругой волны на границе феррит–воздух весьма близок к единице, поэтому ультразвук, дойдя до торца вибратора, полностью отражается назад, и вся энергия оказывается сосредоточенной в феррите. Но излучатель нам нужен не для этого, а для того, чтобы возбуждать ультразвук в необходимой для исследований упругой среде.

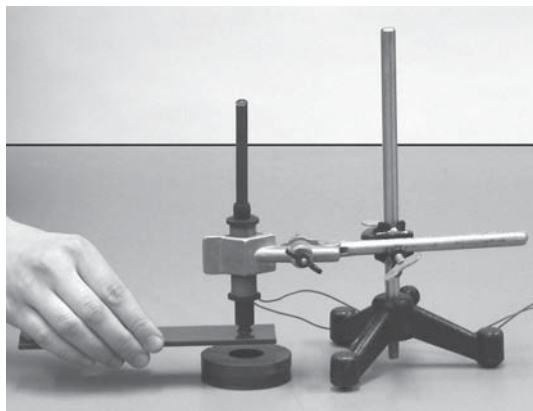


Рис. 5.5. Опыт, поясняющий физическую сущность акустического контакта

Закрепите обмотку возбуждения магнитострикционного излучателя вертикально так, чтобы снизу выставлялся конец вибратора и магниты положите на стол на расстоянии нескольких сантиметров от этого конца (рис. 5.5). На верхний торец вибратора нанесите каплю воды и настройте генератор в резонанс с вибратором. При этом капля немедленно распылится.

Теперь нанесите капли воды одновременно на верхний и нижний торцы вибратора и повторите опыт — обе капли распылятся.

Наконец, нанеся капли воды на оба торца вибратора, к нижнему подведите достаточно толстую твердую пластинку (стекло, пластмасса, дюраль) так, чтобы между ее поверхностью и нижним торцом вибратора оказался слой воды. Настроив генератор в резонанс с вибратором, вы обнаружите, что в этих условиях верхняя капля колеблется, но отнюдь не распыляется!

Куда же исчезла энергия ультразвука? Очевидно, ультразвуковая волна ушла из вибратора в твердую пластинку. Говорят, между вибратором и пластинкой достигнут *акустический контакт*. Мы еще будем иметь возможность обсудить это явление подробнее (см. п. 6.3.3). Сейчас же для нас важно то, что нагруженный вибратор, который излучает энергию в упругую среду, колеблется с гораздо меньшей интенсивностью, чем ненагруженный, и поэтому способен без излома проработать значительно большее время.

5.3. Упругие характеристики материала вибратора

Явление резонансного возбуждения позволяет определять упругие характеристики материала вибратора. Рассмотрев распространение кратковременного импульса сжатия в материале вибратора, определим скорость этого импульса. Свяжем скорость звука в стержне с упругими характеристиками материала стержня.

5.3.1. Скорость импульса сжатия в твердом стержне.

Бегущая синусоидальная волна представляет собой распространяющиеся с постоянной скоростью области сжатий и разрежений среды. Если волна в среде распространяется без изменения своей формы, то, очевидно, с той же скоростью в среде будет распространяться кратковременный импульс сжатия или разрежения. Таким образом, вместо того, чтобы искать скорость распространения звуковой волны, достаточно найти скорость движения в среде короткого импульса сжатия или разрежения.

Пусть по торцу бесконечно длинного упругого стержня производится удар так, что сила f действует в течение малого промежутка времени Δt . За время Δt торец сместится на расстояние Δl (рис. 5.6), в результате чего окажется деформированным кусок стержня длиной l . Скорость перемещения деформации по стержню

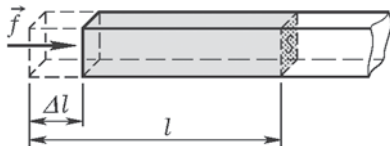


Рис. 5.6. К выводу формулы для скорости звука в упругом стержне

$$c = \frac{l}{\Delta t}. \quad (5.8)$$

Очевидно, это и есть искомая скорость распространения упругой волны в стержне.

К концу времени Δt все частицы отрезка стержня длиной l приобретут под действием импульса силы $f\Delta t$ одинаковую скорость

$$u = \frac{\Delta l}{\Delta t}. \quad (5.9)$$

Это нетрудно представить себе, если вспомнить, что происходит при толчке локомотива о состав: импульс сжатия с большой скоростью бежит вдоль состава (о его скорости можно судить по последовательному лязгу буферов вагонов), и те вагоны, до которых дошел импульс, приобретают небольшую скорость в направлении толчка. Согласно законам динамики импульс силы равен изменению количества движения

$$f\Delta t = mu, \quad (5.10)$$

где m — масса отрезка стержня длиной l . Если сечение стержня и его плотность равны соответственно S и ρ , то

$$m = \rho Sl. \quad (5.11)$$

По закону Гука деформирующая сила f численно равна силе упругости

$$f = ES \frac{\Delta l}{l}, \quad (5.12)$$

где E — модуль упругости (Юнга). Подставляя значения m и f из выражений (5.11) и (5.12) в формулу (5.10), получаем

$$ES \frac{\Delta l}{l} \Delta t = \rho Slu.$$

Пользуясь тем, что $c = l/\Delta t$ (5.8) и $u = \Delta l/\Delta t$ (5.9), из последней формулы для скорости звука имеем

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (5.13)$$

Итак, скорость звука в упругом стержне равна корню квадратному из модуля упругости, деленного на плотность среды. Раньше эта формула была получена из энергетических соотношений (см. п. 2.2.4).

5.3.2. Экспериментальное определение упругих характеристик материала вибратора. Методом измерения скорости звука можно определять упругие параметры вещества. Для нахождения скорости звука в материале вибратора и модуля упругости этого материала необходимо в эксперименте измерить основную собственную частоту вибратора. Это можно сделать, например, с помощью осциллографа. По осциллограмме перемен-

ного напряжения на обмотке возбуждения работающего на резонансной частоте излучателя определите период его колебаний, затем вычислите частоту, по формуле (5.5) определите скорость звука и, зная плотность материала вибратора, по формуле (5.13) найдите модуль его упругости.

В последние годы стали доступными цифровые мультиметры — многофункциональные электроизмерительные приборы, позволяющие измерить напряжение, силу тока, сопротивление, емкость, температуру и т. д. Некоторые из этих приборов допускают измерение частоты переменного напряжения в диапазоне до 20 кГц. Это позволяет определить частоту ультразвуковых колебаний и вычислить скорость звука в материале вибратора.

Как обычно, поставьте магнитострикционный излучатель на стол вертикально и на торец вибратора поместите лезвие. Подключите излучатель к генератору и выход генератора одновременно соедините с щупами мультиметра. Переведите мультиметр в режим измерения частоты. Включите питание ультразвукового генератора и настройте генератор в резонанс с вибратором. Запишите высветившееся на индикаторе значение частоты ультразвуковых колебаний.

На рис. 5.7 показана еще одна возможная экспериментальная установка для определения основной собственной частоты колебаний вибратора. В ней конец вибратора магнитоострикционного

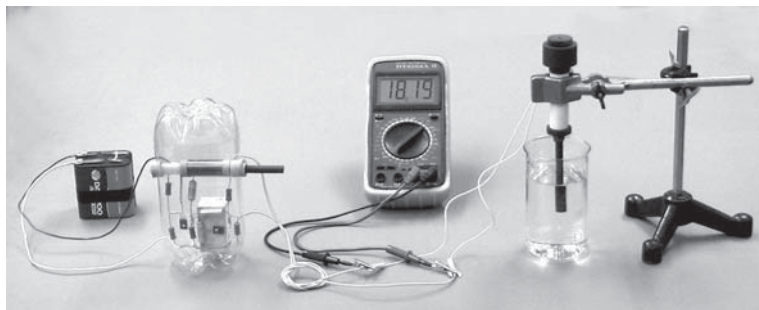


Рис. 5.7. Экспериментальная установка для определения частоты колебаний вибратора магнитоострикционного излучателя

излучателя опущен в сосуд с водой. При настройке генератора в резонанс с вибратором вы услышите довольно громкий шипящий звук. Это — *кавитационный шум*, который вы еще будете иметь возможность подробно исследовать. Настройте генератор так, чтобы громкость кавитационного шума было максимальной, и запишите получившееся значение частоты колебаний.

Вы, конечно, помните связь между длиной волны, скоростью ее распространения и периодом или частотой:

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}.$$

Подставляя сюда значение длины волны из формулы (5.7), для скорости звука в материале вибратора получаем

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu = 2l\nu.$$

Допустим, в опыте вы нашли, что основная собственная частота ферритового вибратора длиной 160 мм равна 18 кГц. Следовательно, по формуле (5.5) скорость звука в феррите

$$c_{\text{ф}} = 2l\nu = 5,76 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

Плотность феррита, которую нетрудно вычислить, найдя объемом ферритового стержня и измерив его массу, примерно равна 5080 кг/м³. Отсюда модуль упругости для феррита

$$E = \rho c^2 = 16,9 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2.$$

Зная модуль упругости и плотность, можно решить обратную задачу определения скорости звука в материале вибратора. А по известным скорости звука и длине вибратора можно определить частоту ультразвуковой волны. Таким образом, вы располагаете одним из способов градуировки самодельного ультразвукового генератора по частоте, если в вашем распоряжении нет частотомера или осциллографа.

Помещая в обмотку возбуждения магнитострикционного излучателя стержни или изогнутые вдоль тонкие полоски из жести, никеля, стали или других ферромагнитных материалов, определите их упругие характеристики методом резонансного возбуждения.

5.4. Амплитуда колебаний вибратора

Графики деформаций магнитострикционных материалов в магнитном поле (см. рис.3.1, п.3.1.1) показывают, что амплитуды вынужденных колебаний соответствующих вибраторов весьма малы. При резонансе в воздухе они значительно увеличиваются, но все равно остаются настолько небольшими, что колебания вибраторов совершенно не видны невооруженным глазом. Однако эти незаметные колебания происходят с высокой частотой и приводят к легко наблюдаемым явлениям, которые позволяют оценить амплитуду колебаний вибратора.

5.4.1. Шарик, скачущий на вибраторе. К выходу ультразвукового генератора подключите магнитострикционный излучатель. Над верхним торцом вибратора закрепите стеклянную трубку внутренним диаметром 5–7 мм и длиной 50–60 см так, чтобы ее нижний конец почти касался вибратора. На торец поместите стальной шарик диаметром 3–5 мм.

Настройте генератор в резонанс с вибратором, перемещая внутри контурной катушки генератора ее сердечник. При приближении к резонансной частоте шарик вначале начнет дребезжать, а при достижении резонанса станет подпрыгивать (рис. 5.8)! Высота этих скачков постоянно меняется. После нескольких ударов о торец работающего вибратора шарик может даже выскочить из трубки! Это удивительное явление, поскольку со стороны торец вибратора воспринимается совершенно неподвижным, а соприкасающийся с ним довольно массивный шарик тем не менее подлетает на значительную высоту.

Причина такого поведения шарика заключается в том, что совершающий ультразвуковые колебания торец вибратора движется с достаточно большой колебательной скоростью и вследствие этого передает стальному шарiku значительный импульс.

5.4.2. Оценка амплитуды колебаний вибратора по высоте подскока стального шарика. Проведем несложные рассуждения, которые позволят оценить амплитуду колебаний вибратора.

Допустим, что торец вибратора совершает колебания в соответствии с гармоническим законом

$$s = a \sin \omega t, \quad (5.14)$$

где s — элонгация смещения, a — амплитуда, $\omega = 2\pi\nu$ — циклическая частота, ν — частота колебаний и t — текущее время. Чтобы найти колебательную скорость движения торца вибратора,



Рис. 5.8. Стальной шарик, находящийся на торце колеблющегося вибратора, высоко подпрыгивает

возьмем первую производную от смещения по времени:

$$v = \frac{ds}{dt} = a\omega \cos \omega t. \quad (5.15)$$

Теперь будем считать, что шарик испытывает упругое соударение с торцом вибратора, масса вибратора много больше массы шарика, скорость торца вибратора при соударении не изменяется.

Подскочив после очередного удара до верхней точки 1 траектории, шарик начинает падать из этой точки со скоростью, равной нулю (рис. 5.9). Он приобретает скорость v_1 относительно

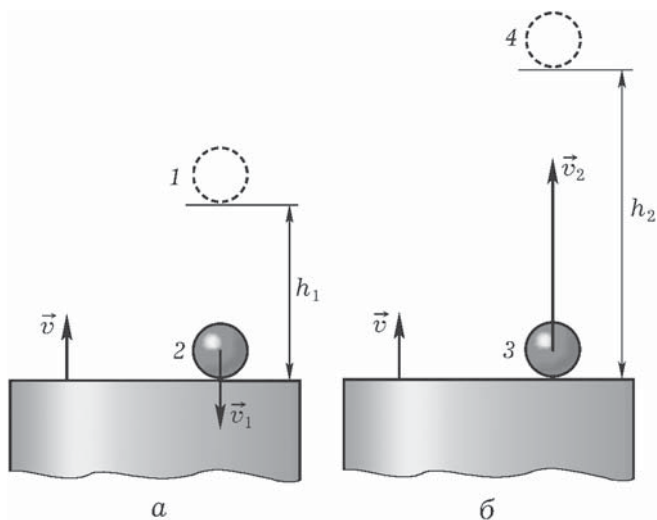


Рис. 5.9. К оценке амплитуды колебаний вибратора магнитострикционного излучателя по высоте подскока шарика: а — система шарик-вибратор до взаимодействия; б — система после взаимодействия

неподвижного наблюдателя, когда оказывается в положении 2 в момент касания торца вибратора, имеющего скорость v . После соударения в положении 3 шарик имеет скорость v_2 . Затем, в верхней точке 4 траектории, скорость шарика опять обращается в нуль.

Перейдем в систему отсчета, связанную с торцом вибратора. В ней шарик движется со скоростью $v_1 + v$ до соударения (в точке 2) и, учитывая, что при взаимодействии скорость торца вибратора не изменяется, со скоростью $v_2 - v$ после соударения (в точке 3). Поскольку удар считаем упругим, в этой системе отсчета скорость шарика до удара равна скорости после удара: $v_1 + v = v_2 - v$.

Отсюда видно, что в результате соударения с работающим вибратором скорость шарика изменяется на удвоенное значение

скорости торца вибратора:

$$\Delta v = v_2 - v_1 = 2v. \quad (5.16)$$

Из формулы (5.15) следует, что максимальное значение скорости торца вибратора $v_m = a\omega = 2a\pi\nu$. Отсюда искомая амплитуда колебаний вибратора

$$a = \frac{v_m}{\omega} = \frac{v_m}{2\pi\nu}. \quad (5.17)$$

Частота колебаний вибратора вам известна (п. 5.3.2), осталось определить только амплитуду скорости. Будем считать, что в опыте удастся поймать момент, когда шарик взаимодействует с вибратором, колебательная скорость которого максимальна и направлена вверх $v = v_m$. Тогда, согласно формуле (5.16),

$$v_m = \frac{v_2 - v_1}{2}. \quad (5.18)$$

Скорости шарика v_1 и v_2 до и после соударения найдем из энергетических соображений. Потенциальная энергия шарика массой m , падающего с высоты h_1 , равна mgh_1 . Она переходит в кинетическую энергию, которая вблизи торца вибратора равна $mv_1^2/2$. Поэтому скорость падающего шарика в момент соприкосновения с вибратором $v_1 = \sqrt{2gh_1}$. Если после удара шарик поднимается на высоту h_2 , то его начальная скорость $v_2 = \sqrt{2gh_2}$.

Конечно, так было бы, если бы не было потерь энергии. На самом деле часть кинетической энергии упавшего шарика переходит во внутреннюю энергию шарика, вибратора, стеклянной трубки, воздуха и т. д.

Чтобы найти, какая часть кинетической энергии шарика переходит при ударе во внутреннюю, достаточно сравнить высоту H_1 , с которой шарик начал падать, с высотой H_2 , на которую он подскакивает после взаимодействия с *неколеблющимся* вибратором. Понятно, что в идеальном случае, то есть без потерь энергии, он подпрыгнул бы на ту же высоту, с которой упал. Отношение высот $H_2/H_1 = K$ принято называть *коэффициентом восстановления*. Таким образом, если бы не было потерь энергии, то после удара кинетическая энергия шарика составила бы $mv_2^2/2$, на самом же деле она меньше и составляет $Kmv_2^2/2$. Поэтому если шарик после взаимодействия с работающим вибратором подпрыгнул на высоту h_2 , то его потенциальная энергия стала равна $mgh_2 = Kmv_2^2/2$ и отсюда начальная скорость $v_2 = \sqrt{2gh_2/K}$.

Подставляя найденные выражения для скоростей v_1 и v_2 в формулу (5.18), получаем, что амплитуда колебательной скорости вибратора

$$v_m = \frac{\sqrt{2g}}{2} \left(\sqrt{\frac{h_2}{K}} - \sqrt{h_1} \right). \quad (5.19)$$

Учитывая формулу (5.17), имеем, что амплитуда колебаний торца вибратора

$$a = \frac{\sqrt{2g}}{4\pi\nu} \left(\sqrt{\frac{h_2}{K}} - \sqrt{h_1} \right). \quad (5.20)$$

Итак, прыгающий на вибраторе шарик в принципе позволяет определить амплитуду колебаний вибратора.

5.4.3. Экспериментальная оценка амплитуды колебаний вибратора. Теперь выполните эксперимент по оценке амплитуды колебаний торца вибратора. Рядом со стеклянной трубкой над вертикально стоящим магнестрикционным излучателем закрепите линейку с миллиметровыми делениями. Магнитом поднимите стальной шарик в стеклянной трубке на некоторую высоту H_1 и, отведя магнит, отпустите шарик так, чтобы он упал на торец вибратора неработающего излучателя. Измерьте высоту H_2 , на которую подпрыгнет шарик после удара. Вычислите коэффициент восстановления $K = H_2/H_1$. Например, в одном из наших опытов упавший с высоты 50 см шарик подпрыгнул до 25 см, значит, коэффициент восстановления равен 0,5.

Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором так, чтобы шарик подпрыгивал на несколько десятков сантиметров. Пронаблюдайте за шариком: иногда он подпрыгивает на меньшую высоту, чем та, с которой падает, иногда наоборот; бывает, что он будто теряет всю энергию и после очередного взаимодействия почти не подпрыгивает, бывает, что внезапно оказывается на большой высоте.

Малопредсказуемое поведение шарика можно объяснить тем, что он взаимодействует с торцом вибратора, когда тот имеет различные фазы колебаний. Скорость вибратора может быть максимальной и минимальной, направленной вверх и вниз, то есть, вообще говоря, произвольной.

Выше мы теоретически рассмотрели случай, когда скорость вибратора максимальна и направлена навстречу падающему шару (п. 5.4.2). Это соответствует такой реальной ситуации, когда шарик падает с небольшой высоты и подпрыгивает на большую.

В опыте вы и должны поймать эту ситуацию и постараться оценить высоты, на которых оказывается шарик: начальную

маленькую h_1 и конечную большую h_2 . Например, в одном из опытов мы получили $h_1 = 5$ см, $h_2 = 50$ см, причем частота вибратора составляла 18 кГц.

По полученным экспериментальным данным, пользуясь формулой (5.20), вычислите амплитуду колебаний вибратора. В нашем опыте она получилась равной $15 \cdot 10^{-6}$ м.

Не правда ли, получен поразительный результат: величину в два десятка микрометров вы оценили с помощью линейки с миллиметровыми делениями! Такова физика: чтобы, к примеру, узнать, как атом излучает свет, ученым потребовались лишь два полупрозрачных зеркала, ну и, конечно, руки и голова.

Недостатки метода скачущего шарика очевидны: во-первых, сложность отслеживания траектории шарика и измерения высот h_1 и h_2 , а во-вторых, произвольность допущения о столкновении шарика с торцом вибратора именно в момент максимальной скорости последнего. Эти недостатки и обуславливают неточность определения амплитуды.

5.4.4. Оценка амплитуды колебаний вибратора посредством ультразвукового движителя. На гладкую поверхность поместите легкую металлическую пластинку, например, стальную линейку. Торцом вибратора магнитострикционного излучателя, направленного под углом $30\text{--}45^\circ$ к горизонту, прикоснитесь к поверхности пластинки. Настроив генератор в резонанс с излучателем, вы увидите, что пластинка перемещается (рис. 5.10), выползая из-под торца колеблющегося вибратора!

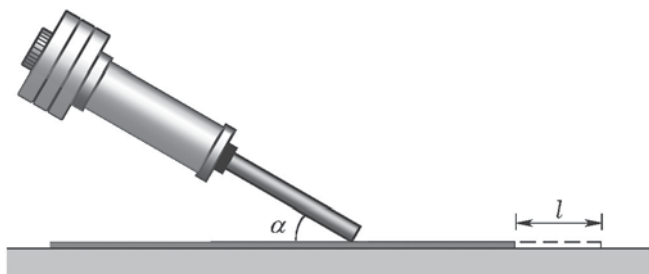


Рис. 5.10. Определение амплитуды колебаний вибратора по величине перемещения металлической пластинки

Это явление может быть использовано для оценки амплитуды колебаний торца вибратора. Действительно, пластинка перемещается, очевидно, потому, что при каждом колебании в течение полупериода вибратор толкает ее от себя, а в течение следующего полупериода отходит от пластинки, не касаясь ее. Значит, за один период колебаний вибратора пластинка перемещается на

расстояние, примерно равное удвоенной амплитуде колебаний. Измерив время t движения пластинки и расстояние l , на которое она переместилась, а также зная частоту колебаний торца вибратора ν , вы можете оценить амплитуду колебаний вибратора:

$$a = \frac{l}{2t\nu}. \quad (5.21)$$

Рис. 5.11. К оценке амплитуды колебаний вибратора по углу поворота диска

Вместо пластинки или линейки во многих случаях удобно использовать легкий металлический диск, вращающийся на оси с небольшим трением (рис. 5.11). За один период колебаний точка на краю диска описывает дугу, равную по длине удвоенной амплитуде колебаний вибратора. Длина окружности диска радиуса R равна $2\pi R$. Если за время t диск совершил N оборотов, то его край переместился относительно вибратора на величину $l = 2\pi RN$. Подставляя это выражение в формулу (5.21), получаем, что амплитуда колебаний вибратора

$$a = \frac{\pi RN}{t\nu}. \quad (5.22)$$

В одном из наших опытов при частоте колебаний вибратора 18 кГц диск радиусом $R = 1,5$ см за 7 с совершил 16 оборо-



Рис. 5.12. Перемещение массивного груза вибратором магнестрикционного излучателя

тов. Подстановка этих экспериментальных результатов в формулу (5.22) дает для амплитуды колебаний вибратора значение $6 \cdot 10^{-6}$ м.

В заключение отметим, что явление перемещения предметов колеблющимся вибратором используется на практике для создания ультразвуковых движителей. Главное достоинство их в том, что такие движители позволяют осуществлять высокоточные перемещения и повороты различных объектов. Действительно, достаточно с обмоткой возбуждения магнитострикционного излучателя соединить электронное устройство, считающее периоды колебаний вибратора, как появится возможность перемещать объекты на значительные и наперед заданные расстояния с погрешностью, примерно равной амплитуде колебаний вибратора. Подумайте, как это можно проверить в условиях школьной лаборатории.

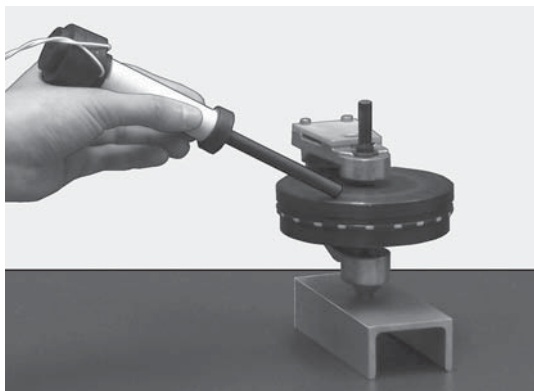


Рис. 5.13. Ультразвуковой движитель может вращать не только легкий диск, но и весьма массивный цилиндр. На фотографии показан опыт, в котором колеблющийся ферритовый вибратор раскручивает маховик старого магнитофона

Ультразвуковой движитель может приводить в движение не только легкие предметы. Чтобы убедиться в этом, стеклянную пластинку положите на цилиндрические катки из обломков ферритовых стержней и поставьте на нее гирю массой в несколько килограммов (рис. 5.12). Включите ультразвук, и вы увидите, что вибратор магнитострикционного излучателя без особого труда перемещает пластинку с грузом. Ультразвуком нетрудно также привести в довольно быстрое вращение массивный маховик, установленный в подшипниках (рис. 5.13).

5.4.5. Измерение амплитуды колебаний вибратора с помощью микроскопа. Рассмотренные выше методы измерения амплитуды являются оценочными, поскольку опираются на определенные допущения, которые сами нуждаются в обосновании. Настало время определить амплитуду колебаний вибратора прямым наблюдением через микроскоп.

Суть этого метода заключается в том, что вибратор освещают достаточно интенсивным пучком света и с помощью микроскопа наблюдают его боковую поверхность вблизи торца. На ней всегда обнаруживаются яркие точки, хорошо видимые за счет рассеяния света. При включении ультразвукового генератора вибратор начинает колебаться, и точки воспринимаются в виде светлых отрезков, длины которых, очевидно, равны удвоенной амплитуде их колебаний.

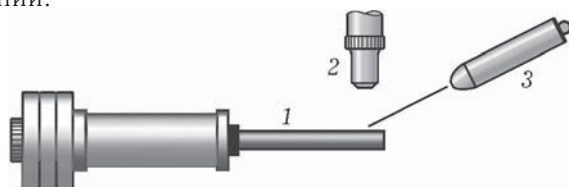


Рис. 5.14. Схема экспериментальной установки по определению амплитуды колебаний вибратора с помощью микроскопа: 1 — вибратор магнитострикционного излучателя; 2 — объектив микроскопа; 3 — полупроводниковый лазер

Функциональная схема соответствующей экспериментальной установки приведена на рис. 5.14. Магнитострикционный излучатель закрепите горизонтально в штативе так, чтобы его вибратор 1 находился на высоте 2–3 мм над предметным столиком микроскопа. Перед микроскопом расположите лампу или полупроводниковый лазер 3 и направьте пучок света на находящуюся под объективом 2 микроскопа боковую поверхность вибратора около его торца.

В установке может быть использован микроскоп типа «Биолам» с $20\times$ объективом и $15\times$ окуляром (рис. 5.15). Окулярный

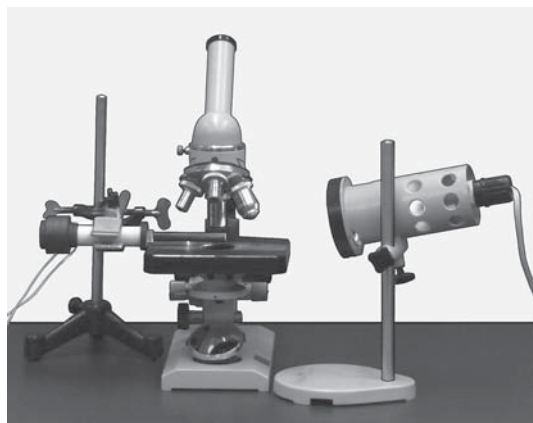


Рис. 5.15. Экспериментальная установка по определению амплитуды колебаний вибратора с помощью микроскопа

микрометр микроскопа предварительно должен быть отградуирован по объективному. При отсутствии объективного микрометра цену деления окулярного можно определить, рассматривая через микроскоп проволоку, диаметр которой предварительно измерен микрометром.

Наведите микроскоп на резкость так, чтобы в поле зрения были отчетливо видны яркие светящиеся точки на вибраторе. Включите ультразвуковой генератор и постепенно изменяйте частоту переменного напряжения на его выходе. При определенной частоте вы увидите, что яркие точки превращаются в светящиеся отрезки. На рис. 5.16 показан вид в микроскоп: при выключенном генераторе неровности на поверхности вибратора видны как яркие светлые точки, при включении генератора они приобретают вид светлых отрезков. Обратите внимание, что концы этих отрезков имеют более высокую яркость, чем середины. Объяснение достаточно очевидно: колебательная скорость максимальна там, где смещение равно нулю, поэтому середины светящихся отрезков имеют меньшую яркость, чем концы, на которых колебательная скорость равна нулю.

В момент достижения резонанса измерьте длины светящихся отрезков, наблюдаемых в микроскоп, и, разделив их пополам, определите амплитуду колебаний торца ферритового вибратора. В одном из наших опытов длина светящегося отрезка составила 4 деления окулярного микрометра, измеренная цена деления которого $0,0053 \text{ мм}$, откуда амплитуда колебаний вибратора $11 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

5.4.6. Оценка амплитуды колебаний вибратора по значению усталостной прочности. Вы уже знаете, что если ферритовый вибратор магнитострикционного излучателя ультра-

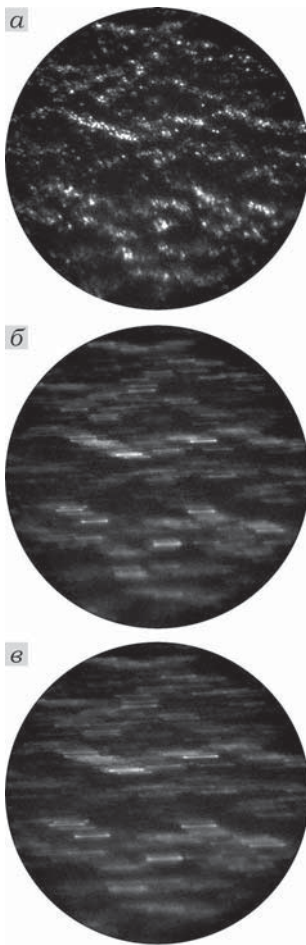


Рис. 5.16. К наблюдению колебаний конца вибратора: на трех photographs последовательно представлены видимые на поверхности вибратора в микроскоп светлые точки при выключенном генераторе (а), до резонанса (б) и в момент резонанса (в)

звука низкой частоты находится в воздухе, то при настройке генератора в резонанс с излучателем почти неизбежно вибратор будет разорван на части. Конечно, этого не случится, если интенсивность ультразвуковых колебаний вибратора невелика. Но уже при использовании учебного ультразвукового генератора (см. § 4.3), запитанного от двух последовательно соединенных батареек на 4,5 В, разрыв работающего в воздухе вибратора — это вопрос только времени. Отсюда следует, что при возбуждении вибратора на основной собственной частоте в нем возникают столь значительные растягивающие механические напряжения, которые феррит не в состоянии выдержать.

Наблюдения показывают, что обычно вибратор разрывается посередине, то есть там, где расположены узел смещений и пучность давлений или напряжений стоячей волны. Разрыв происходит не сразу после достижения резонанса, а спустя определенное время, которое тем больше, чем меньше амплитуда колебаний вибратора. Ощущение такое, что возникает «усталость» материала вибратора. С этим явлением хорошо знаком каждый, кто пытался переломить стальную проволоку: сразу это редко удается сделать, но через несколько изгибов в ту и иную сторону сталь «устает» и проволока разламывается.

Находя потенциальную энергию деформированного объема среды, в которой распространяется упругая волна (см. § 2.2), мы уже пользовались понятием механического напряжения. Способность материала выдержать без излома переменное механическое напряжение характеризуется *усталостной динамической прочностью*.

Исследования показали, что усталостная динамическая прочность феррита при 10^8 циклах нагрузки составляет

$$\sigma_{\text{пр}} = (150 \div 250) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2. \quad (5.23)$$

Такое количество колебаний с частотой порядка $\nu = 20 \text{ кГц}$ соответствует времени $t = 10^8 / \nu = 5 \cdot 10^3 \text{ с} \approx 1,4 \text{ час}$. Через этот промежуток времени вибратор будет разрушен. Используя приведенные данные усталостной динамической прочности феррита, сделаем теоретическую оценку амплитуды колебаний ферритового вибратора и сравним ее с экспериментальными результатами.

Ферритовый вибратор длиной l закреплен в каркасе обмотки возбуждения магнитострикционного излучателя за середину. Направим ось x вдоль вибратора и выберем начало координат по его середине (рис. 5.17). При настройке генератора в резонанс с вибратором в нем устанавливается стоячая ультразвуковая волна. Если вибратор колеблется на основной собственной частоте, то на длине вибратора l укладывается половина длины волны

ультразвука в материале вибратора $l = \lambda/2$. Смещение s этой волны, очевидно, описывается уравнением (см. п. 5.1.2):

$$s = a \sin kx \cdot \sin \omega t, \quad (5.24)$$

где a — амплитуда смещения, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$ — круговая частота (получите это уравнение!).

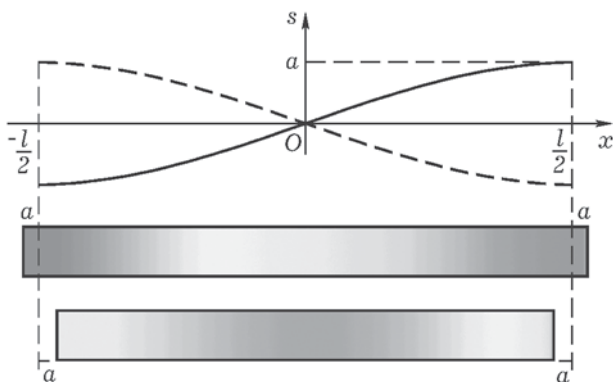


Рис. 5.17. Стоячая волна в закрепленном посередине вибраторе магнитострикционного излучателя

Колебательная скорость v сечения вибратора, имеющего координату x , равна производной смещения s по времени t :

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega a \sin kx \cdot \cos \omega t. \quad (5.25)$$

Деформация ε может быть найдена как производная от смещения по координате (см. п. 2.2.3):

$$\varepsilon = \frac{ds}{dx} = ka \cos kx \cdot \sin \omega t. \quad (5.26)$$

Механическое напряжение, возникающее в колеблющемся вибраторе, пропорционально деформации

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (5.27)$$

где E — модуль Юнга. Из (5.26) следует, что наибольшие деформации $\varepsilon_m = ka$ вибратор испытывает посередине, так как $\cos kx = 1$ при $x = 0$. На концах вибратора $x = \pm l/2 = \pm \lambda/4$ и $\cos(k\lambda/4) = \cos(\pi/2) = 0$, следовательно, деформации отсутствуют. Таким образом, максимальная амплитуда деформации в середине вибратора равна

$$\varepsilon_m = ka = \frac{2\pi}{\lambda} a = \frac{\pi}{l} a. \quad (5.28)$$

Учитывая (5.27), получаем, что максимальная амплитуда напряжения в середине вибратора

$$\sigma_m = E \varepsilon_m = \frac{\pi}{l} a E. \quad (5.29)$$

Отсюда наибольшая амплитуда колебаний торца ферритового вибратора

$$a_m = \frac{\sigma_{\text{пр}} l}{\pi E}. \quad (5.30)$$

Так как для феррита $\sigma_{\text{пр}} = (150 \div 250) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ при 10^8 циклах нагрузки (5.23), длина ферритового вибратора $l = 0,16 \text{ м}$ и $E = 1,8 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, то из предыдущей формулы получаем $a_m = (4,2 \div 7,1) \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Это означает, что если амплитуда колебаний торца вибратора лежит в найденном интервале, то ферритовый вибратор способен без излома непрерывно проработать в течение порядка полутора часов. Этого времени, бесспорно, хватит на очень большое количество опытов, так как обычно продолжительность непрерывной работы магнитострикционного излучателя не превышает нескольких минут.

Сравнивая вычисленное значение максимальной амплитуды колебаний вибратора с полученными экспериментальными значениями (см. пункты 5.4.3–5.4.5), видим, что все они имеют один порядок величины. Значит, построенная здесь теоретическая модель явления имеет право на существование. Поразительно в этой модели то обстоятельство, что такое значительное и впечатляющее явление, как разрыв звуковыми колебаниями прочного ферритового стержня на части позволяет оценить столь незначительную по величине амплитуду этих колебаний.

Говорят, великий Шаляпин голосом вводил хрустальные бокалы в резонанс так, что они на глазах изумленных зрителей, повибрировав, взрывались. Вы теперь понимаете, что для этого нужно только после «настройки» голоса в резонанс с сосудом производить звук столь долго, пока материал сосуда не «устанет». Имея ультразвуковой генератор и магнитострикционный излучатель с ферритовым вибратором, вы в любое время можете показывать подобные фокусы, разрывая звуком феррит. Разумеется, ни один из певцов не сможет своим голосом сделать с ферритовым стержнем то, что вы спокойно сделаете своим генератором.

Внимательно рассмотрите излом ферритового стержня (рис. 5.18). Вы заметите, что почти всегда он происходит там, где в толще феррита имелся дефект — неоднородность, постороннее включение или газовый пузырек. Если бы на производстве внимательнее следили за технологией! Впрочем, магнитным антеннам, для которых непосредственно и предназначены

ферритовые стержни, особая прочность на разрыв вовсе и не нужна.

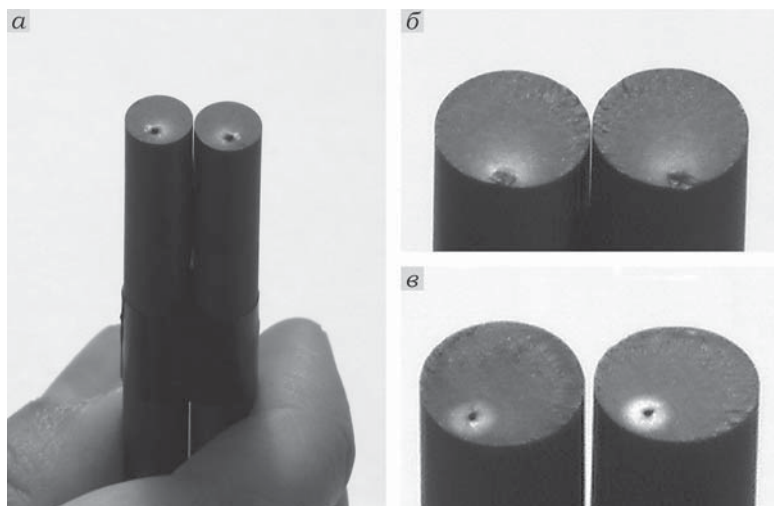


Рис. 5.18. Места разрывов ферритовых стержней

5.5. Излучение упругой волны колеблющимся вибратором

Чему равна энергия вибратора, совершающего колебания на основной собственной частоте? Какова интенсивность волны, возбуждаемой в упругой среде вибратором магнитострикционного излучателя? Как излучение упругой волны влияет на работу самого излучателя? Чтобы ответить на эти вопросы, вначале придется более подробно разобраться с явлением резонанса.

5.5.1. Вынужденные колебания и резонанс. Вибратор магнитострикционного излучателя, подключенного к генератору переменного тока, совершает вынужденные гармонические колебания. Будем считать, что частота этих колебаний близка к основной собственной частоте вибратора. При этом в вибраторе устанавливается стоячая волна так, что на концах образуются пучности, а в середине — узел смещений. Выделим вблизи одного из концов вибратора небольшой отрезок массой m . На выделенное тело вдоль оси вибратора действует вынуждающая сила \vec{f} , проекция которой на эту ось изменяется по гармоническому закону

$$f = f_m \cos \omega t. \quad (5.31)$$

Кроме того, на него со стороны стержня действует сила упругости, пропорциональная смещению: $\vec{f}_1 = -\alpha \vec{s}$. Колеблющееся

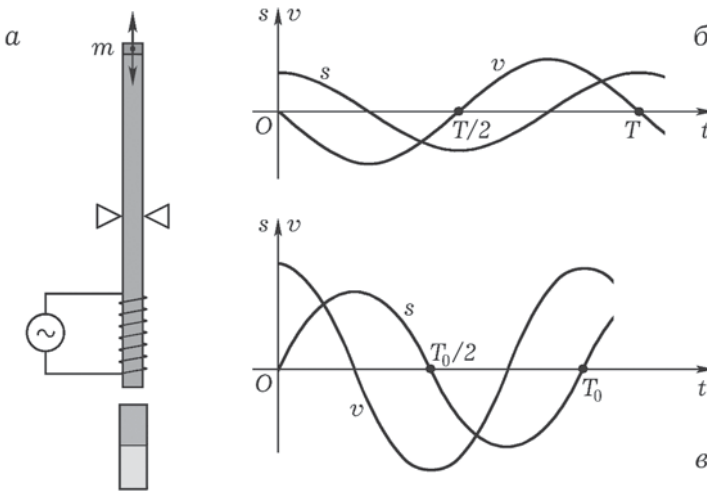


Рис. 5.19. Резонансное возбуждение вибратора: a — колебательная система; $б$ — осциллограммы смещения и скорости на частоте ниже резонансной; $в$ — осциллограммы смещения и скорости при резонансе

тело испытывает также сопротивление движению, следовательно, на него действует сила трения, которую в первом приближении можно считать пропорциональной колебательной скорости: $\vec{f}_2 = -\beta d\vec{s}/dt$.

Таким образом, второй закон Ньютона для выбранного тела приобретает вид

$$m \frac{d^2 \vec{s}}{dt^2} = \vec{f} + \vec{f}_1 + \vec{f}_2. \quad (5.32)$$

Этот закон удобно записывать в проекциях в форме линейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} + \beta \frac{ds}{dt} + \alpha s = f_m \cos \omega t. \quad (5.33)$$

Методы решения таких уравнений давно разработаны и всем хорошо известны. Вам предстоит познакомиться с ними несколько позже, уже на студенческой скамье, на этих же страницах достаточно ограничиться рассмотрением частных случаев.

Если вынуждающая сила отсутствует ($f = 0$) и потерями энергии в колебательной системе можно пренебречь ($f_2 = 0$), то из (5.33) получаем изучаемое в школьном курсе

дифференциальное уравнение *свободных колебаний*

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} + \alpha s = 0. \quad (5.34)$$

Решением его является гармоническая функция, циклическая частота которой

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\alpha}{m}}. \quad (5.35)$$

Если на тело действует постоянная сила f_m , и тело не колеблется, то первые два члена уравнения (5.33) обращаются в нуль. Тогда смещение тела из положения равновесия

$$s = \frac{f_m}{\alpha} = A_0. \quad (5.36)$$

Величину A_0 будем называть *статическим смещением*.

Спустя некоторое время после включения генератора вынужденные колебания вибратора происходят, очевидно, по гармоническому закону с частотой вынуждающей силы. Поэтому смещение выбранного тела описывается уравнением

$$s = a \cos(\omega t + \varphi). \quad (5.37)$$

Скорость и ускорение этого тела соответственно равны

$$v = \frac{ds}{dt} = -\omega a \sin(\omega t + \varphi), \quad (5.38)$$

$$b = \frac{d^2 s}{dt^2} = -\omega^2 a \cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 s. \quad (5.39)$$

Будем считать, что потери энергии при колебаниях настолько малы, что вторым слагаемым в уравнении (5.33) можно пренебречь. Тогда, подставляя в это уравнение выражение для ускорения (5.39), получаем $-m\omega^2 s + \alpha s = f_m \cos \omega t$. Отсюда следует, что вынужденные колебания выбранного тела происходят по закону

$$s = \frac{f_m}{\alpha - m\omega^2} \cos \omega t. \quad (5.40)$$

В знаменателе этой формулы α должно иметь такую же размерность, как $m\omega^2$, поэтому введем обозначение $\alpha = m\omega_0^2$ или

$$\omega_0^2 = \frac{\alpha}{m}. \quad (5.41)$$

Тогда амплитуду вынужденных колебаний можно записать в виде

$$a = \frac{f_m}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (5.42)$$

где ω_0 — частота свободных колебаний тела (5.35).

Из этой формулы видно, что при $\omega \rightarrow \omega_0$, амплитуда вынужденных колебаний стремится к бесконечности. Это означает, что в колебательной системе возникает *резонанс*, и это дает основание величину ω_0 называть *резонансной частотой*.

5.5.2. Добротность колебательной системы. Разумеется, в реальных колебательных системах бесконечно больших амплитуд колебаний быть не может. Бесконечность получилась только потому, что в уравнении (5.33) мы пренебрегли членом, выражающим потери энергии. Учтем эти потери при колебаниях на резонансной частоте. Для этого в формулу (5.33) подставим выражения (5.38) и (5.39), беря вместо частоты ω и амплитуды a их резонансные значения ω_0 и A :

$$-m\omega_0^2 s - \beta\omega_0 A \sin(\omega_0 t + \varphi) + \alpha s = f_m \cos \omega_0 t. \quad (5.43)$$

Принимая во внимание значение (5.41), отсюда получаем

$$-\beta\omega_0 A \sin(\omega_0 t + \varphi) = f_m \cos \omega_0 t. \quad (5.44)$$

Это равенство выполняется при любых t , если $\varphi = -\pi/2$. Отсюда следует, что при резонансе, во-первых, колебательная скорость (5.38) $v = \omega_0 A \cos \omega_0 t$ синфазна с вынуждающей силой (5.31), и во-вторых, что резонансная амплитуда колебаний

$$A = \frac{f_m}{\beta\omega_0} = \frac{\alpha}{\beta\omega_0} A_0 \quad (5.45)$$

(здесь мы учли выражение (5.36) для статического смещения A_0 под действием постоянной силы f_m).

Отношение амплитуды колебаний при резонансе к статическому смещению тела из положения равновесия, называется *добротностью* колебательной системы:

$$Q = \frac{A}{A_0} = \frac{\alpha}{\beta\omega_0}. \quad (5.46)$$

Добротность показывает во сколько раз амплитуда колебаний при резонансе больше амплитуды вынужденных колебаний вдали от резонанса.

Полная энергия гармонического колебания тела равна его кинетической энергии в тот момент, когда скорость максимальна, поэтому с учетом (5.38) и (5.41) получаем

$$W = \frac{mv_m^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 a^2}{2} = \frac{\alpha a^2}{2}. \quad (5.47)$$

Работа dW' силы трения $f_2 = -\beta v$ на пути $ds = v dt$ равна $dW' = \beta v ds = \beta v^2 dt$. Так как при резонансе $\varphi = -\pi/2$, то из

(5.38) скорость тела $v = \omega_0 a \cos \omega_0 t$. Поэтому за период колебаний T потери энергии составляют

$$W' = \int_0^T \beta v^2 dt = \beta \omega_0^2 a^2 \int_0^T \cos^2 \omega_0 t dt = \beta \omega_0^2 a^2 \frac{T}{2} = \pi \beta \omega_0 a^2. \quad (5.48)$$

Тем из вас, кто не слишком уверенно вычисляет интегралы, советуем обратиться к рис. 5.20, из которого сразу видно, чему равно среднее за период значение квадрата колебательной скорости.

Заменяя в формуле (5.46) параметры колебательной системы α и $\beta \omega_0$ на их выражения через энергии, найденные из формул (5.47) и (5.48), получаем

$$Q = 2\pi \frac{W}{W'}. \quad (5.49)$$

Таким образом, *добротность колебательной системы* равна умноженному на 2π отношению энергии, запасенной в системе, к энергии, теряемой за период.

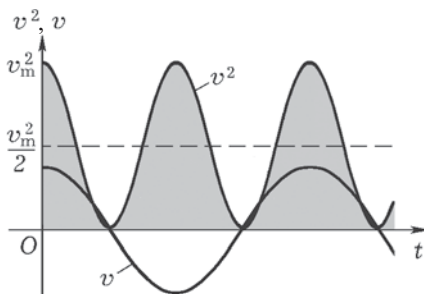


Рис. 5.20. К вычислению среднего по времени значения квадрата колебательной скорости

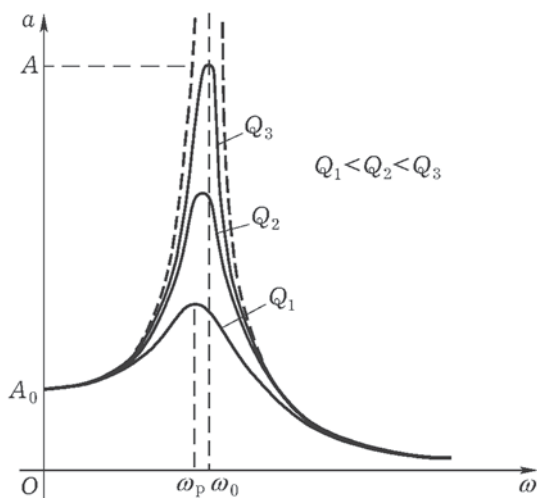


Рис. 5.21. Резонансные кривые для разных значений добротности

На рис. 5.21 показаны резонансные кривые, построенные для различных значений добротности колебательной системы. Видно,

что с увеличением добротности резонансная частота ω_p приближается к частоте ω_0 собственных колебаний системы, растет резонансная амплитуда колебаний, и уменьшается ширина резонансной кривой.

Все это вы уже неоднократно наблюдали в опытах по резонансному возбуждению колебаний магнитоотрицательного вибратора. Теперь осталось только сопоставить наблюдаемые явления с изложенной теорией и, хотя бы на качественном уровне, объяснить обнаруженные в экспериментах эффекты.

5.5.3. Энергия колебаний вибратора. Теперь забудем о рассмотренной в двух предыдущих пунктах модели гармонического осциллятора, необходимой лишь для обоснования используемых понятий, и вновь обратимся к вибратору магнитоотрицательного излучателя. Найдем полную энергию, запасенную вибратором, совершающим колебания на основной собственной частоте.

В этом случае в вибраторе устанавливается стоячая волна смещений, уравнение которой можно записать в виде

$$s = a \sin kx \cdot \sin \omega t, \quad (5.50)$$

причем на длине вибратора укладывается половина длины упругой волны. Волне смещений соответствует стоячая волна скоростей

$$v(t) = \frac{ds}{dt} = \omega a \sin kx \cdot \cos \omega t. \quad (5.51)$$

Из этой формулы видно, что частицы вибратора приобретают максимальные скорости в моменты времени $t = nT/2$, где $n = 0, 1, 2, \dots$, когда их смещения на всем стержне, как это следует из уравнения (5.51), равны нулю. На рис. 5.22 показано распределение скоростей вдоль вибратора в момент времени $t = 0$

$$v(0) = \omega a \sin kx = v, \quad (5.52)$$

когда вся колебательная энергия вибратора сосредоточена в кинетической, поскольку смещения нет и деформация вибратора отсутствует. Вычислим эту энергию.

Небольшой участок вибратора длиной dx обладает массой $dm = \rho dV = \rho S dx$. Кинетическая энергия этого участка (рис. 5.22):

$$dW = \frac{dm \cdot v^2}{2} = \frac{\rho S v^2}{2} dx = \frac{\rho S \omega^2 a^2}{2} \sin^2 kx \cdot dx. \quad (5.53)$$

Чтобы найти полную энергию вибратора, нужно проинтегрировать это выражение по всей длине вибратора

$$W = \frac{\rho S \omega^2 a^2}{2} \int_{-\lambda/4}^{\lambda/4} \sin^2 kx \cdot dx = \frac{\rho S}{8} \omega^2 a^2 \lambda. \quad (5.54)$$

Мы так лихо расправились с этим интегралом потому, что уже не раз встречали подобные вещи и хорошо помним, что интеграл

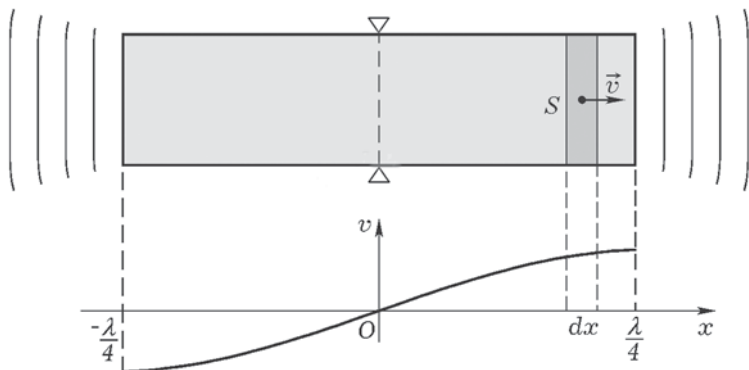


Рис. 5.22. К расчету запасенной колеблющимся вибратором энергии

от квадрата гармонической функции равен половине разности его пределов интегрирования. Учитывая, что круговая частота связана со скоростью и длиной волны соотношением $\omega = 2\pi/T = 2\pi c/\lambda$, из последней формулы получаем

$$W = \frac{\pi}{4} S \rho c \omega a^2. \quad (5.55)$$

Это и есть выражение для полной энергии, запасенной в вибраторе, совершающем колебания на основной собственной частоте.

5.5.4. Излучение упругой волны. Пусть вибратор, акустическое сопротивление материала которого $\rho_1 c_1$, находится в среде с акустическим сопротивлением $\rho_2 c_2$. Будем считать, что вибратор возбуждает в среде плоскую упругую волну. Для этого нужно, чтобы поперечный размер вибратора существенно превышал длину волны в среде (рис. 5.22). Пусть плоский торец вибратора совершает поршнеобразные гармонические колебания по закону

$$s = a \cos \omega t. \quad (5.56)$$

Понятно, что примыкающие к вибратору частицы среды колеблются, не отрываясь от вибратора и не проникая внутрь него, поэтому колебания их происходят по тому же закону (5.56). Эти колеблющиеся частицы возбуждают в среде упругую волну, распространяющуюся вдоль оси x в соответствии с уравнением

$$s = a \cos(\omega t - k_2 x), \quad (5.57)$$

где $k_2 = 2\pi/\lambda_2 = \omega/c_2$ — волновое число. Интенсивность волны, излучаемой вибратором в упругую среду, определяется

выражением (2.11):

$$I = \frac{1}{2} \omega^2 a^2 \rho_2 c_2. \quad (5.58)$$

Таким образом, интенсивность излучаемой плоской волны при прочих равных условиях пропорциональна акустическому сопротивлению среды.

Напомним, что интенсивность волны равна энергии, переносимой волной за единицу времени через единицу площади. Поэтому, если вибратор площадью S излучает волны в обе стороны, то за период T его колебаний потери энергии за счет излучения составят

$$W' = 2IST = 2IS \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \rho_2 c_2 \omega a^2 S. \quad (5.59)$$

Согласно формуле (5.55) энергия, запасенная в вибраторе, акустическое сопротивление которого $\rho_1 c_1$, равна

$$W = \frac{\pi}{4} S \rho_1 c_1 \omega a^2. \quad (5.60)$$

Отсюда, вспоминая выражение (5.49), добротность вибратора, если учитывать потери энергии только на излучение,

$$Q = 2\pi \frac{W}{W'} = \frac{\pi}{4} \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}. \quad (5.61)$$

Акустическое сопротивление феррита равно $\rho_1 c_1 = 29,28 \times 10^6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а воздуха — $\rho_2 c_2 = 428,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, поэтому добротность ферритового вибратора в воздухе огромна: $Q_1 = 5,36 \cdot 10^4$. Реально она, конечно, меньше, так как формула (5.61) учитывает потери энергии только за счет излучения, но энергия теряется, по крайней мере, еще и в месте крепления вибратора. Вибратор в воде, согласно формуле (5.61), имеет добротность, равную всего 16. Чаще всего вы работаете с магнитоотрицательным излучателем, у которого в воде находится один конец вибратора; добротность такого вибратора равна 32, что примерно в 1500 раз меньше добротности вибратора, находящегося в воздухе. Именно поэтому амплитуда колебаний вибратора в воздухе при резонансе столь велика, а резонансная характеристика столь узка. Когда конец вибратора находится в воде, настроиться на резонанс гораздо проще, так как резонансная кривая значительно шире.

Глава 6

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Свойства упругих волн не зависят от их амплитуды (или интенсивности) до тех пор, пока она остается сравнительно небольшой. Строго говоря, это утверждение справедливо лишь для волн бесконечно малой амплитуды. Распространение упругих волн большой интенсивности или, как говорят, *волн конечной амплитуды*, приводит к появлению совершенно новых акустических эффектов, получивших название *нелинейных* или эффектов второго порядка. В этой главе мы кратко рассмотрим некоторые линейные и нелинейные явления ультразвуки, используемые в дальнейших экспериментальных исследованиях.

6.1. Нелинейные эффекты

Условно интенсивности упругих волн, не превышающие примерно $0,1 \text{ Вт/см}^2$, можно считать *малыми*, интенсивности от $0,1$ до 10 Вт/см^2 — *средними*, и выше 10 Вт/см^2 — *большими*. Нелинейные явления наблюдаются при распространении в среде упругих волн средней и большой интенсивности. Проведенные вами исследования показывают, что рекомендуемый для опытов магнитострикционный излучатель обеспечивает получение ультразвука средней интенсивности. Значит, он пригоден для экспериментального изучения явлений нелинейной акустики.

Прежде чем приступить к исследованию конкретных нелинейных эффектов, нужно понять, какие акустические явления и почему именно принято относить к линейным, и попытаться получить общее представление о нелинейной акустике.

6.1.1. Линейная акустика. Уравнение гармонической волны, подробно изученное во второй главе, является одним из решений *линейного дифференциального уравнения второго порядка*, которое называется *волновым*. Поэтому все явления физики упругих волн, которые корректно описываются при использовании модели гармонической волны, называются *линейными*.

К линейным акустическим явлениям относятся распространение, затухание, отражение, преломление, интерференция, ди-

фракция, дисперсия, эффект Доплера и т. д. Для линейных явлений характерно выполнение *принципа суперпозиции волн*: результат нескольких одновременных волновых возмущений среды есть сумма результатов каждого из таких возмущений по отдельности. С некоторыми явлениями линейной акустики вы уже знакомы, другие мы экспериментально изучим позже.

6.1.2. Нелинейная акустика. Если упругая волна имеет достаточно большую интенсивность, то в дифференциальном волновом уравнении появляются новые члены, превращающие его в нелинейное. Явления волновой физики, теория которых основана на использовании *нелинейного волнового уравнения*, называются *нелинейными*. Лучше сказать так: нелинейными явлениями считают такие, для описания которых недостаточны приближения линейной акустики и необходим учет нелинейных членов уравнений гидродинамики и состояния, из которых следует волновое уравнение. Нелинейные члены уравнений содержат амплитуду волны во второй и более высоких степенях, поэтому нелинейные эффекты раньше часто называли *явлениями второго порядка*.

Упругие волны большой интенсивности вызывают нелинейные эффекты потому, что изменяют саму среду, в которой они распространяются, а это изменение оказывает влияние на распространение как исходной волны, так и других упругих волн. Количественно нелинейные эффекты характеризуются *акустическим числом Маха*:

$$M = \frac{v_m}{c} = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (6.1)$$

где v_m — амплитуда колебательной скорости частиц среды при распространении волны, c — фазовая скорость волны, ρ — плотность среды, в которой распространяется волна, ρ_0 — плотность среды при отсутствии волны.

К нелинейным эффектам относятся изменение формы волны при ее распространении, радиационное давление, звуковой ветер, кавитация, рассеяние звука на звуке, самофокусировка упругой волны и т. д.

6.1.3. Нелинейное взаимодействие упругих волн. Выше уже говорилось, что в области линейной акустики выполняется принцип суперпозиции: волны малой амплитуды не взаимодействуют друг с другом, каждая из них проходит через некоторую область среды так, как если бы через эту область другие волны не проходили (сопоставьте это утверждение с формулировкой принципа суперпозиции!). В области нелинейной акустики, то есть для волн конечной амплитуды принцип суперпозиции не выполняется: проходя через одну и ту же область среды эти

волны, вообще говоря, влияют друг на друга. Иными словами, результат нескольких одновременных воздействий упругих волн не равен сумме результатов, вызванных воздействием каждой волны по отдельности.

Подобные явления имеют место, например, при распространении ультразвуковых волн большой интенсивности в твердых телах. Чтобы понять, почему это происходит, обратимся к хорошо известной зависимости потенциальной энергии U взаимодействия атомов от расстояния r между ними (рис. 6.1). В состоянии равновесия атомы находятся на таком расстоянии друг от друга, которое соответствует минимуму потенциальной энергии. При небольшой амплитуде колебаний атомов, вызванных проходящей по твердому телу волной, положение равновесия их остается неизменным, так как смещения при сжатии и растяжении одинаковы. Ультразвуковая волна большой интенсивности приводит к колебаниям атомов с такой амплитудой, при которой их смещения, соответствующие фазам сжатия и растяжения становятся неодинаковыми. Это приводит к изменению положения равновесия атомов (штриховая кривая на рис. 6.1) и, следовательно, к изменению упругих свойств вещества.

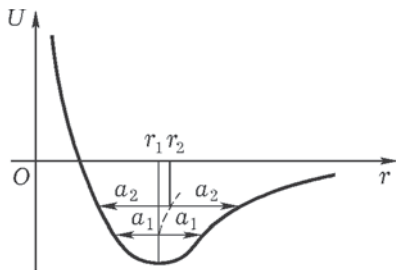


Рис. 6.1. В области линейной акустики смещение частиц происходит в пределах симметричной части графика; с увеличением амплитуды колебаний положение равновесия частиц смещается

Понятно, что изменение упругих свойств среды за счет бегущей волны большой интенсивности влияет на распространение в среде самой волны, вызывая эффекты самовоздействия, например, самофокусировку, генерацию акустических гармоник и т. д. Упругая волна большой интенсивности, меняя свойства среды, воздействует на другие волны, вместе с ней распространяющиеся в среде, вызывая, например, модуляцию и появление комбинационных частот.

Явления нелинейного взаимодействия упругих волн в твердом теле имеют важное научное значение и широко применяются на практике.

6.1.4. Искажение формы ультразвуковой волны. Процесс распространения упругой волны в газе или жидкости является *адиабатическим*, уравнение состояния для него имеет вид

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (6.2)$$

где p_0 и ρ_0 — давление и плотность невозмущенной среды, p и ρ — давление и плотность возмущенной среды, $\gamma = c_p/c_V$ — показатель адиабаты, c_p и c_V — теплоемкости среды при постоянном давлении и объеме.

Задачу о распространении упругой волны конечной амплитуды в идеальном газе решил немецкий математик Риман, который показал, что скорость c распространения произвольной точки профиля волны относительно среды определяется выражением

$$c = c_0 + \frac{\gamma + 1}{2} v,$$

где c_0 — скорость волны малой амплитуды, v — проекция колебательной скорости частиц на направление распространения волны. Точки волны, имеющие максимальную скорость $+v_m$, направленную по направлению

Рис. 6.2. Профиль скоростей волны конечной амплитуды (мгновенная фотография волны скоростей)

распространения волны, движутся со скоростью $c' = c_0 + (\gamma + 1)v_m/2$; точки, максимальная скорость которых $-v_m$, движутся со скоростью $c'' = c_0 - (\gamma + 1)v_m/2$ (рис. 6.2).

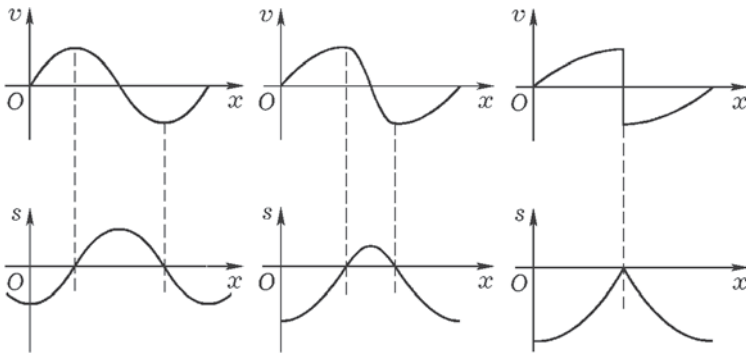
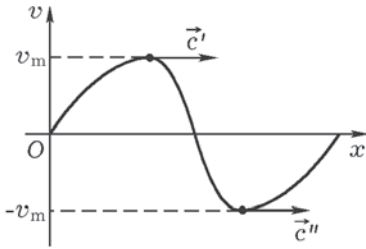


Рис. 6.3. Изменение профиля волны большой интенсивности при распространении в среде: сверху изображен профиль скоростей, снизу — профиль смещений, полученный интегрированием верхних графиков; отчетливо видно, что положение равновесия частиц смещается

Отсюда следует, что упругая волна большой интенсивности, первоначально имевшая гармонический профиль скорости, по мере распространения в упругой среде постепенно изменяет его (рис. 6.3). Понятно, что при этом искажается и форма волны смещений, которая из синусоидальной становится пилообразной.

6.1.5. Нелинейное поглощение упругих волн. Выше уже отмечалось (п. 2.2.7), что поглощением называется явление уменьшения интенсивности волны, вызванное переходом ее энергии во внутреннюю энергию среды. В области линейной акустики коэффициент поглощения не зависит от амплитуды волны. При достижении достаточно большой интенсивности упругой волны наряду с другими нелинейными эффектами становится заметным нелинейное поглощение волны, то есть такое явление, при котором зависимость коэффициента поглощения от амплитуды волны пренебрегать уже нельзя.

В первом приближении нелинейное поглощение можно объяснить тем, что при распространении происходит искажение формы волны большой интенсивности. Возрастает крутизна профиля, первоначально синусоидальная волна превращается в волну разрывов (п. 6.1.4). Их возникновение сопровождается увеличенным переходом энергии волны во внутреннюю энергию среды.

Если излучатель испускает гармоническую волну, то вблизи него поглощение сравнительно невелико и описывается линейным законом (2.30). Далее при распространении волны оно постепенно возрастает и достигает максимума на таком расстоянии от излучателя, где искажения формы волны максимальны. Затем поглощение вновь уменьшается. Если наблюдения проводить в определенной области среды, то с ростом амплитуды волны коэффициент поглощения увеличивается.

Здесь приведены лишь самые общие сведения, касающиеся явлений нелинейной акустики. На страницах этой книги вы еще не раз встретитесь с этими явлениями и исследуете их на доступном уровне.

6.2. Абсолютное измерение интенсивности

Нелинейные явления наблюдаются при больших интенсивностях упругих волн. А как измерить или хотя бы оценить интенсивность волны? Оказывается для этой цели можно использовать ориентирующее действие волны — явление, относящееся к линейной акустике.

В подавляющем большинстве случаев значение измеряемой величины находится путем сравнения ее с известным эталоном. Это так называемые *относительные измерения*. Но прежде чем производить такие измерения, необходимо иметь эталон, который сам должен быть измерен и отградуирован. Поэтому в физике особую ценность имеют *абсолютные измерения*, то есть такие, в которых искомое значение данной физической величины получается непосредственным измерением других величин, от которых она зависит. В этом параграфе рассмотрен способ аб-

солютного измерения колебательной скорости частиц газов или жидкостей при распространении в них упругих волн.

6.2.1. Измерения колебательной скорости и интенсивности. Эксперимент показывает, что на тела, помещенные в поле упругой волны, действуют различные силы. На качественном уровне рассмотрим одно из самых простых воздействий упругой волны на твердое тело.

Пусть в ультразвуковом поле под некоторым углом к направлению распространения волны расположен диск, радиус которого существенно меньше длины волны. Колеблющиеся частицы среды обтекают диск, меняя направление своего движения дважды за период ультразвуковой волны (рис. 6.4). При этом линии тока не меняются, поэтому неизменным остается распределение давления по поверхности диска. По закону Бернулли оно максимально в тех местах, где скорость потока минимальна, то есть там, где происходит ветвление потока. В результате возникают силы, создающие вращающий момент, который стремится повернуть диск перпендикулярно к направлению

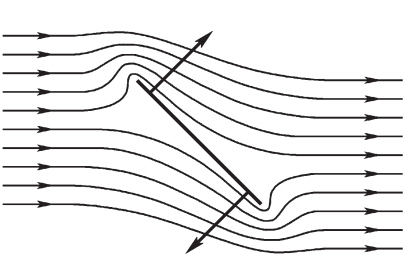


Рис. 6.4. При обтекании диска частицами среды возникает вращающий момент, разворачивающий диск перпендикулярно направлению распространения волны

распространения волны. Обычно диск подвешивают на упругой нити, которая при закручивании создает возвращающий момент. Описанное явление было впервые подробно изучено выдающимся английским физиком Дж. В. Рэлеем, который показал, что угол поворота диска при прочих равных условиях однозначно определяется колебательной скоростью частиц в упругой волне: малые углы поворота диска пропорциональны квадрату колебательной скорости $\alpha \sim v^2$. К сожалению, теория Рэля сложна и громоздка, поэтому не может быть здесь изложена. Приведем без вывода формулу, позволяющую по повороту диска Рэля определить колебательную скорость упругой волны:

$$v = \sqrt{\frac{3\tau\alpha}{4\rho r^3 \sin 2\alpha_0}}, \quad (6.3)$$

где α — небольшой угол поворота диска, α_0 — угол между нормалью к диску и направлением распространения волны до ее возбуждения, ρ — плотность среды, r — радиус диска, $\tau = 4\pi^2 M/T^2$ — коэффициент упругости кручения нити (M — момент инерции, T — период свободных колебаний диска).



РЭЛЕЙ (Стретт) Джон Уильям (1842–1919). Английский физик, член Лондонского королевского общества. Работы посвящены теории колебаний, одним из основоположников которой он является, акустике, теории теплового излучения, молекулярной физике, гидродинамике, электромагнетизму, оптике. Исследовал колебания упругих тел (струн, стержней, пластин), установил ряд свойств колебательных систем, первый обратил внимание на автоколебания. Изучал дифракцию, рассеяние и поглощение волн, волны конечной амплитуды и поверхностные волны,

предсказал особый вид поверхностных волн («волны Рэлея»). Развил понятия о фазовой и групповой скорости волн и установил соотношение между ними, дал формулу для групповой скорости. Заложил основы теории молекулярного рассеяния света, в частности ввел понятие о так называемом рэлеевском рассеянии света, установил закон, согласно которому интенсивность рассеянного средой света обратно пропорциональна четвертой степени длины волны возбуждающего света (закон Рэлея), объяснил голубой цвет неба. Вывел закон распределения энергии излучения в спектре абсолютно черного тела в зависимости от температуры (закон Рэлея–Джинса). Сконструировал рефрактометр (рефрактометр Рэлея), установил разрешающую силу призмных и дифракционных приборов, изобрел дифференциальный манометр (манометр Рэлея), прибор для измерения силы звука (диск Рэлея).

Диск Рэлея оказался весьма чувствительным прибором, позволяющим проводить абсолютные измерения колебательных скоростей, начиная от значения около 0,1 см/с. Однако на достоверность этих измерений существенное влияние оказывают потоки жидкости и газа, вызванные как исследуемой волной, так и иными причинами. От них частично избавляются, помещая на пути упругой волны тонкие перегородки. Отрицательно сказывается также неоднородность волнового поля.

Интенсивность упругой волны пропорциональна квадрату амплитуды колебательной скорости, поэтому диск Рэлея может быть использован для измерения непосредственно интенсивности. Нетрудно показать, что *если размеры диска малы по сравнению с длиной ультразвуковой волны, то момент силы, поворачивающей диск, пропорционален интенсивности ультразвука.*

В настоящее время существуют гораздо более удобные и точные методы измерения интенсивности звука, и поэтому диск Рэлея с этой целью практически не применяется. Однако сам эффект ориентации в ультразвуковом поле, как мы узнаем несколько позже, нередко используется для обнаружения ультразвука и даже для проявления ультразвуковых изображений.

6.2.2. Качественное исследование диска Рэлея. Экспериментальная установка для демонстрации принципа действия диска Рэлея изображена на рис. 6.5. Легкий диск 1, выполнен-

ный из отражающего свет материала, приклеен к тонкой упругой нити 2, верхний конец которой пропущен через трубку 3 и привязан к указателю 4. К нижнему концу нити привязан груз 5, опущенный в жидкость 6 с целью демпфирования крутильных

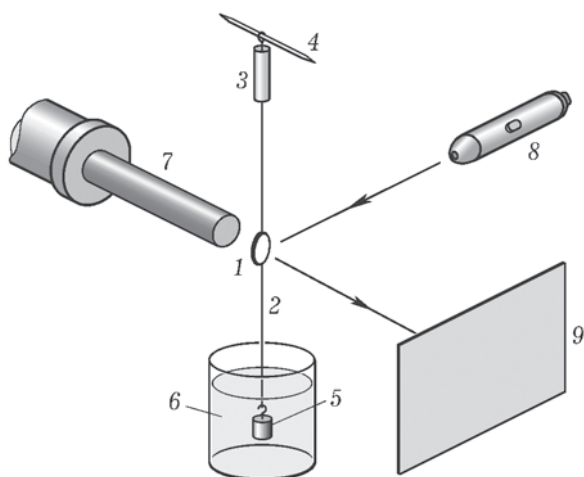


Рис. 6.5. Схема экспериментальной установки для исследования диска Рэлея: 1 — диск Рэлея с зеркальной поверхностью, 2 — тонкая нить, 3 — трубка, фиксирующая положение нити, 4 — указатель угла поворота нити, 5 — груз, растягивающий нить, 6 — сосуд с демпфирующей жидкостью, 7 — вибратор магнитострикционного излучателя, 8 — полупроводниковый лазер, 9 — белый экран

колебаний системы. Диск расположен под некоторым углом к направлению распространения ультразвука от вибратора 7 магнитострикционного излучателя. На диск направлен узкий пучок света от полупроводникового лазера 8 так, чтобы он отражался на экран 9.

Для сборки представленной установки требуется не более получаса. Диск диаметром 5 мм вырежьте из тщательно разглаженной блестящей алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм. Небольшой каплей клея диск приклейте примерно посередине медной проволоки длиной около 20 см и диаметром 0,02 мм. К нижнему концу проволоки в качестве груза привяжите металлическую гайку. Верхний конец проволоки пропустите через тонкую полихлорвиниловую трубку от изоляции и привяжите к отрезку проволоки, выполняющему функцию указателя. Полихлорвиниловую трубку зажмите в лапке штатива так, чтобы вся конструкция свободно висела, и опустите груз в стакан с водой.

Магнитострикционный излучатель низкой частоты закрепите в лапке штатива так, чтобы его торец находился на расстоянии

5–15 мм от диска Рэлея. На том же штативе разместите полупроводниковый лазер в таком положении, при котором световой пучок падает на диск. За указатель поверните верхний конец нити так, чтобы угол между плоскостью диска и направлением распространения ультразвука был близок к 45° . Поймайте отраженный диском свет на экран, расположенный на расстоянии около полуметра от диска. На этом сборку экспериментальной установки можно считать законченной.

Включите питание ультразвукового генератора и настройте его в резонанс с вибратором. При этом вы будете наблюдать, как зайчик на экране резко смещается на расстояние до 5 см. Изменяйте расстояние между излучателем и диском, наблюдая соответствующее изменение угла поворота диска.

6.2.3. Стоячая волна в воздухе и диск Рэлея. Попробуйте экспериментально доказать, что диск Рэлея реагирует именно на колебательную скорость упругой волны (см. п. 2.2.1).

Подведите магнитострикционный излучатель к диску Рэлея так, чтобы расстояние между торцом его вибратора и диском составило около 25 мм. Поступательно приближайте к торцу параллельную ему твердую пластинку с плоской поверхностью (рис. 6.6). При этом вы будете наблюдать периодическое изменение положения зайчика на экране. Измерьте расстояние между соседними положениями пластинки, при которых зайчик отклоняется на равные величины. Зная частоту и скорость звука в воздухе, вычислите длину ультразвуковой волны. Убедитесь, что она в два раза больше измеренного расстояния. Отсюда следует, что в опыте между торцом вибратора и твердой пластинкой устанавливается стоячая волна.

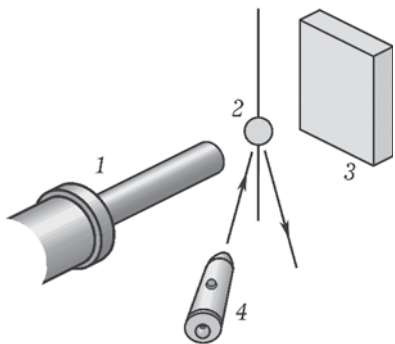


Рис. 6.6. К исследованию стоячей волны в воздухе с помощью диска Рэлея: 1 — вибратор излучателя; 2 — диск Рэлея; 3 — плоская отражающая волну пластинка; 4 — полупроводниковый лазер

Повторите опыт с целью определения минимального расстояния между диском Рэлея и отражателем, при котором поворот диска в поле стоячей ультразвуковой волны максимален. Вы обнаружите, что это расстояние равно четверти длины волны ультразвука в воздухе.

Поскольку на твердом отражателе расположен узел смещений стоячей волны (см. ниже п. 8.1.3), то на расстоянии четверти длины волны от него находится пучность смещений и, следо-

вательно, пучность скоростей стоячей волны. Отсюда следует, что расположенный в поле упругой волны диск Рэлея реагирует именно на колебательную скорость частиц этой волны.

6.3. Ориентирующее действие ультразвука

Опыты предыдущего параграфа показали, что на диск, расположенный в поле упругой волны, действует вращающий момент, стремящийся повернуть его в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны. Можно предположить, что такое же действие упругая волна окажет не только на диск, но и на любое плоское тело или совокупность таких тел. В качестве плоских тел можно взять взвешенные в среде чешуйки. Исследуйте возникающие при этом явления.

6.3.1. Диск Рэлея в жидкости. Прежде чем исследовать поведение взвешенных в жидкости чешуек, убедитесь, что и в жидкости ультразвуковая волна оказывает ориентирующее действие на плоский диск.

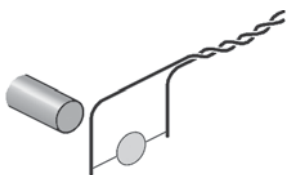


Рис. 6.7. Конструкция устройства, позволяющего наблюдать ориентирующее действие ультразвука в жидкости

Из тонкой латунной фольги вырежьте диск диаметром около 5 мм. Диск с помощью небольшой расплавленной капельки олова, клея или парафина укрепите на медной проволоке диаметром 0,05 мм растянутой между концами изогнутой в виде рогатки толстой проволоки (рис. 6.7). Диск должен быть укреплен так, чтобы в воздухе от легкого дуновения он мог совершать крутильные колебания.

Поместив изготовленный диск Рэлея в воду вблизи ферритового вибратора низкочастотного излучателя, еще раз убедитесь в существовании ориентирующего действия ультразвука.

6.3.2. Ориентация взвешенных в жидкости чешуек.

В сосуд емкостью около полулитра с герметически завинчивающейся крышкой налейте ацетон и взболтайте в нем немного алюминиевой краски (ее часто называют «серебрянкой»). Вместо ацетона в качестве жидкости можно использовать керосин, но с несколько худшими результатами. Оптимальное количество серебрянки нужно подобрать экспериментально. Сделать это нетрудно, так как серебрянка постепенно оседает на дно сосуда и в нужный момент всегда можно отлить из него жидкость с требуемой концентрацией краски. Герметически закройте сосуд завинчивающейся крышкой и по мере необходимости, взболтав находящуюся в нем жидкость, отливайте часть ее для опытов.

В медицинскую бутылочку из-под пенициллина (диаметром 20 мм, высотой 45 мм) до плечиков налейте взвесь алюминиевой краски в ацетоне и закройте бутылочку полиэтиленовой пробкой. Виболтайте содержимое бутылочки так, чтобы оно воспринималось как однородная серая масса. Дном поставьте бутылочку на торец вибратора вертикально расположенного магнитострикционного излучателя низкой частоты. Настройте генератор в резонанс с вибратором. При этом вы услышите дребезжащий звук и заметите, что жидкость в бутылочке внезапно просветлела (рис. 6.8)! Выключите ультразвук, и жидкость моментально становится серой и непрозрачной, включите — жидкость светлеет и приобретает прозрачность.

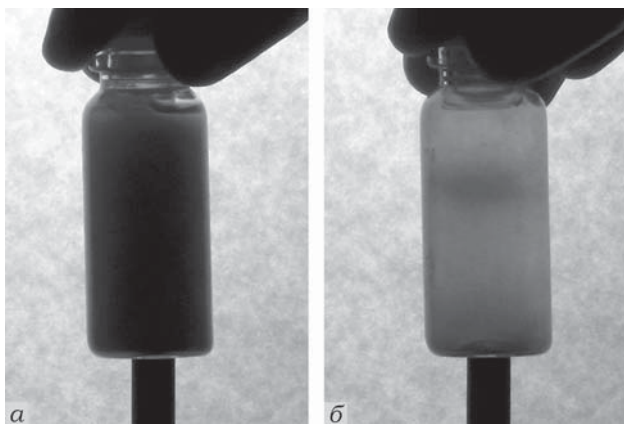


Рис. 6.8. Просветление суспензии алюминиевой краски в ацетоне: *а* — ультразвук выключен; *б* — ультразвук включен

Нетрудно понять, почему так происходит. Бутылочка заполнена взвесью (суспензией) мельчайших частиц алюминия в ацетоне. Эти частицы представляют собой чешуйки, диаметр которых раз в 10–20 превосходит их толщину. Алюминиевые чешуйки ориентированы в жидкости совершенно беспорядочно, так что они рассеивают падающий на бутылочку свет равномерно во всех направлениях. При прохождении ультразвука чешуйки, подобно диску Рэлея, ориентируются перпендикулярно к направлению распространения волны. Поэтому жидкость в бутылочке кажется светлее.

Ориентирующее действие ультразвука используется с целью выявления (проявления или, как говорят, *визуализации*) ультразвуковых изображений. Для получения качественных акустических изображений предметов применяют ультразвук высокой частоты, длина волны которого в исследуемых средах достаточно

мала. Сами изображения создают с помощью ультразвуковых линз или зеркал в специальной тонкой кювете. Кювету заполняют суспензией алюминиевых чешуек в подходящей жидкости (чаще всего, в ксилоле). Изображение, образованное ультразвуком в кювете, становится видимым непосредственно глазом благодаря тому, что ориентация чешуек выражена тем сильнее, чем интенсивнее ультразвук, а области с разной ориентацией чешуек по-разному рассеивают свет.

6.3.3. Акустический контакт. Магнитострикционный излучатель низкой частоты расположите вертикально на столе и на торец его вибратора нанесите каплю масла. Поместите в каплю на вибраторе дно пробирки с взвесью алюминиевой краски в ацетоне и включите ультразвук. При этом вы будете наблюдать, как серая жидкость в пробирке просветлеет и в ней возникнет мощный ультразвуковой ветер. Казалось бы, явление совершенно не отличается от описанного в предыдущем пункте, но теперь уже не слышен дребезжащий звук. Это, очевидно, означает, что колеблющийся вибратор уже не ударяет о дно пробирки.

Разберемся, для чего нужна капля масла на торце вибратора. Если дно пробирки поместить на сухой вибратор, то ультразвуковая волна пройдет в жидкость только в тех местах, где есть хорошее соприкосновение между ферритом вибратора и дном пробирки. Там, где вибратор и пробирка разделены хотя бы тончайшей воздушной прослойкой, ультразвук не пройдет, поскольку он практически полностью отражается на границе феррит–воздух. Коэффициент отражения на границе, разделяющей твердое вещество и жидкость, значительно меньше, поэтому наличие капли жидкости между ферритом и стеклом приводит к увеличению интенсивности ультразвука в пробирке. Экспериментаторы в таких случаях говорят, что жидкость между вибратором и пробиркой улучшает *акустический контакт*. Вы уже знакомы с этим явлением по опытам, проделанным с магнитострикционным излучателем, нижний торец вибратора которого находится в капле воды на твердой пластинке (п. 5.2.4). Рекомендуем провести подробное исследование и выяснить, в каких случаях хороший акустический контакт необходим или желателен, а в каких он вреден.

6.3.4. Просветление мутной жидкости. Рассмотренное в этом параграфе явление просветления под действием ультразвука суспензии алюминиевой краски в ацетоне настолько эффективно, что соответствующий демонстрационный опыт просто необходим.

Для его постановки можно вместо небольшой бутылочки использовать химический стакан емкостью от 50 до 250 мл или круглую колбу емкостью до 500 мл. Во всех случаях требуется

подобрать оптимальную высоту жидкости в сосуде так, чтобы образующаяся в ней стоячая волна (см. ниже п.9.1.1) дала наибольший эффект просветления.

В качестве жидкости можно попробовать использовать смеси керосина, масла, ацетона и т. д., подобрав такой состав, в котором чешуйки алюминиевой краски оседают с наименьшей скоростью.

Еще один вариант демонстрационного опыта понятен из фотографий, приведенных на рис.6.9. В нем бутылочка с просветленной ультразвуком жидкостью выполняет роль собирающей

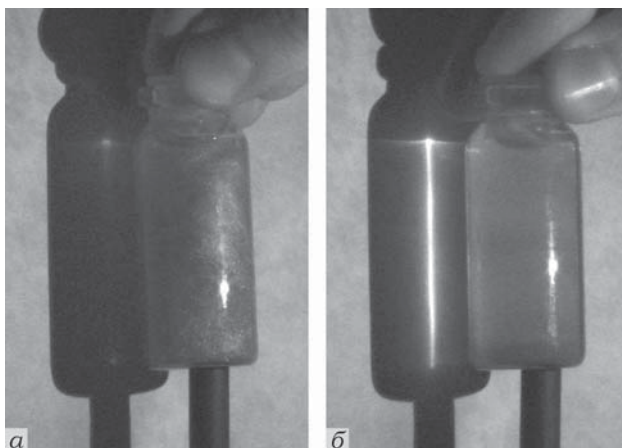


Рис. 6.9. Фокусировка света бутылочкой, наполненной суспензией алюминиевой краски в ацетоне: *а* — ультразвук выключен; *б* — ультразвук включен

цилиндрической линзы. Расстояние от нее до источника света, в качестве которого может быть использована лампочка карманного фонаря, составляет 15–20 см. Расстояние от бутылочки до экрана, работающего на просвет, не превышает 5 см и подбирается экспериментально так, чтобы на экране получалось яркое изображение спирали лампочки в виде светлой вертикальной полосы.

6.4. Акустический ветер

При распространении ультразвуковой волны частицы среды колеблются около своих положений равновесия (если не учитывать беспорядочного теплового движения) и не перемещаются вместе с волной. Вы знаете, что это свойство является одним из признаков волнового движения, при котором происходит перенос энергии, а не вещества. Однако при включении мощного излучателя ультразвука частицы среды наряду с колебательным совершают и поступательное движение: в среде возникает те-

чение, направленное от излучателя и имеющее скорость, много меньшую скорости звука. Такое движение частиц среды получило название *акустического ветра*. Теория этого нелинейного явления непростая и еще далека от окончательного завершения. Поэтому мы предлагаем опыты, позволяющие провести качественные экспериментальные исследования акустического ветра.

6.4.1. Ультразвуковой ветер в воздухе. На расстоянии около 5 мм от пламени свечи расположите торец вибратора магнитострикционного излучателя. Включите ультразвуковой генератор и настройте его в резонанс с вибратором. При этом вы заметите отклонение пламени, обусловленное идущим от вибратора слабым потоком воздуха (рис. 6.10). Пламя свечи послужило здесь индикатором ультразвукового ветра.

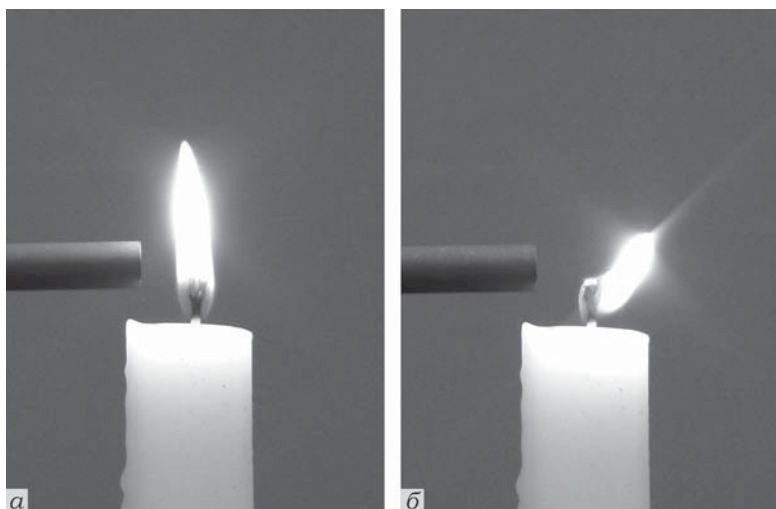


Рис. 6.10. Действие ультразвукового ветра на пламя свечи: *а* — ультразвук выключен; *б* — ультразвук включен

Для того чтобы уменьшить влияние посторонних воздушных потоков, свечу можно поместить в сосуд с отверстиями сверху, сбоку и возле его дна. Боковое отверстие предназначено для введения вибратора, поэтому оно должно находиться примерно на уровне пламени. Верхнее и нижние отверстия предназначены для обеспечения потока воздуха через сосуд. В качестве сосуда удобнее всего использовать широкую пластиковую бутылку без дна и крышки.

6.4.2. Ультразвуковой ветер в жидкости. Ультразвуковой ветер можно наблюдать и в жидкости. Чтобы подтвердить это, взболтайте в стакане с водой немного крахмала. Опустите в жид-

кость вибратор излучателя и подождите, пока суспензия крахмала не успокоится. Подайте в воду ультразвук низкой частоты. Вы увидите, что в жидкости постепенно устанавливается медленное течение, как бы исходящее из торца вибратора. Аналогичное явление вы уже наблюдали в опытах по просветлению суспензии алюминиевой краски в ацетоне (п. 6.3.3).

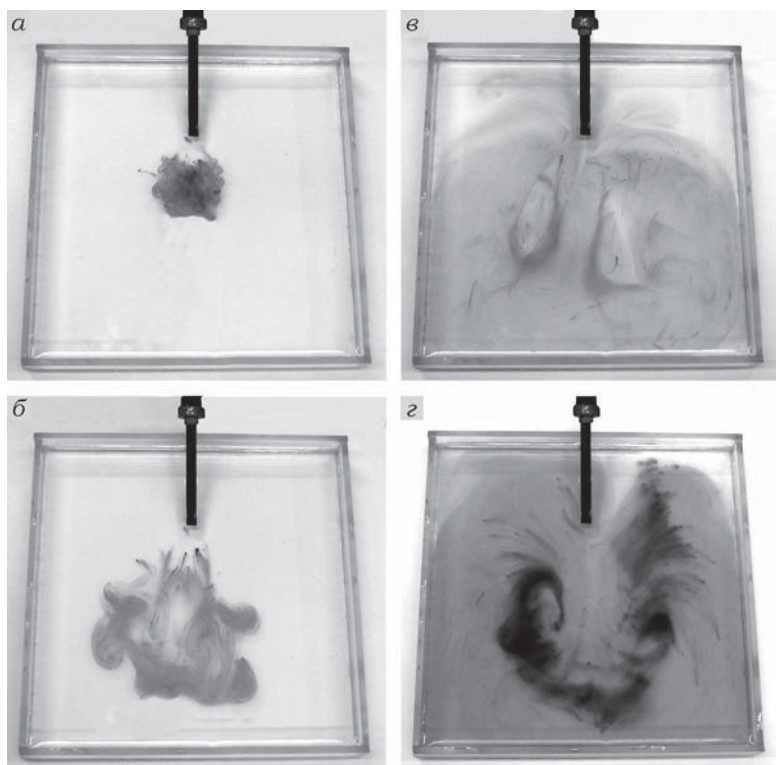


Рис. 6.11. Марганцовокислый калий позволяет визуализировать линии тока в акустическом течении (последовательные стадии процесса)

Экспериментально покажите возможность существования ультразвукового ветра на поверхности жидкости. Для этого в плоский сосуд налейте воду и на ее поверхность нанесите каплю черной (морозостойчивой) туши. Возле капли введите в воду конец расположенного наклонно вибратора магнито-стрикционного излучателя низкой частоты так, чтобы его торец погрузился почти наполовину. Включите ультразвук и наблюдайте деформацию капли под действием акустического ветра.

Ультразвуковой ветер в тонком слое жидкости можно наблюдать следующим образом. В большую плоскую кювету налейте отстоявшуюся воду так, чтобы получился слой толщиной 10–15 мм. В воду наклонно введите конец ферритового вибратора магнитострикционного излучателя так, чтобы он не касался дна. Марганцовокислый калий разотрите в мелкий порошок и перед вибратором на поверхность воды насыпьте несколько мелких кристалликов. Включив ультразвук, вы увидите, как под действием акустического ветра возникает облако водного раствора марганцовокислого калия, плывущее от вибратора. Обратите внимание на следы, которые возникают возле каждого кристаллика: они обозначают направление и величину скорости акустического ветра. Постепенно подсыпайте возле вибратора визуализирующий порошок марганцовокислого калия и вскоре вы сможете наблюдать установившуюся в кювете картину течения воды, вызванного акустическим ветром. На рис. 6.11 показаны последовательные стадии описанного явления.

6.4.3. Зависимость ультразвукового ветра от частоты.

Интересно исследовать зависимость интенсивности акустического ветра от частоты ультразвука. Если вместо вибратора длиной 160 мм в опытах использовать излучатель с вибратором длиной 60–80 мм, то ультразвуковой ветер в воздухе получается гораздо более интенсивным, и пламя свечи отклоняется значительно сильнее. Наконец, если питание генератора (см. п. 4.3.2) вместо двух батарей осуществлять от сетевого источника напряжением 12 В, то в опыте с коротким вибратором ветер получается настолько сильным, что в состоянии погасить пламя *именинной* свечи. При постановке последнего опыта нежелательно оставлять работающий излучатель на сколько-нибудь длительное время, поскольку почти наверняка его вибратор будет разорван.

Для обнаружения ультразвукового ветра в воздухе вместо пламени свечи можно воспользоваться легким сыпучим порошком (например, *ликоподием*), насыпанным на сухую стеклянную пластинку перед торцом вибратора. Этот метод удобен для сравнения силы ультразвукового ветра в воздухе от разных источников. В качестве источников ультразвука разной частоты можно использовать магнитострикционные излучатели с вибраторами длиной от 60 до 160 мм. Чтобы обеспечить примерное равенство электрической мощности, для возбуждения ультразвука надо взять один и тот же ультразвуковой генератор и подключать его к одному и тому же источнику питания.

6.4.4. Качественное объяснение ультразвукового ветра.

Количественные исследования показывают, что при малых интенсивностях скорость акустического ветра пропорциональна ин-

тенсивности, квадрату частоты и коэффициенту поглощения упругой волны; она тем больше, чем меньше плотность среды и скорость звука в ней.

Физической причиной возникновения акустического ветра является перенос волной количества движения колеблющихся около положений равновесия частиц среды. При наличии поглощения волны часть этого количества движения передается среде, вызывая ее течение в направлении распространения волны. Поэтому скорость возникающего течения пропорциональна интенсивности и коэффициенту поглощения волны.

По современным представлениям за акустическое течение ответственно еще одно нелинейное явление — *радиационное давление*. Суть этого явления заключается в том, что упругая волна, падая на отражающее или поглощающее препятствие, оказывает на него постоянное давление. Подробно радиационное давление мы будем изучать несколько позже. При распространении плоской упругой волны в жидкости за счет поглощения возникает перепад или *градиент* радиационного давления: вблизи излучателя оно максимально и уменьшается по мере удаления от него. Поэтому на жидкость действует постоянное давление по направлению распространения волны. Оно и приводит к упорядоченному течению среды от излучателя, то есть к акустическому ветру.

6.5. Силы, действующие на тела в поле упругой волны

На тела, находящиеся в поле упругой волны, действуют различные механические силы, которые называют *пондеромоторными*. Физической причиной этих сил являются как линейные, так и нелинейные эффекты.

6.5.1. Притяжение предмета к вибратору излучателя.

В пробирку (или стакан) налейте воду и поместите на ее дно небольшие кусочки какого-либо немагнитного материала, например, оргстекла. Прикоснитесь к кусочкам оргстекла торцом вибратора и убедитесь, что неработающий вибратор их не притягивает. Включите ультразвуковой генератор и настройте его в резонанс с вибратором. Расположите излучатель так, чтобы его вибратор находился на расстоянии 1–2 мм от кусочка оргстекла. При этом вы увидите, что оргстекло подскочит и как бы прилипнет к торцу вибратора. Поднимая вибратор, вместе с ним можно поднять и оргстекло вплоть до поверхности воды (иногда удается вынуть вибратор с прилипшим к его торцу кусочком оргстекла даже в воздух). Опыт с тем же результатом можно повторить с обрезками винипласта, алюминия и т. п. Это свидетельствует о

том, что в первом приближении эффект притяжения не зависит от материала кусочков (рис. 6.12).

Притяжение работающим вибратором объясняется тем, что среднее давление в ультразвуковом поле меньше, чем в невозмущенных частях жидкости. За кусочком любого материала ультразвуковая волна менее интенсивна, чем перед ним, и поэтому на кусочек действует сила, направленная к источнику ультразвука.

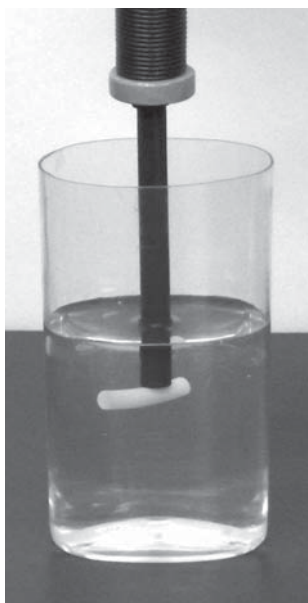


Рис. 6.12. Эксперимент по наблюдению притяжения отрезка полихлорвиниловой трубки к торцу вибратора, излучающего ультразвук

6.5.2. Взаимодействие тел в ультразвуковом поле. На концах двух тонких (диаметром около 0,02 мм) медных проволочек, пользуясь паяльником, сделайте из припоя два по возможности одинаковых шарика 1 диаметром 0,5–1 мм (рис. 6.13 а). На вибратор магнитострикционного излучателя 3 посередине наденьте резиновое колечко 5, а поверх него — небольшой отрезок резинового шланга 4. В резиновую трубку вставьте стеклянную 2 внутренним диаметром 9–10 мм так, чтобы примерно половина вибратора находилась внутри трубки. При этом вибратор должен быть закреплен только узким резиновым колечком и не касаться стенок стеклянной трубки.

Расположив излучатель вертикально на столе, введите в каркас его обмотки возбуждения вибратор с закрепленной на нем стеклянной трубкой. В трубку до высоты 15–20 мм от торца вибратора налейте воду. Опустите в воду изготовленные ранее шарики из припоя и укрепите на спичке пластилином держащие их проволочки так, чтобы шарики находились на расстоянии около 5 мм от торца вибратора и не касались стенок трубки.

Включите ультразвуковой генератор и настройте его в резонанс с вибратором. При этом шарики немедленно сблизятся и коснутся друг друга. Если выключить ультразвук, шарики вновь займут исходное положение.

Из опыта со всей очевидностью следует, что между двумя шариками, помещенными на пути распространения ультразвуковой волны, действуют силы взаимного притяжения. Попробуем объяснить это интересное явление.

Когда шарики расположены так, что отрезок, соединяющий их центры, перпендикулярен к направлению распространения ультразвука (рис. 6.13 б), частицы жидкости, совершающие колебательное движение, в области между шариками движутся с большей скоростью, чем в остальном объеме жидкости. При этом по закону Бернулли давление в указанной области снижается. Поэтому на шарики действуют силы, стремящиеся их сблизить.

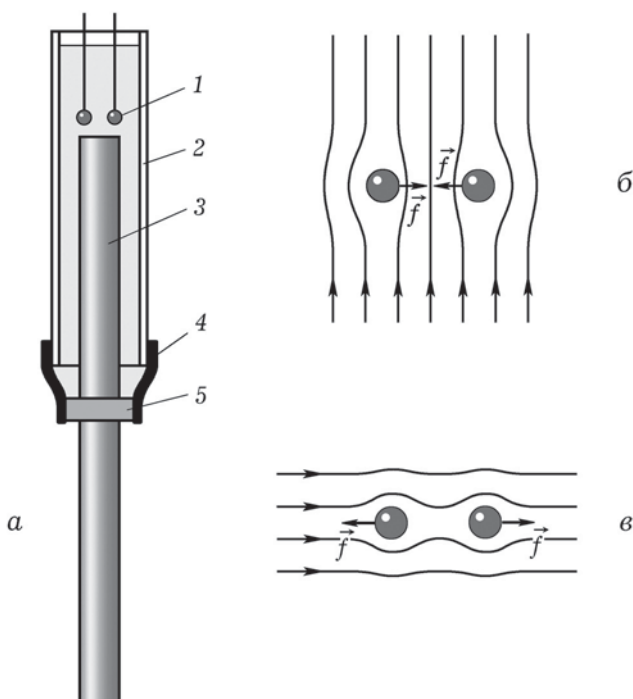


Рис. 6.13. Силы, действующие на шарики, находящиеся в ультразвуковом поле: 1 — шарики из припоя; 2 — стеклянная трубка; 3 — ферритовый вибратор; 4 — отрезок резинового шланга; 5 — резиновое колечко

Если шарики расположить вдоль направления распространения ультразвука (рис. 6.13 в), то колебательная скорость частиц жидкости в области между шариками будет меньше, чем в окружающей их жидкости. Поэтому давление в промежутке между шариками возрастает, что приводит к возникновению сил отталкивания. В этом нетрудно убедиться на опыте, расположив шарики на концах тонких проволоочек вдоль направления распространения ультразвука.

Таким образом, силы, действующие между двумя частицами, находящимися в области распространения ультразвуковой

волны, зависят от взаимного расположения частиц относительно фронта волны. Позже (см. п. 13.3.1) мы изучим явление *коагуляции* — объединение мелких частиц, взвешенных в газе или жидкости, в более крупные и их осаждение. Это явление обусловлено тем, что частицы в ультразвуковом поле могут взаимно притягиваться и отталкиваться.

На рис. 6.14 приведена фотография эксперимента, показывающего наличие силы притяжения между шариками, расположенными в ультразвуковом поле. Детально продумать и поставить убедительный опыт, в котором шарики отталкиваются друг от друга, предоставляем вам самостоятельно.

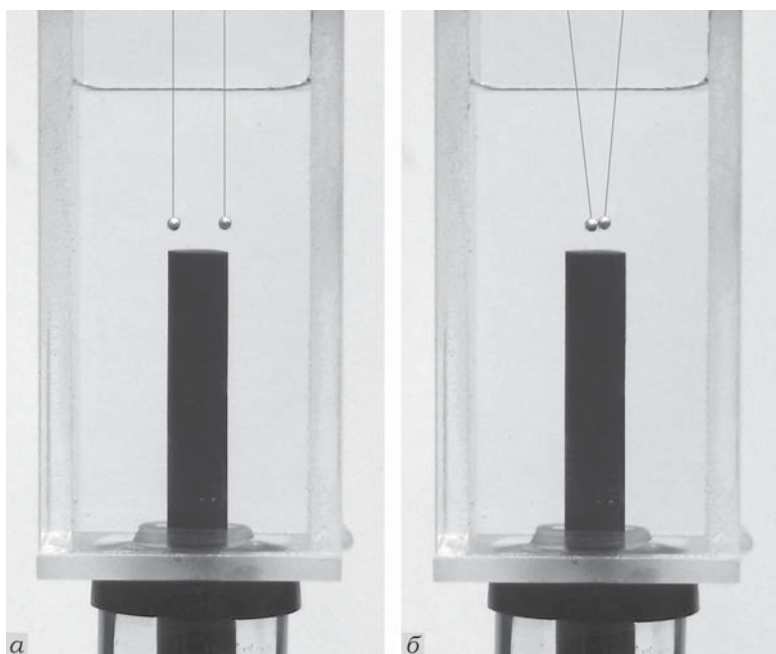


Рис. 6.14. Шарик, расположенные поперек направления распространения ультразвуковой волны, притягиваются друг к другу: *а* — ультразвук выключен; *б* — ультразвук включен

Следует иметь в виду, что помимо рассмотренных здесь *гидродинамических сил* на тела в ультразвуковом поле действуют и чисто акустические силы, зависящие от сжимаемости среды. Например, пульсирующие под действием ультразвука сферы притягиваются друг к другу с так называемой *силой Бьеркнеса*, а осциллирующие — взаимодействуют с *силой Кенига* (названия сил даны по именам ученых, вычисливших их значения).

Глава 7

ДАВЛЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН

Одним из нелинейных эффектов является *радиационное давление*, которое распространяющаяся упругая волна оказывает на отражающие и поглощающие ее препятствия или, точнее, на границу раздела различных сред. В этой главе мы познакомимся как с самим явлением радиационного давления, так и с использованием его для измерения интенсивности упругой волны.

7.1. Радиационное давление упругой волны

Продольная упругая волна представляет собой периодически чередующиеся области сжатий и разрежений, которые распространяются в среде с постоянной скоростью. Следовательно, в каждой точке звукового поля существует переменное звуковое давление, среднее по времени значение которого равно нулю. Вместе с тем упругая волна оказывает и постоянное давление на встречающиеся на ее пути препятствия. Разберемся, почему так происходит.

7.1.1. Радиационное давление волны. Радиационное давление свойственно всем волнам вообще, независимо от их природы: и волны на поверхности жидкости, и звук, и свет «давят» на препятствия. Экспериментальное доказательство существования светового давления, полученное русским физиком П. Н. Лебедевым, явилось выдающимся вкладом в науку и принесло славу блестящего экспериментатора нашему соотечественнику.

Его ученик Р. Б. Альтберг, будучи еще студентом, построил первый *звуковой радиометр* и доказал существование радиационного давления звука. Чтобы почувствовать, насколько непросты были его опыты, проведенные в начале прошлого столетия, достаточно вдуматься в их условия. Молодой ученый экспериментировал со звуковыми волнами в воздухе длиной порядка 10 см, излучателем которых служила стеклянная трубка, возбуждаемая трением (см. п. 1.2.2). Громкость звука, обеспечивающего снятие надежных показаний радиометра, была настолько велика, что исследователь мог проводить эксперименты, только закрыв слуховые проходы ушей стеклянными шариками. Вы будете ста-



ЛЕБЕДЕВ Петр Николаевич (1866–1912). Русский физик–экспериментатор. Известен как блестящий экспериментатор–виртуоз, автор исследований, выполненных скромными средствами на грани технических возможностей того времени, но поражающих глубокой физической интуицией. Впервые создал комплекс устройств для генерирования и приема миллиметровых электромагнитных волн с длиной 6 и 4 мм, установил их отражение, двойное преломление, интерференцию и др. Экспериментально доказал существование давления света на твердые тела и

газы, что явилось прямым подтверждением электромагнитной теории света. Осуществил также оригинальные эксперименты по магнетизму вращающихся тел, выдвинул глубокие идеи относительно природы межмолекулярных сил и происхождения хвостов комет, занимался также вопросами акустики, в частности ультразвуки.

вить аналогичные опыты с ультразвуковыми волнами в воздухе, имеющими не меньшую интенсивность, но не испытаете никаких неприятных ощущений, поскольку эти волны неслышимы.

7.1.2. Элементарная теория радиационного давления.

Теория давления звука, для развития которой особенно много сделали Рэлей, Ланжевен и Бриллюэн, показывает, что радиационное давление в свободной среде на полностью поглощающее звук препятствие $P_{\text{п}}$ численно равно средней плотности акустической энергии \bar{w} вблизи препятствия:

$$P_{\text{п}} = \bar{w} = \frac{I}{c}, \quad (7.1)$$

а давление на полностью отражающее препятствие P_0 в два раза больше:

$$P_0 = 2\bar{w} = 2 \frac{I}{c}, \quad (7.2)$$

где I — интенсивность, c — скорость упругой волны в среде (см. пп. 2.2.4, 2.2.5, формулы (2.25) и (2.27)). Дадим элементарный вывод этих формул.

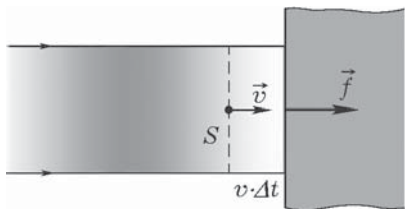


Рис. 7.1. К выводу формул для давления упругой волны на препятствие

Пусть плоская упругая гармоническая волна нормально падает на полностью поглощающее эту волну препятствие площадью S (рис. 7.1). Колебательная скорость частиц среды возле препятствия выражается формулой (2.9): $v = a\omega \cos(\omega t - kx)$ (см. п. 2.2.1). Поглощение волны

препятствием означает, что в падающей волне колеблющиеся частицы среды неупруго соударяются с препятствием, полностью

отдавая ему свой импульс. За время Δt с препятствием неупруго взаимодействует объем среды $v\Delta t S$, масса которого составляет $\Delta m = \rho v\Delta t S$, где ρ — плотность среды. Существенно, что неупругое взаимодействие частиц среды с препятствием имеет место независимо от того, в какую сторону — к препятствию или от него — направлена их колебательная скорость. Поэтому за время Δt падающая волна передаст препятствию импульс

$$\Delta p = \Delta m v = \rho v^2 \Delta t S. \quad (7.3)$$

Так как импульс равен произведению силы на промежуток времени, в течение которого она действует $\Delta p = f\Delta t$, то оказываемая волной на препятствие переменная сила давления $f = \rho v^2 S$. Время наблюдения радиационного давления существенно превосходит период волны, поэтому вместо мгновенной силы нужно взять ее среднее по времени значение $\bar{f} = \rho \bar{v}^2 S$. Тогда постоянное давление волны на полностью поглощающее ее препятствие

$$P_{\Pi} = \frac{\bar{f}}{S} = \rho \bar{v}^2.$$

Квадрат колебательной скорости частиц среды дается выражением $v^2 = a^2 \omega^2 \cos^2(\omega t - kx)$. Поскольку среднее значение квадрата косинуса равно $1/2$, то среднее значение квадрата колебательной скорости $\bar{v}^2 = a^2 \omega^2 / 2$ и, подставляя это значение в предыдущую формулу, получаем

$$P_{\Pi} = \rho \frac{a^2 \omega^2}{2} = \frac{I}{c}, \quad (7.4)$$

так как интенсивность волны, согласно формуле (2.27) (см. в п. 2.2.5), $I = \rho a^2 \omega^2 c / 2$. Таким образом, формула (7.1) для радиационного давления на полностью поглощающее препятствие выведена.

В случае препятствия, полностью отражающего волну, в рассмотренных выше условиях частицы среды испытывают с препятствием упругие соударения. Поэтому они передают препятствию в два раза больший импульс. В результате радиационное давление оказывается в два раза больше, чем на полностью отражающее препятствие, то есть выражается формулой (7.2).

7.1.3. Обнаружение радиационного давления. Убедиться в существовании радиационного давления ультразвука можно в простом эксперименте. Магнитострикционный излучатель расположите на столе вертикально и на расстоянии 1–2 см от торца его вибратора горизонтально поместите узкую полоску писчей бумаги длиной примерно 7 см и шириной 1–2 см. Полоску можно просто держать в руке за один из концов. При этом второй ее

конец немного провисает над вибратором. Настройте генератор в резонанс с вибратором и наблюдайте, что в момент включения ультразвука полоска резко отклоняется вверх.

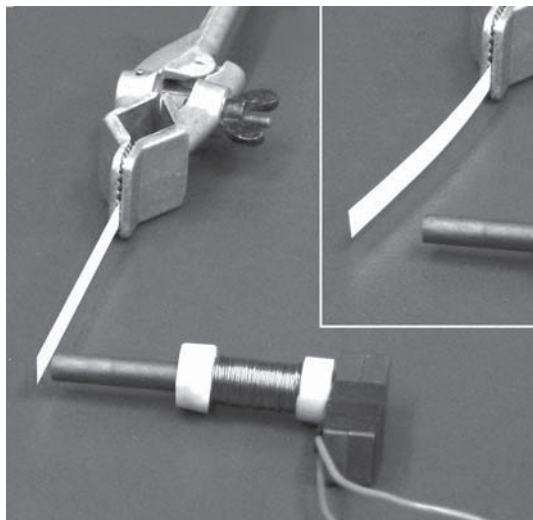


Рис. 7.2. Действие радиационного давления ультразвуковой волны в воздухе на полоску бумаги: внизу — ультразвук выключен,верху — ультразвук включен

Возможен и другой вариант опыта по обнаружению радиационного давления бумажной полоской, который исключает влияние силы тяжести. Магнитострикционный излучатель ультразвука положите на стол. К торцу его вибратора приблизьте конец бумажной плоски, второй конец которой закреплен так, что полоска может изгибаться в горизонтальном направлении. Включите ультразвуковой генератор, настроенный в резонанс с вибратором излучателя, и убедитесь, что радиационное давление ультразвука действительно существует (рис. 7.2). Интересно, сумеете ли вы в этом опыте по изгибу бумажной полоски оценить величину радиационного давления?

7.2. Ультразвуковые радиометры

Поскольку радиационное давление пропорционально интенсивности, то, измерив его значение, можно определить интенсивность упругой волны. Соответствующие приборы получили название *акустических радиометров*. Рассмотрим простейшие конструкции радиометров, позволяющих оценить интенсивность ультразвука в газах и жидкостях.

7.2.1. Радиационное давление в газе. Модель простейшего радиометра можно построить, положив в ее основу конструкцию крутильных весов. Медную проволоку диаметром 0,8–1 мм изогните, как показано на рис. 7.3, и, натянув между ее концами тонкую медную проволочку диаметром около 0,05 мм, припаяйте ее концы. К середине этой проволоочки припаяйте маленький латунный диск, а к нему подходящим клеем приклейте коромысло из медной проволоки диаметром 0,15–0,2 мм. Коромысло можно приклеить непосредственно к тонкой проволочке быстросохнущим клеем. На одном конце коромысла клеем закрепите крылышко из кальки или тонкого листочка слюды (его можно изготовить, расщепив с помощью лезвия безопасной бритвы более толстый листок). Передвигая по другому плечу коромысла небольшой грузик из медной проволочки, уравновесьте получившиеся крутильные весы.

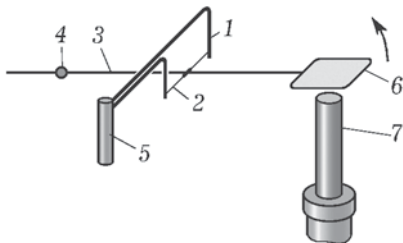


Рис. 7.3. Конструкция ультразвукового радиометра: 1 — изогнутая толстая медная проволока; 2 — натянутая между ее концами тонкая медная нить; 3 — коромысло; 4 — грузик из проволоки; 5 — стойка; 6 — крылышко из кальки; 7 — ферритовый вибратор магнитострикционного излучателя

Измерения можно провести следующим образом. Под крылышко радиометра поставьте магнитострикционный излучатель, вибратор которого имеет длину около 100 мм. Торец вибратора должен отстоять от радиометра на расстояние не более 5 мм. Включите ультразвук и наблюдайте, что коромысло с крылышком сразу отклоняется от вибратора.

На крылышко аккуратно насыпайте легкий сыпучий порошок или помещайте небольшие кусочки алюминиевой фольги, отрезки тонкой медной проволоки и т. д. до тех пор, пока оно не вернется в исходное положение. Далее выключите ультразвук, взвесьте лежащий на крылышке груз и определите силу давления ультразвука на крылышко. Определив площадь торца вибратора, вычислите радиационное давление. Затем по формуле (7.2), зная скорость звука в воздухе, вычислите радиационное давление ультразвука на крылышко. В заключение желательно определить погрешность сделанной оценки радиационного давления.

7.2.2. Исключение влияния ультразвукового ветра. Рассмотренным в предыдущем пункте опытом доказана принципиальная возможность измерения радиационного давления ультра-

звука в газах. Однако, более внимательно анализируя условия опыта, нетрудно заметить, что отклонение крылышка радиометра может обуславливаться и действием ультразвукового ветра.

Чтобы исключить влияние последнего, между вибратором излучателя и радиометром можно ввести тонкую мембрану, препятствующую прохождению потоков воздуха. Такой мембраной может послужить листок папиросной бумаги. Ясно, что поток воздуха — ультразвуковой ветер — через бумагу не пройдет, а на интенсивность доходящей до радиометра ультразвуковой волны столь тонкое препятствие практически не повлияет. Поэтому, если радиометр показывает наличие радиационного давления, а не ультразвукового ветра, его крылышко после введения бумажной мембраны должно опасть лишь незначительно. Это и подтверждает эксперимент, проведенный в соответствии со сделанными рекомендациями.

Все было бы хорошо, если бы акустический ветер образовывался только возле излучателя. Однако он возникает по всему объему среды, где существует ультразвуковая волна. Таким образом, поместив над вибратором тонкую мембрану, вы ослабили влияние ультразвукового ветра, но не исключили его совсем.

Чтобы все же убедиться, что изготовленный прибор реагирует на радиационное давление, а не на что-либо иное, нужно поступить следующим образом. Настроив генератор в резонанс с вибратором, добейтесь отклонения крылышка радиометра и выключите генератор. После того как коромысло радиометра займет исходное положение, включите ультразвук. Крылышко немедленно отклонится. Следовательно, прибор реагирует именно на радиационное давление — ведь на образование акустического ветра необходимо заметное время, в течение которого приходит в движение сравнительно большой объем воздуха.

Тем не менее ясно, что полностью исключить влияние акустического ветра принципиально невозможно, так как он возникает не только возле излучателя, но и во всем объеме среды, через которую проходит упругая волна.

7.2.3. Радиационное давление в жидкости. Радиационное давление ультразвука существует не только в газовых, но и в жидких средах. Чтобы его исследовать, необходимо создать условия для эффективного введения ультразвука в жидкость.

В боковой стенке кюветы из оргстекла или иного прозрачного сосуда сделайте отверстие и пластилином или клеем закрепите в нем стеклянную трубку длиной, несколько меньшей половины длины вибратора. В трубку введите вибратор и закрепите его отрезком резинового шланга, надетом одновременно на конец стеклянной трубки и расположенное посередине вибратора рези-

новое кольцо. Сделать все это нужно для того, чтобы уменьшить потери интенсивности при введении ультразвука в воду (рис. 7.4).

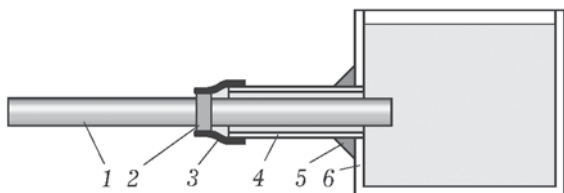


Рис. 7.4. Способ введения ультразвука в жидкость, заполняющую кювету: 1 — ферритовый вибратор; 2 — резиновое колечко, расположенное посередине вибратора; 3 — отрезок резинового шланга; 4 — стеклянная трубка; 5 — замазка или клей; 6 — кювета с жидкостью

Далее изготовьте радиометр, одна из возможных конструкций которого изображена на рис. 7.5. Прежде всего сделайте диск, полностью отражающий ультразвук в жидкость. С этой целью из тонкой латуни вырежьте два круга диаметром около

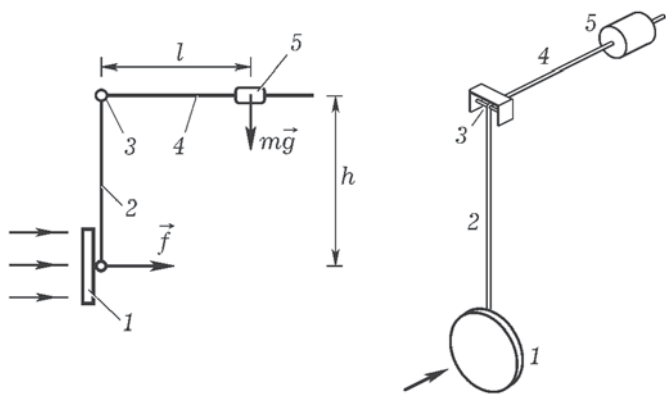


Рис. 7.5. Конструкция радиометра для измерения радиационного давления в жидкости: 1 — полый латунный диск (отражатель); 2 — стержень из медной проволоки; 3 — горизонтальная ось вращения; 4 — рычаг; 5 — грузик

30 мм и спаяйте их по краю так, чтобы между ними осталась воздушная прослойка. Результат будет лучше, если по краю дисков между ними проложить облуженную медную проволоку. Ультразвук практически полностью отражается на границе раздела жидкость–газ, и поэтому можно считать, что коэффициент отражения в жидкости от диска, изготовленного описанным способом, близок к единице.

Из медной проволоки толщиной около 1 мм выгните Г-образный рычаг, к одному из концов которого припаяйте изготовленный отражатель. Из стальной проволоки диаметром при-

мерно 1 мм изготовьте ось, обработав концы отрезка проволоки на конус. В точке сгиба припаяйте рычаг к стальной оси. Из жести или тонкого дюрала выгните П-образную полоску и в ее отогнутых концах шилом сделайте небольшие углубления, которые будут выполнять функцию конусных подшипников. В них вставьте ось с припаянным к ней рычагом, на нижнем конце которого расположен отражатель.

Эксперимент проведите следующим образом. Диск радиометра погрузите в заполняющую кювету воду, на горизонтальное плечо рычага поместите изогнутый из медной проволоки грузик и перемещайте его по плечу до тех пор, пока диск не займет в воде вертикальное положение. Перемещая кювету с магнитострикционным излучателем, добейтесь, чтобы торец вибратора оказался на расстоянии нескольких миллиметров от диска. Включите ультразвуковой генератор и наблюдайте отклонение диска.

Отметив перед началом опыта первоначальное положение диска, передвижением груза по горизонтальному рычагу радиометра верните диск прибора в отмеченное положение при включенном ультразвуке. Измерьте линейкой расстояние l от груза до оси вращения радиометра и h от оси до центра диска (рис. 7.5). Взвешиванием определите массу m груза. Тогда, учитывая, что прибор находится в равновесии, можно записать уравнение

$$fh = mgl, \quad (7.5)$$

где f — сила, действующая на диск со стороны ультразвуковой волны, g — ускорение свободного падения. Поскольку площадь диска диаметром d равна $\pi d^2/4$, отсюда для радиационного давления получаем формулу

$$P_0 = \frac{4f}{\pi d^2} = \frac{4mgl}{\pi d^2 h}. \quad (7.6)$$

Таким образом, интенсивность I ультразвука в жидкости можно вычислить по формуле

$$I = c \frac{P_0}{2} = \frac{2mglc}{\pi d^2 h} \quad (7.7)$$

(мы считаем диск радиометра полностью отражающим так, что, согласно формуле (7.2), $P_0 = 2I/c$).

Подставив в эту формулу экспериментальные данные, вы получите значение интенсивности ультразвука от нескольких десятых до единиц ватта на квадратный сантиметр. Не нужно преувеличивать точность этих измерений, но по порядку величины получаются верные результаты.

7.2.4. Простейший радиометр. На рис. 7.6 приведена фотография эксперимента по измерению радиационного давления, которое ультразвук оказывает на расположенный в воде отра-

жатель. Конструкция использованного в опыте радиометра исключительно проста. Отражатель, спаянный, как описано выше

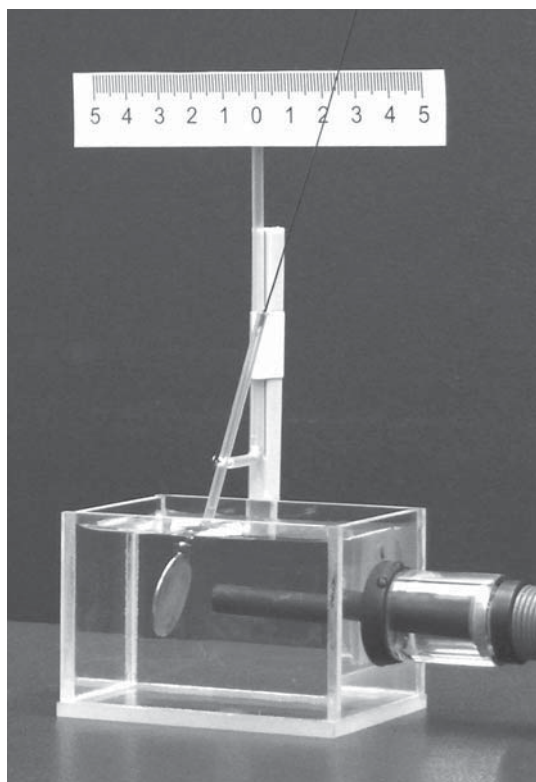


Рис. 7.6. Внешний вид радиометра, позволяющего обнаружить и измерить радиационное давление в жидкости

в п. 7.2.3, из латунной фольги, закреплен на конце полиэтиленового стержня (от шариковой ручки). В стержне проделано отверстие, через которое пропущена канцелярская булавка, выполняющая роль оси вращения. Булавка закреплена на стойке, в качестве которой использован пластмассовый корпус шариковой ручки. На той же стойке сверху расположена миллиметровая шкала. Указатель представляет собой медную проволоку, вставленную в полиэтиленовый стержень, на нижнем конце которого закреплен отражатель.

Представим, что радиометр расположен не в воде, а в воздухе. Тогда допустимо считать, что на подвижную систему прибора (рис. 7.7) действуют только две силы: сила радиационного давления f и сила тяжести mg . Стержень окажется в равновесии,

если сумма моментов этих сил относительно оси вращения равна нулю:

$$f \cos \alpha \cdot b - mg \sin \alpha \cdot a = 0.$$

Отсюда

$$f = mg \frac{a}{b} \operatorname{tg} \alpha.$$

Но $\operatorname{tg} \alpha = x/c$, следовательно,

$$f = \frac{a}{bc} mg \cdot x. \quad (7.8)$$

Значит, сила радиационного давления f , действующая на отражатель, может быть измерена по величине отрезка x , отсекаемого по шкале радиометра указателем.

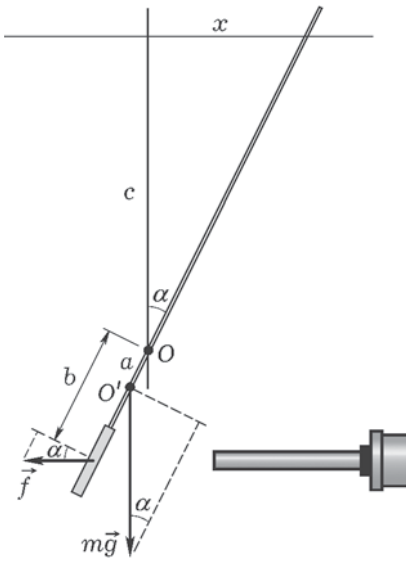
Если отражатель радиометра находится не в воздухе, а в жидкости, то помимо действующей на него силы тяжести придется учесть силу Архимеда. Предоставляем вам возможность сделать это самостоятельно.

Рис. 7.7. К объяснению принципа действия ультразвукового радиометра, показанного на рис. 7.6

Рекомендуем использовать описанный радиометр для количественной оценки радиационного давления ультразвука в воздухе и воде. В первом случае чувствительность прибора должна быть достаточно большой, что достигается уменьшением расстояния между осью вращения и центром масс подвижной системы. Во втором случае, чтобы отражатель не всплывал, придется несколько увеличить его массу, уменьшив чувствительность радиометра.

7.2.5. Радиационное давление в трубке. Если в жидкость над вибратором неработающего ультразвукового излучателя опустить стеклянную трубку, то уровень жидкости в трубке будет выше, чем вне ее. Эффект капиллярного поднятия жидкости хорошо известен из школьного курса физики и объясняется действием сил поверхностного натяжения.

Если теперь включить ультразвук, то столбик жидкости в трубке станет еще выше. Это явление нетрудно объяснить: ультразвуковая волна, практически полностью отражаясь от границы жидкость–воздух, оказывает радиационное давление на поверхность жидкости в стеклянной трубке. Поскольку сила давления направлена в сторону, противоположную направлению силы тяжести, жидкость поднимается по трубке.



Если уровень жидкости в трубке при включении ультразвука изменился на высоту h (рис. 7.8), то радиационное давление, очевидно, равно

$$P_0 = \rho gh,$$

где ρ — плотность жидкости, а g — ускорение свободного падения. По известному радиационному давлению, пользуясь формулой (7.2), можно вычислить интенсивность ультразвука

$$I = \frac{c}{2} P_0 = \frac{1}{2} \rho ghc. \quad (7.9)$$

Таким образом, с помощью стеклянной трубки можно оценить интенсивность ультразвука в жидкости. Полученные в подобных экспериментах значения в пределах ошибок опытов совпадают с теми, которые дают радиометры.

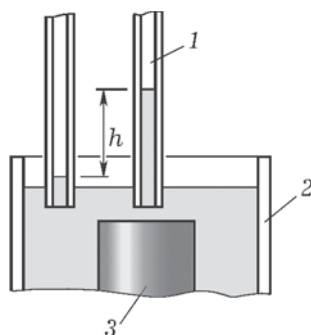


Рис. 7.8. К измерению радиационного давления с помощью стеклянной трубки: 1 — трубка; 2 — сосуд с жидкостью; 3 — конец ферритового вибратора магнитострикционного излучателя

7.3. Ультразвуковой фонтан

Радиационное давление ультразвука ответственно за впечатляющий акустический эффект второго порядка: ультразвуковой фонтан на границе раздела двух жидкостей или жидкости и газа.

7.3.1. Ультразвуковой фонтан.

Наблюдать ультразвуковой фонтан в чистой воде на тех частотах и с теми интенсивностями ультразвука, с которыми мы имеем дело (без дополнительных средств, о которых речь пойдет ниже), довольно трудно, но обнаружить обусловленное радиационным давлением вспучивание поверхности жидкости вполне можно.

С этой целью нужно использовать сосуд с жидкостью, в который снизу введен вибратор магнитострикционного излучателя так, что его рабочий торец оказывается вблизи поверхности жидкости. В качестве тако-

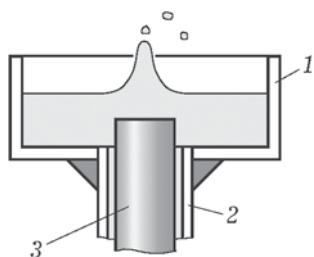


Рис. 7.9. Ультразвуковой фонтанчик на поверхности жидкости: 1 — баночка; 2 — стеклянная трубка; 3 — конец ферритового вибратора магнитострикционного излучателя

го сосуда годится небольшая баночка, укрепленная на вибраторе с помощью стеклянной трубки и отрезка резинового шланга (рис. 7.9), как описано ниже (см. п. 9.1.2). В баночку налейте

немного воды так, чтобы торец вибратора находился на глубине 1–2 мм под поверхностью жидкости. Включите ультразвук максимальной интенсивности. Тогда вода над вибратором вспучивается, образуя хорошо заметный бугорок.

В опыте вместо воды лучше использовать спирт. При тщательной отладке установки, нетрудно получить фонтанчик высотой до 1 см, из которого будут вылетать небольшие капли спирта (рис. 7.9).

7.3.2. Гигантский ультразвуковой фонтан на низкой частоте. Появление ультразвукового фонтана объясняется радиационным давлением волны, падающей на поверхность жидкости снизу. Вспучиванию и фонтанированию жидкости препятствуют сила тяжести и силы поверхностного натяжения жидкости. Поскольку на поверхности Земли силу тяжести уменьшить не удастся, то для получения более высокого фонтана нужно попробовать уменьшить поверхностное натяжение воды. Значительное снижение коэффициента поверхностного натяжения достигается применением современных моющих средств. При этом возникает фонтан, бьющий на высоту до 30–40 см! Фотография этого удивительного явления нелинейной акустики приведена на рис. 7.10; она позволяет уточнить условия эксперимента.



Рис. 7.10. Ультразвуковой фонтан высотой несколько сантиметров, полученный при частоте упругой волны 18 кГц

В сосуде с водой размещайте моющий состав «Faigu» в соотношении один к трем. Вибратор магнитострикционного излучателя за середину закрепите в дне прозрачного сосуда, изготовленного из подходящей пластиковой бутылки. Магнитострикционный излучатель с указанным вибратором расположите на столе

вертикально и в сосуд налейте приготовленный заранее состав так, чтобы поверхность жидкости оказалась на высоте не более 5 мм от торца излучателя. Обмотку возбуждения подключите к мощному ультразвуковому генератору (см. § 4.2) и настройте его в резонанс с вибратором.

7.3.3. Отражение и прохождение волны на границе раздела сред. Вы поставили опыты, в которых ультразвуковой фонтан бьет снизу вверх из жидкости в воздух. Но ультразвук оказывает радиационное давление не только на свободную поверхность жидкости, но и на любую границу раздела двух акустически разных сред. Рассмотрим явления, происходящие на такой границе при нормальном падении на нее упругой волны.

Смещения частиц, непосредственно примыкающих к границе раздела двух сред и принадлежащих разным средам, очевидно, должны быть одинаковы. Но в одной среде смещения частиц обусловлены падающей и отраженной волнами, а в другой — только проходящей волной (рис. 7.11). Поэтому для амплитуд этих трех волн на границе раздела сред можно записать

$$a + a_1 = a_2, \quad (7.10)$$

где a , a_1 и a_2 — амплитуды падающей, отраженной и проходящей волн соответственно. Согласно закону сохранения энергии интенсивность падающей волны равна сумме интенсивностей отраженной и проходящей волн:

$$I = I_1 + I_2. \quad (7.11)$$

Так как $I = a^2 \omega^2 \rho c / 2$ (см. п. 2.2.5), то предыдущее равенство можно переписать в виде

$$(a^2 - a_1^2) \rho_1 c_1 = a_2^2 \rho_2 c_2. \quad (7.12)$$

Решая систему уравнений (7.10) и (7.12), получаем

$$a_1 = a \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad \text{и} \quad a_2 = a \frac{2 \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}. \quad (7.13)$$

Таким образом, при нормальном падении на плоскую границу раздела двух сред в общем случае упругая волна частично отражается от этой границы и частично проходит сквозь нее. При этом амплитуды отраженной a_1 и проходящей a_2 волн определяются соотношением между акустическими сопротивлениями $\rho_1 c_1$ и $\rho_2 c_2$ граничащих сред.

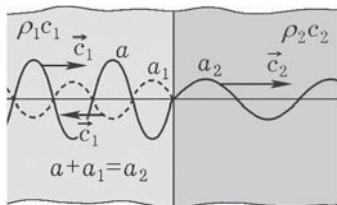


Рис. 7.11. К рассмотрению явлений, возникающих на границе раздела двух сред

Проанализируем формулу для амплитуды отраженной волны. Если акустическое сопротивление среды, из которой падает ультразвук, больше акустического сопротивления среды, в которую переходит ультразвук, то есть $\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$, то амплитуда отраженной волны имеет тот же знак, что и амплитуда падающей $a_1 > 0$. Если же $\rho_1 c_1 < \rho_2 c_2$, то $a_1 < 0$. Отрицательная амплитуда не имеет физического смысла. Знак минус перед амплитудой в уравнении волны означает, что фаза волны изменилась на π :

$$-a \sin(\omega t - kx) = a \sin[(\omega t - kx) + \pi].$$

Таким образом, фаза ультразвуковой волны меняется на π (происходит «*потеря полуволны*»), если ультразвук отражается от среды с большим акустическим сопротивлением. Отражение от среды с меньшим акустическим сопротивлением не приводит к изменению фазы отраженной волны.

Знаки амплитуд проходящей и падающей волн совпадают, поэтому фаза проходящей волны совпадает с фазой падающей (вспомните опыты с волнами на пружине, описанные в п. 2.1.2!). Наконец, как показывают формулы (7.13), на границе раздела двух сред с одинаковыми акустическими сопротивлениями вообще не происходит отражения, и ультразвук полностью переходит из одной среды в другую.

Из формул (7.13) нетрудно получить выражения для *коэффициентов отражения и пропускания* при нормальном падении ультразвука на границу раздела сред,

$$R = \frac{I_1}{I} = \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2, \quad D = \frac{I_2}{I} = \frac{4\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2}. \quad (7.14)$$

Обратите внимание, что выражение для коэффициента пропускания нельзя получить простым возведением в квадрат отношения амплитуд проходящей и падающей волн, поскольку волны распространяются в средах с разными акустическими сопротивлениями.

В качестве примера вычислим коэффициенты отражения при переходе упругой волны из феррита в воду и из феррита в воздух. Акустические сопротивления феррита и воды соответственно равны $\rho_1 c_1 = 30,24 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ и $\rho_2' c_2' = 1,5 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$. Тогда согласно формуле (7.14) коэффициент отражения на границе феррит–вода $R = 0,82$. Акустическое сопротивление воздуха $\rho_2'' c_2'' = 440 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, поэтому для границы феррит–воздух коэффициент отражения отличается от 1 лишь на $4,5 \cdot 10^{-5}$.

7.3.4. Ультразвуковой фонтан на границе раздела жидкостей. Оценим величину радиационного давления на границу раздела двух сред. Для этого воспользуемся выражением (7.1) для радиационного давления на поглощающее препятствие. Оно

позволит нам уяснить суть дела и получить верный окончательный результат. В справедливости найденного результата мы сможем убедиться, поставив соответствующие опыты.

На рис. 7.12 схематически показаны направления падающей, отраженной и проходящей через плоскую границу раздела сред упругих волн. Интенсивности этих волн соответственно равны I , $I_1 = RI$ и $I_2 = (1 - R)I$, где R — коэффициент отражения. Будем считать давление, оказываемое на границу раздела сред падающей и отраженной волнами, положительным, а проходящей волной — отрицательным. Тогда результирующее давление, оказываемое тремя волнами на границу раздела сред,

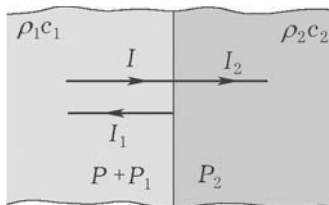


Рис. 7.12. Часть падающей на границу раздела двух сред волны проходит, часть отражается

$$P_{12} = P + P_1 - P_2 = \frac{I}{c_1} + \frac{I_1}{c_1} - \frac{I_2}{c_2}.$$

Подставляя сюда выражения для интенсивностей отраженной $I_1 = RI$ и проходящей $I_2 = (1 - R)I$ волн, получаем

$$P_{12} = \frac{I}{c_1} + R \frac{I}{c_1} - (1 - R) \frac{I}{c_2} = \left[1 - \frac{c_1}{c_2} + R \left(1 + \frac{c_1}{c_2} \right) \right] \frac{I}{c}. \quad (7.15)$$

Таким образом, радиационное давление на границу раздела двух сред определяется коэффициентом отражения волны на границе и отношением скоростей распространения волны в этих средах.

7.3.5. Ультразвуковой фонтан «наоборот». Полученная в предыдущем пункте формула для радиационного давления почти так же красива, как и те физические явления, которые она описывает. Знак минус перед отношением скоростей c_1/c_2 показывает, что в некоторых условиях радиационное давление может быть отрицательным. Физически это означает (вернемся к исходным посылкам приведенного вывода), что радиационное давление может быть направлено навстречу падающему на границу раздела двух сред ультразвуковому пучку!

Это утверждение, бесспорно, нуждается в экспериментальной проверке. Понятно, что для ее проведения необходимо подобрать подходящие жидкости. Плотности керосина и спирта, например, соответственно равны $\rho_1 = 800 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_2 = 790 \text{ кг/м}^3$, то есть почти одинаковы. Однако если в одном сосуде слить спирт и керосин, то спирт почти всегда окажется снизу, а керосин — сверху. Это говорит о том, что плотность спирта, который весьма гигроскопичен и хорошо растворяет воду, как правило, несколько

больше плотности керосина. Но вот скорость звука в керосине $c_1 = 1295$ м/с заметно больше, чем скорость звука в спирте $c_2 = 1280$ м/с. Поэтому расчет согласно формуле (7.15) показывает, что на границе раздела керосин–спирт радиационное давление отрицательно, то есть направлено против направления распространения ультразвуковой волны.

В небольшой стакан налейте спирт так, чтобы образовался слой толщиной 2–3 см, и поверх него залейте примерно столько же керосина. Магнитострикционный излучатель ультразвука низкой частоты расположите вертикально и конец его вибратора погрузите в керосин. Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором излучателя. Как только вы услышите громкий кавитационный шум, ультразвук выключите, отсоединив генератор от источника питания. Приблизьте конец вибратора к границе раздела жидкостей керосин–спирт на расстояние 2–5 мм и включите ультразвук. Вы увидите, что эта граница вспучивается, с нее отрываются мельчайшие капельки спирта и устремляются к вибратору излучателя. Отсюда следует, что на границе керосин–спирт радиационное давление направлено вверх, то есть к излучателю или навстречу падающей на эту границу упругой волне.

Сразу же выключите генератор и, выждав когда граница раздела жидкостей успокоится, вновь включите и выключите ультразвук. Тогда каждый раз при кратковременном падении ультразвуковой волны на границу раздела сред керосин–спирт вы будете наблюдать хорошо заметное вспучивание этой границы и отрыв от нее капелек спирта навстречу падающей волне. Если вибратор излучает ультразвук достаточно длительное время, превышающее несколько секунд, то успевает сформироваться акустический ветер, который направлен от излучателя и сильно прогибает границу между керосином и спиртом вниз. На фоне такого мощного течения сравнительно слабое радиационное давление полностью теряется.

7.3.6. Ультразвуковые фонтаны на высоких частотах.

Описанные в предыдущем пункте опыты требуют немалого терпения и развитой наблюдательности. Дело в том, что на низкой ультразвуковой частоте в жидкости возникает мощный акустический ветер, а радиационное давление сравнительно невелико. Кроме того, осложняющим фактором является ультразвуковая кавитация. Поэтому если в подобных опытах вы смогли уверенно обнаружить отрицательное радиационное давление, то вполне можете считать себя настоящим экспериментатором.

Экспериментальное исследование радиационного давления значительно облегчится, если существенно повысить интенсивность используемого ультразвука. Поскольку при прочих рав-

ных условиях энергия упругой волны пропорциональна квадрату ее частоты, а интенсивность волны обратно пропорциональна площади поверхности, через которую переносится эта энергия, то для решения проблемы достаточно использовать ультразвук высокой частоты и сконцентрировать его энергию на небольшой площади. Для этого возможно применение источников ультразвука частотой 1–5 МГц. Это могут быть как магнитострикционные, так и пьезоэлектрические излучатели. Для того, чтобы сконцентрировать их энергию на небольшой площади, можно применить собирающую линзу. Удобным материалом для ультразвуковой линзы является оргстекло. Поскольку скорость звука в оргстекле $c = 2700$ м/с больше, чем в любой из доступных жидкостей, то собирающей для ультразвука будет, например, плосковыпуклая линза.

На рис. 7.13 приведена фотография ультразвукового фонтана, бьющего из воды в воздух. Источником ультразвука является магнитострикционный излучатель, обеспечивающий возбуждение плоского ферритового вибратора толщиной 3 мм на его основной собственной частоте, которая равна примерно 1 МГц. На поверхность вибратора нанесена капля трансформаторного масла и в нее поставлена плосковыпуклая линза из оргстекла, которая является дном прямоугольной кюветы. В кювету налита вода так, что ее поверхность совпадает с фокальной плоскостью линзы.



Рис. 7.13. Ультразвуковой фонтан на высокой частоте

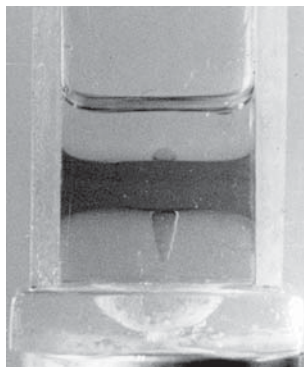


Рис. 7.14. Ультразвуковые фонтаны на границах раздела различных сред

При включении генератора сфокусированная линзой ультразвуковая волна вызывает образование фонтана высотой в десятки сантиметров.

На рис. 7.14 представлена фотография ультразвуковых фонтанов, возникающих сразу на трех границах раздела упругих сред. Для получения ультразвука использовался пьезоэлектрич-

ческий излучатель, вибратор которого возбуждался на частотах 1 и 3 МГц. В кювету последовательно налиты трансформаторное масло, слегка подкрашенный спирт и керосин. Толщины слоев этих жидкостей подобраны так, чтобы область фокусировки ультразвуковой волны оказалась в центре среднего слоя. При включении ультразвукового генератора и настройке его в резонанс с пьезоэлектрическим вибратором одновременно возникают три фонтана: из спирта в масло (радиационное давление отрицательно), из спирта в керосин и из керосина в воздух (радиационные давления положительны). Заметим, что в опытах с ультразвуком высокой частоты влияние ультразвукового ветра и кавитационных процессов настолько мало, что практически не обнаруживается.

Описанные в этой книге приборы не позволяют пронаблюдать замечательные явления радиационного давления ультразвука на границы раздела различных сред. Но что мешает вам, освоив ультразвук низкого и среднего частотных диапазонов, перейти к исследованиям, в которых необходим ультразвук высокой частоты? Отсутствие приборов? Так разработайте и сделайте их!

Что касается жидкостей, необходимых для наблюдения этих интересных явлений, то для их подбора удобно несколько преобразовать формулу (7.15). Из нее следует, что радиационное давление на границу раздела двух жидкостей вообще отсутствует, если

$$\frac{c_1}{c_2} = 1 + R \left(1 + \frac{c_1}{c_2} \right).$$

Раскрывая скобки, имеем

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{1 + R}{1 - R}.$$

Вспоминая формулу для коэффициента отражения (7.14) и правила алгебраических преобразований, после небольших усилий из этого равенства получаем

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\rho_2}{\sqrt{\rho_1(2\rho_2 - \rho_1)}} = z. \quad (7.16)$$

Итак, если отношение скоростей ультразвука, идущего из первой среды во вторую, удовлетворяет неравенству $c_1/c_2 > z$, то радиационное давление отрицательно и направлено навстречу падающей волне, то есть из второй среды в первую. Если, напротив, отношение скоростей звука $c_1/c_2 < z$, то радиационное давление положительно и направлено по направлению распространения падающей волны, то есть из первой среды во вторую.

Глава 8

СТОЯЧАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНА В ВОЗДУХЕ

Две когерентные волны, распространяющиеся навстречу друг другу, в области наложения интерферируют. В результате получается устойчивое в пространстве и во времени распределение интенсивности волны. Нетрудно сообразить, что расстояния между соседними максимумами и минимумами интенсивности этого распределения одинаковы и равны половине длины волны. Если интерферируют гармонические волны, то распределение интенсивности является гармонической функцией координаты. Оно похоже на бегущую волну, но в отличие от нее не зависит от времени, напоминая застывшую волну или моментальную фотографию бегущей волны. Именно поэтому результат интерференции двух распространяющихся навстречу друг другу когерентных волн называют *стоячей волной*.

8.1. Метод Кундта визуализации стоячей волны

Исследование стоячей ультразвуковой волны в воздухе начнем методом визуализации ее посредством легкого сыпучего порошка. Вначале, конечно, нужно исследовать сам метод, чтобы затем его уверенно использовать в экспериментах.

8.1.1. Опыты Кундта. Еще в XIX веке немецкий физик А. Кундт поставил первые опыты со стоячей звуковой волной в газах. Вот как описывает опыты Кундта Рэлей.

«Экспериментальное исследование воздушных волн в трубах было выполнено со значительным успехом Кундтом. Получать волны довольно легко; не так легко, однако, изобрести метод, с помощью которого можно было бы их соответствующим образом исследовать. Кундт открыл, что узлы стоячих волн можно сделать видимыми при помощи пыли. Небольшое количество мелкого песка или семян ликоподия, насыпанное внутри стеклянной трубы, заключающей колеблющийся столб воздуха, располагается в виде периодически повторяющихся сгущений, по которым легко определить положения узлов и измерить интервалы между ними. В экспериментах Кундта звук возникал в результате продольных колебаний стеклянной трубы, носившей название звучащей трубы, а пыльные фигуры образовывались во второй, более широкой, трубе, носившей название волновой трубы; последняя была снабжена



КУНДТ Август Адольф (1839–1894). Немецкий физик-экспериментатор. Основные исследования посвящены акустике, оптике, металлооптике, молекулярной физике. Разработал метод измерения скорости звука в твердых телах и газах при помощи так называемых «кундтовых фигур», выполнил исследования аномальной дисперсии света, ставшие классическими, дал экспериментальное подтверждение ряду основных положений кинетической теории газов. Открыл «явление Кундта» в электрооптике, разработал метод определения показателя преломления

света в металлах. Изучал также внутреннее трение и теплопроводность газов, двойное лучепреломление в жидкостях, пьезо- и пьезоэлектрические свойства кристаллов.

подвижной пробкой, позволявшей изменять ее длину. Другой конец волновой трубы был закрыт пробкой, через которую проходила на половину своей длины звучащая труба. Посредством трения звучащую трубу заставляли колебаться с частотой самого низкого ее тона, так что центральная ее точка была узловой, а ее внутренний конец (закрытый пробкой) возбуждал воздушные колебания в волновой трубе. С помощью пробки длину столба воздуха можно было подобрать так, чтобы сделать колебания возможно более сильными, что происходит тогда, когда расстояние между пробкой и концом звучащей трубы кратно половине длины волны звука.¹⁾

Попробуйте по приведенному описанию воспроизвести экспериментальную установку Кундта. Конечно, в наши дни, если нет особой необходимости, вместо «звучащей трубы» лучше использовать динамик, подключенный к звуковому генератору. «Волновую трубу» можно взять длиной около полуметра и диаметром 20–40 мм. В качестве сыпучего порошка подойдут сухие опилки пробки. Их более или менее равномерно насыпьте на дно горизонтально расположенной стеклянной трубы, в одно из отверстий трубы вставьте, например, деревянный отражатель, возле второго отверстия расположите динамик, подключите его к генератору, выберите частоту звука, и вы увидите прекрасную стоячую звуковую волну!

Стоячую ультразвуковую волну визуализировать лучше не пробковыми опилками, а более тонким порошком, частицы которого имеют одинаковые размеры. Мы, вслед за Кундтом, рекомендуем использовать в опытах *ликоподий*, который представляет собой споры плауна сплюсненного (или плауна булавовидного). Плаун сплюсненный — папоротник, растущий на возвышенностях вблизи болота. Это разветвленное растение ярко-зеленого красивого цвета высотой 15–20 см, споры находятся в колосках

¹⁾ *Стретт Дж.В. (Лорд Рэлей) Теория звука. Т. 2. — М.: Гостехиздат, 1955. 476 с. (с. 64).*

длиной 3–4 см. Цветет в июле–августе, что обнаруживается по образованию облачка из спор при соприкосновении с растением. Обычно растения сосредоточены в большом количестве вокруг сосен. Собрать споры можно, стряхивая их в сухую банку объемом 0,5–1,0 л с широким горлышком. Успешное применение ликоподия для визуализации стоячей ультразвуковой волны возможно благодаря малому размеру частиц, имеющих диаметр около 30 мкм, и их сыпучести.

8.1.2. Действие ультразвука на легкий сыпучий порошок. Исследуйте действие распространяющейся в воздухе ультразвуковой волны на ликоподий.

Для этого тонким слоем насыпьте ликоподий на чистую сухую стеклянную или пластмассовую пластинку. Магнито-стрикционный излучатель низкой частоты поднесите к пластинке под небольшим углом и настройте генератор в резонанс с вибратором. Вблизи торца вибратора вы увидите бурные завихрения ликоподия. Разверните излучатель вертикально так, чтобы его торец находился на расстоянии нескольких миллиметров от пластинки: под торцом вибратора образуется облачко ликоподия.

Расположив излучатель почти горизонтально, поместите на пути ультразвуковой волны какое-нибудь отражающее препятствие, например, плоскую пластинку, — между вибратором и отражателем появляются поперечные тонкие пленки.

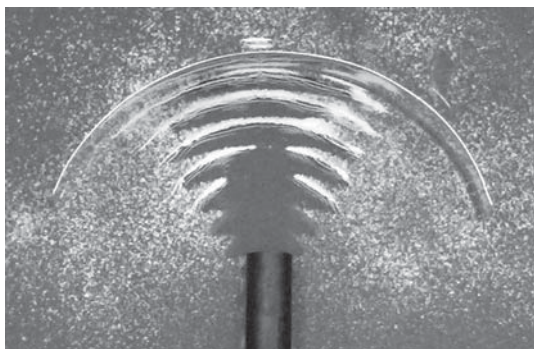


Рис. 8.1. Стоячая ультразвуковая волна в воздухе между торцом ферритового вибратора магнито-стрикционного излучателя и вогнутым цилиндрическим отражателем

Воспользовавшись излучателем, вибратор которого имеет длину 6–8 см, убедитесь, что ультразвуковой ветер, создаваемый им, интенсивно сдувает частицы ликоподия, находящиеся на пластинке перед вибратором.

Из тонкого дюрала или латуни вырежьте полоску шириной 2–3 см и длиной 10–12 см. Изогните полоску по дуге окружно-

сти. На чистую сухую стеклянную пластинку равномерно тонким слоем насыпьте лycopодий и положите на нее магнитострикционный излучатель с ферритовым вибратором длиной 6–8 см. Рабочий торец вибратора должен почти касаться пластинки, находясь от нее на высоте, не превышающей 1 мм. Перед торцом вибратора на расстоянии нескольких сантиметров от него поставьте изогнутую по дуге окружности металлическую полосу. Включите ультразвуковой генератор и настройте его в резонанс с вибратором. Поступательно перемещайте полосу так, чтобы изменялось расстояние от нее до вибратора. Вы обнаружите удивительные по красоте явления (рис. 8.1)!

При определенных положениях металлической полосы между ней и вибратором устанавливается стоячая ультразвуковая волна. Главной особенностью этой волны является то, что она не плоская, а почти точно цилиндрическая. Пожалуй, впервые вы воочию видите, какую именно волну испускает в воздух ферритовый вибратор магнитострикционного излучателя. Кроме того, вы заметите, что лycopодий не только собирается в плотные области, находящиеся друг от друга на равных расстояниях, но и образует вблизи них тонкие слои, похожие на мелкие морщинки. При перемещениях и поворотах отражателя все эти и другие явления можно наблюдать в динамике. Вы чувствуете — здесь большой простор для самостоятельных исследований!

8.1.3. Визуализация стоячей ультразвуковой волны методом Кундта. Подберите стеклянную трубку длиной 100–150 мм и внутренним диаметром 8–9 мм (лучше всего использовать для опытов такую трубку, в которую ферритовый вибратор входит с минимальным зазором). На концы трубки наденьте резиновые колечки так, чтобы их можно было зажать в лапках штатива или посредством металлических обжимок закрепить на подходящем основании.

Фотография одного из возможных вариантов экспериментальной установки приведена на рис. 8.2. Магнитострикционный излучатель лежит на сделанном из дюралевого швеллера основании, конструкция которого такова, что позволяет несколько поднимать и отпускать конец ферритового вибратора. Стеклянная трубка закреплена на другом основании, изготовленном также из дюралевого швеллера. Это позволяет без труда заполнять трубку лycopодием, вводить в один из ее концов вибратор, а в другой — отражатель, и по окончании опыта чистить трубку.

В трубку равномерным тонким слоем насыпьте легкий сыпучий порошок (лycopодий). Сделать это удобно, пользуясь латунным или плотным бумажным желобком, который вместе с насыпанным на него порошком введите в трубку, а затем переверните

и удалите из нее. В один конец трубки вставьте торец вибратора магнитострикционного излучателя, а в другой — отражатель, в качестве которого можно использовать небольшой обломок ферритового стержня. Магнитострикционный излучатель удобно тоже закрепить в штативе так, чтобы вибратор располагался по оси трубки.

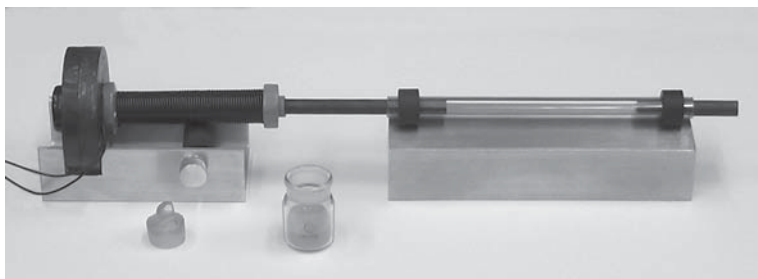


Рис. 8.2. Экспериментальная установка для наблюдения стоячей ультразвуковой волны в трубке Кундта

Подключите излучатель к ультразвуковому генератору и произведите настройку прибора в резонанс с вибратором излучателя. Осторожно перемещая отражатель по трубке, вы обнаружите, что при определенных его положениях в трубке устанавливается стоячая волна: порошок собирается в узлах этой волны, отстоящих друг от друга на одинаковые расстояния (рис. 8.3).

Обратите внимание, что возле торца отражателя всегда собирается порошок, значит, в плоскости отражателя расположен узел смещений стоячей ультразвуковой волны. Что касается торца вибратора магнитострикционного излучателя, то возле него может собираться порошок, а может его и не быть. Следовательно, торец вибратора, возбуждающего в трубке Кундта стоячую ультразвуковую волну, может находиться как вблизи узла, так и возле пучности смещений этой волны.

8.1.4. Распределение порошка в стоячей волне. Помимо кучек порошка в узлах, в опыте заметны тонкие пленки, причем пленки наибольшей высоты расположены в пучностях смещений стоячей волны (рис. 8.3). Попробуем объяснить наблюдаемую тонкую структуру.

Вспомните о пондеромоторных силах, действующих в ультразвуковом поле на две расположенные рядом сферические частицы (см. § 6.5). Эти силы стремятся сблизить частицы, если отрезок, соединяющий их центры, ориентирован перпендикулярно к направлению распространения волны, и удалить их друг от друга, если частицы расположены вдоль направления распро-

странения ультразвука. Совокупность таких сил, действующих на многие частицы порошка, приводит, как нетрудно сообразить, к образованию тонких пылевых слоев, ориентированных поперек трубки.

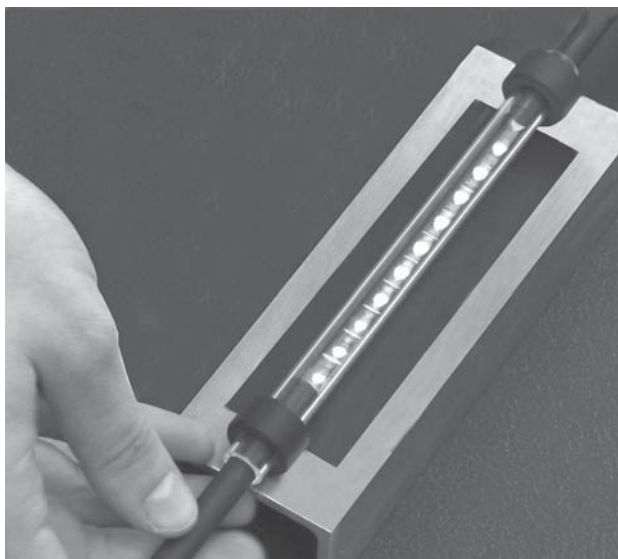


Рис. 8.3. Стоячая ультразвуковая волна в трубке Кундта: справа в трубку введен излучатель, слева — отражатель; в пучностях смещений стоячей волны образуются пылевые пленки; ближайшая к отражателю пучность отстоит от него на четверть длины волны ультразвука в воздухе

Возникновение самих сил обусловлено обтеканием частиц переменным потоком воздуха (рис. 6.11 б, в). Но этот поток имеет максимальную скорость в пучностях смещений, а в узлах стоячей волны воздух практически неподвижен. Поэтому пленки в узлах и не образуются, а в пучностях они имеют максимальную высоту. Если вы достаточно тщательно подберете внутренний диаметр трубки Кундта по диаметру вибратора, то сумеете получить в пучностях стоячей волны пленки, почти полностью, перекрывающие трубку! Исследованное вами явление наблюдается только при значительных интенсивностях звуковой волны, и поэтому его относят к нелинейным эффектам.

В опытах с трубкой Кундта ферритовый вибратор магнито-стрикционного излучателя «нагружен на воздух». В таких условиях, как вы знаете, добротность вибратора велика, поэтому при резонансе амплитуда его колебаний настолько значительна, что феррит не выдерживает сколько-нибудь длительных механических напряжений (см. п. 5.2.3). Значит, эксперименты со стоячей

волной в трубке Кундта нужно тщательно готовить и быстро проводить, пока вибратор терпит предельно допустимые для него нагрузки.

8.1.5. Модулированная стоячая волна в трубке Кундта.

Для выполнения следующего опыта лучше использовать стеклянную трубку внутренним диаметром, лишь незначительно превышающим внешний диаметр вибратора. Ультразвуковой генератор подключите к выпрямителю без фильтра. Как правило, это двухполупериодный выпрямитель, поэтому он дает постоянное по направлению, но периодически изменяющееся по величине пульсирующее напряжение частотой 100 Гц. Таким источником является, например, школьный выпрямитель типа В-24. Установите напряжение питания генератора 10 В и, поместив на торец вибратора лезвие, настройте генератор в резонанс с вибратором. Вы заметите, что, во-первых, лезвие дребезжит не так интенсивно, как при постоянном стабилизированном напряжении питания генератора, во-вторых, в дребезге присутствуют низкочастотные вибрации, которые хорошо различимы на слух.

Повторите опыт по образованию пылевых фигур Кундта в стеклянной трубке, пользуясь магнитострикционным излучателем, подключенным к генератору, источник питания которого дает пульсирующее напряжение. Вы увидите, что порошок в трубке перераспределится, обозначив стоячую ультразвуковую волну примерно так, как это изображено на рис. 8.4.

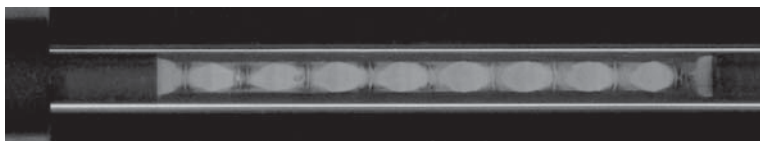


Рис. 8.4. Пылевые фигуры Кундта при использовании модулированной ультразвуковой волны

Результат опыта сильно отличается от тех, которые получались раньше (рис. 8.3). Пронаблюдайте за тонкими пленками: они очень быстро колеблются и имеют небольшую высоту. Объясняется это, очевидно, тем, что ультразвуковой генератор дает не непрерывные, а модулированные по амплитуде колебания, которые, грубо говоря, 100 раз в секунду появляются и исчезают. Пленки из порошка в пучностях смещений стоячей волны просто не успевают вырасти и установиться за время непрерывной работы генератора. Поэтому распределение порошка в трубке Кундта усредняется так, что получается как бы «график» стоячей волны в трубке.

Отсюда, в частности, следует, что для образования тонких пылевых слоев, поднимающихся вверх от лежащего в трубке порошка, необходима гармоническая стоячая ультразвуковая волна, сохраняющая неизменной свою интенсивность достаточно длительное время.

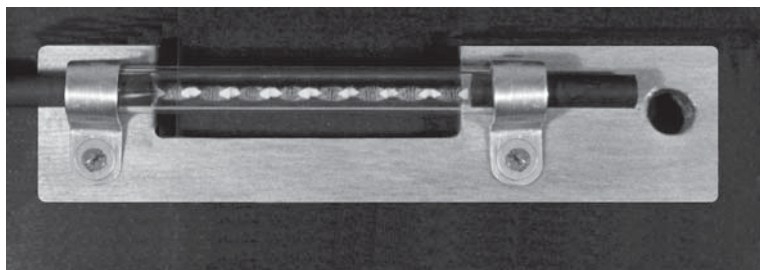


Рис. 8.5. Возможная конструкция прибора, позволяющая спроецировать трубку на экран

Опыт Кундта можно поставить в демонстрационном варианте. Для этого трубку, закрепленную в специальном держателе (рис. 8.5), лапках штатива или прикрепленную к прозрачной линейке из оргстекла, проецируют с помощью кодоскопа или проекционного аппарата на экран. Разумеется, вместо кодоскопа можно использовать телевизионную или компьютерную технику.

8.2. Измерение скорости звука в воздухе и в газах

Понятно, что для определения скорости звука методом стоячей волны нужно в опыте измерить частоту и длину ультразвуковой волны. Будем считать, что частоту волны можно определить либо по показаниям отградуированного по частоте электронного генератора, либо специальным частотомером (см. п. 5.3.2). Тогда задача сводится лишь к измерению длины волны.

8.2.1. Измерение скорости ультразвука. Экспериментально определите скорость звука в воздухе. Для этого линейкой (рис. 8.6) измерьте расстояние между 10–15 узлами и, разделив его на число промежутков между узлами, определите значение половины длины волны звука в воздухе. Если у вас под рукой есть штангенциркуль, то вы можете получить более точные результаты, измеряя расстояние не между узлами, а между пучностями стоячей волны, обозначенными тонкими пленками. Далее, зная частоту ультразвукового генератора (а если она вам неизвестна, ее всегда можно найти, измерив длину ферритового вибратора), по формуле $c = \lambda \nu$ вычислите скорость звука в воздухе. Обычно в этом опыте получаются значения скорости, близкие к 340 м/с.

Нужно отчетливо понимать, какую именно скорость и какой именно волны вы определили. Поскольку в опыте измерялась длина волны по интерференционному распределению интенсивности, а результат интерференции зависит от разности фаз накладываются волн, то методом стоячей волны определялась

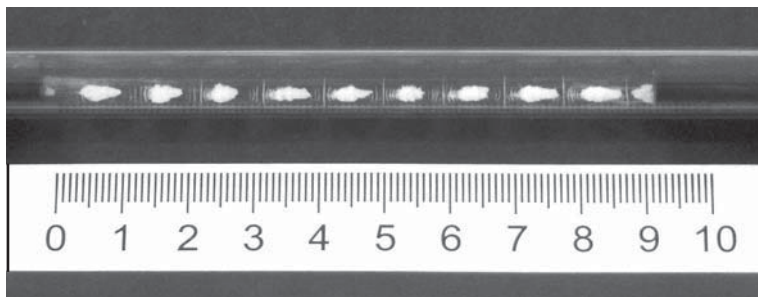


Рис. 8.6. Эксперимент по определению скорости ультразвука в воздухе

фазовая скорость волны. Так как в газах от колеблющегося вибратора могут распространяться только продольные волны, то в эксперименте и была определена фазовая скорость продольной звуковой волны в воздухе.

8.2.2. Исследование зависимости скорости звука от частоты. В воздухе звуки разных частот распространяются с одной и той же скоростью. Этот экспериментальный факт знаком каждому из нас: мы хорошо слышим слова песни (если, конечно, певец поет их внятно) независимо от высоты звуков, передающих эти слова; если бы скорость звука зависела от частоты, слов в этих условиях мы бы не разобрали. Во многих случаях, однако, скорость распространения волны зависит от ее частоты; это явление называется *дисперсией* скорости волны.

Существует ли явление дисперсии ультразвука в воздухе? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо измерить скорость ультразвука в воздухе на разных частотах. Для возбуждения ультразвука требуемых частот необходимо подобрать или изготовить ферритовые вибраторы соответствующих длин. Их нетрудно вычислить, пользуясь формулой (5.5). Для возбуждения ферритовых вибраторов длиной от 6 до 16 см следует использовать магнитострикционные излучатели, подробно рассмотренные в п. 4.4.4.

Выполнив указанную предварительную работу, получите с вибраторами разной длины стоячие ультразвуковые волны в трубке Кундта. Измерьте длины волн в воздухе для ультразвука разных частот, вычислите соответствующие скорости волн и убедитесь, что в пределах ошибок опыта они совпадают.

Отсюда следует, что в изученном вами диапазоне частот дисперсия звука в воздухе практически отсутствует.

8.2.3. Наблюдение влияния ультразвукового ветра. Еще раз внимательно пронаблюдайте стоячую волну в трубке Кундта. Передвигая отражатель, вы обнаружите, что порошок сдувается с узлов. Объясняется это явление, очевидно, наличием ультразвукового ветра в трубке со стоячей волной. Особенно ярко ультразвуковой ветер выражен на более высоких частотах: используя излучатель с ферритовым вибратором длиной 7–8 см, вблизи его торца в трубке Кундта вы вообще не увидите узлов, порошок из которых буквально сдут ультразвуковым ветром!

Если вы достаточно наблюдательны, то заметите, что узлы и пучности стоячей волны вблизи отражателя видны более отчетливо, чем около торца вибратора. Даже тонкие пленки ликоподия выше в тех пучностях, которые расположены возле отражателя, а не у вибратора. Это объясняется не столько действием ультразвукового ветра, сколько тем, что вблизи отражателя падающая и отраженная волны имеют почти равные интенсивности, тогда как вблизи вибратора падающая волна значительно интенсивнее отраженной. Правильность этого объяснения подтверждается тем, что чем меньше зазор между ферритовым вибратором и стеклянной трубкой, тем меньше выражено описанное явление, поскольку меньше потери энергии при распространении ультразвука в трубке.

8.2.4. Отражение звука от твердого плоского отражателя. Исследуя стоячую ультразвуковую волну в трубке Кундта, обратите внимание, что ближайшая к отражателю пучность отстоит от него на расстояние, равное половине расстояния между любыми соседними пучностями или узлами, то есть на расстояние четверти длины ультразвуковой волны. Следовательно, в плоскости отражателя расположен узел смещений стоячей волны.

Но в этой плоскости интерферируют две волны (падающая на отражатель и отраженная им), имеющие разность хода, равную нулю. Согласно теории интерференции в точках, где разность хода между волнами равна нулю, расположен максимум интенсивности интерференционной картины, а у вас в опыте получается узел, то есть минимум.

Такой результат можно объяснить только тем, что при отражении звука от акустически более плотной среды фаза волны меняется на π или, как говорят, *происходит потеря полуволны*. Сопоставьте результат этого наблюдения с тем, что вы знаете об отражении продольной ультразвуковой волны от свободного тор-

ца ферритового вибратора (см. § 5.2). Сделайте соответствующие выводы.

Определите, узел или пучность смещения стоячей ультразвуковой волны расположены в плоскости торца вибратора магнито-стрикционного излучателя.

8.2.5. Отражение звука от открытого конца трубки Кундта. Исчерпывают ли описанные опыты и наблюдения те явления, которые можно обнаружить, следя за поведением порошка в трубке Кундта? Конечно, нет. Совершенно невозможно дать полное описание физических явлений, происходящих даже в столь ограниченной области, как трубка Кундта. Вы должны это иметь в виду, и поэтому рассчитывать в своей работе больше всего на самих себя. Будет прекрасно, если для себя вы откроете новое явление там, где, казалось бы, уже все известно. Пусть вначале вам не удастся объяснить его. Но есть книги, интернет, вы учитесь, и то, что пока не совсем ясно, со временем станет понятным.

Будет гораздо хуже, если вы пройдете мимо чего-то необычного, не обратите на него внимания, не запишите условий, в которых вы заметили это необычное, посчитаете его ошибкой, потому что в книге ничего об этом не говорится. Действуя так, можно многое упустить.

Тем, кому все это кажется недостаточно убедительным, кто думает, что, сделав описанное, он сделал все возможное, мы советуем вообще убрать из трубки Кундта отражатель. Получится ли в таком случае стоячая волна? Если она получилась, то откуда берется необходимая для ее образования отраженная волна? И в трубке, и вне ее — воздух, разве может в воздухе от воздуха отражаться звук? А что находится рядом с открытым концом: пучность или узел смещений стоячей волны? А что должно там находиться по теории?

Итак, уберите из трубки отражатель. Не закрепляя трубку, свободно передвигайте ее вдоль вибратора: вы увидите, что при определенных расстояниях от торца вибратора до открытого конца трубки в ней устанавливается стоячая волна. Она видна несколько хуже, чем при использовании отражателя, но все же вполне отчетливо.

Полученный результат говорит о том, что несмотря на отсутствие отражателя в трубке происходит сложение двух волн, идущих навстречу друг другу. Значит, происходит отражение от открытого конца трубки, хотя там граничат среды с одинаковыми акустическими сопротивлениями и, на первый взгляд, никакого отражения не должно быть. Впрочем, вы уже встречались с подобным явлением, когда исследовали тепловой автогенератор (см. п. 1.3.2).

Интересно узнать, что находится на краю трубки — узел или пучность смещений. Если трубка имеет достаточно ровный край и внутренний диаметр около 10 мм, то вы увидите, что на расстоянии порядка четверти длины волны от края расположена пучность. Поэтому может возникнуть ощущение, что с открытым концом трубки Кундта совпадает узел смещений стоячей волны, как будто там начинается акустически более плотная среда.

Советский физик Л. А. Вайнштейн теоретически показал, что при отражении волны от открытого края трубки радиуса R ситуация аналогична тому, как если бы отражение происходило от свободного края воздушного столба (от акустически менее плотной среды), находящегося на расстоянии $0,8R$ от открытого конца трубки. Следовательно, первый узел должен отстоять на $\lambda/4 - 0,8R$ от края ¹⁾. Вибратор длиной 16 см дает в воздухе звук, длина волны которого составляет величину порядка 20 мм; если диаметр трубки равен 10 мм, то первый узел будет отстоять от ее открытого края на расстояние всего 1 мм. Таким образом, в ваших полуколичественных опытах, в которых узлы стоячей волны обозначены протяженными кучками порошка, будет казаться, что вблизи открытого конца трубки находится узел смещений стоячей волны.

Исследуйте стоячую ультразвуковую волну в разных по длине и диаметру стеклянных трубках с открытыми концами. Если трубка имеет диаметр, меньше диаметра вибратора, просто расположите ее перед излучателем открытым концом вблизи торца вибратора (рис. 8.7). Стоячая волна в трубке все равно

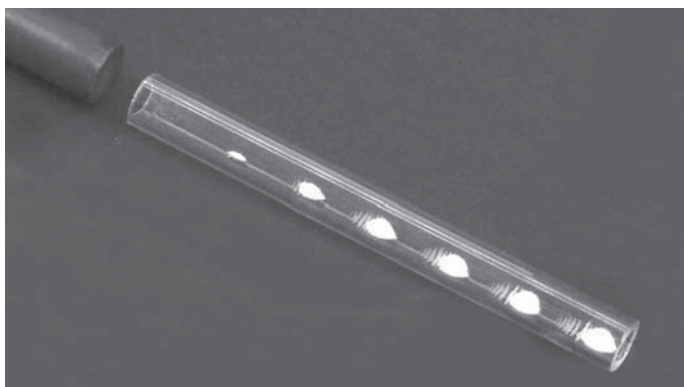


Рис. 8.7. Образование стоячей волны в трубке с открытым концом

¹⁾ Горелик Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. — М.: Физматгиз, 1959. — 572 с. (с. 215).

возникнет и будет видна. Используемые в опытах трубки должны иметь ровные, перпендикулярные их осям края. Этого можно добиться, обработав концы трубок с помощью смоченного водой абразива на стекле.

8.3. Визуализация стоячей волны в воздухе слоем жидкости

Интересно исследовать явления, происходящие в трубке Кундта, если вместо легкого сыпучего порошка использовать жидкость. Будет ли она реагировать на периодические изменения давления, создаваемые стоячей волной?

8.3.1. Распределение жидкости в поле стоячей волны.

Замените порошок в трубке Кундта жидкостью (водой или спиртом). Для этого вам придется закрыть один конец стеклянной трубки герметически: введите в трубку ферритовый отражатель, обмотайте его и конец трубки высоковольтной изоляцией и закрутите вокруг места соединения медную проволоку. В стеклянную трубку налейте небольшое количество жидкости и открытым концом наденьте ее на ферритовый вибратор закрепленного горизонтально магнитострикционного излучателя. Если все сделано правильно, то на дне расположенной горизонтально трубки будет находиться тонкий слой жидкости. Теперь, чтобы в заполняющем трубку воздухе получить стоячую ультразвуковую волну, нужно передвигать трубку вместе с закрепленным в ней отражателем относительно вибратора магнитострикционного излучателя.

Включив ультразвуковой генератор и настроив его в резонанс с вибратором, добейтесь установления в трубке стоячей ультразвуковой волны. Вы обнаружите, что налитый в трубку слой жидкости принимает вид «застывшей» волны.

Результат опыта объясняется тем, что вода периодически выжимается из пучностей давлений стоячей волны, возникающей в трубке Кундта, и поднимается в узлах давлений. Пучности давлений совпадают с узлами смещений стоячей волны. Поэтому, если вы будете внимательны, то увидите, что уровень воды в трубке ниже в тех местах, где в предшествующих опытах (пп. 8.1.3–8.1.5) собирались кучки порошка.

8.3.2. Демонстрация стоячей волны, визуализированной жидкостью. Места, в которых в трубке Кундта жидкость вспучивается, могут действовать подобно собирающим оптическим линзам. Если над трубкой Кундта расположить лампу, прямая нить которой перпендикулярна к трубке, то вспучивания жид-

кости могут дать изображения нити лампы на помещенном под трубкой экране.

Фотография рекомендуемой демонстрационной установки представлена на рис. 8.8. Собирать ее лучше в такой последовательности. На стойке универсального штатива с помощью муфты симметрично закрепите стальной стержень так, чтобы он был расположен горизонтально. На стержне вблизи его центра муфтой закрепите лапку, в которой зажмите край плоского

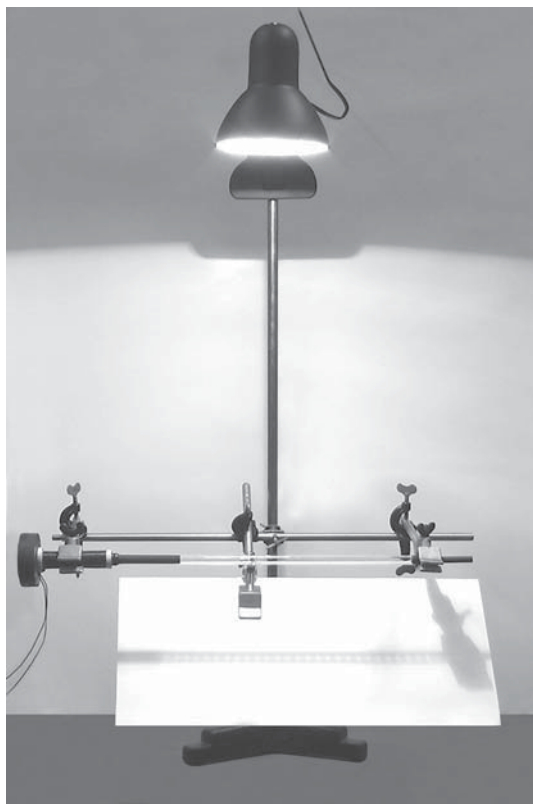


Рис. 8.8. Экспериментальная установка для исследования стоячей волны в воздухе, визуализированной слоем воды. Слева закреплен магнитострикционный излучатель, на его вибратор надета стеклянная трубка со слоем жидкости в ней, справа в трубку введен отражатель. Источником света может быть любая лампа накаливания

белого экрана размером 20×40 см так, чтобы экран оказался под углом примерно 45° к горизонту. На том же стержне двумя муфтами закрепите две лапки, в одной из которых будет зажиматься магнитострикционный излучатель, а во второй —

отражатель, расположенный в трубке Кундта. На верхнем конце стойки штатива закрепите небольшую лампу так, чтобы ее спираль была ориентирована перпендикулярно трубке.

Для опытов желательно использовать стеклянную трубку внутренним диаметром 8,5–9 мм и длиной 300–400 мм с ровными краями. Вибратор магнитострикционного излучателя герметично за середину закрепите внутри трубки так, чтобы он по возможности не касался ее стенок. Можно расположить вибратор внутри трубки таким образом, чтобы ее край касался резинового колечка, которым вибратор крепится в обмотке возбуждения, и место соприкосновения трубки и колечка тщательно обмотать изолентой.

Излучатель зажмите в предназначенной для него лапке, и дальнейшую сборку установки производите, поворачивая лапку с излучателем в соответствующей муфте. Налейте в закрепленную на вибраторе стеклянную трубку небольшое количество жидкости (воды или спирта). С противоположного конца трубки вставьте отражатель и поверните трубку почти горизонтально: за счет поверхностного натяжения жидкость не будет сильно выливаться в промежуток между незакрепленным отражателем и трубкой за время налаживания установки.

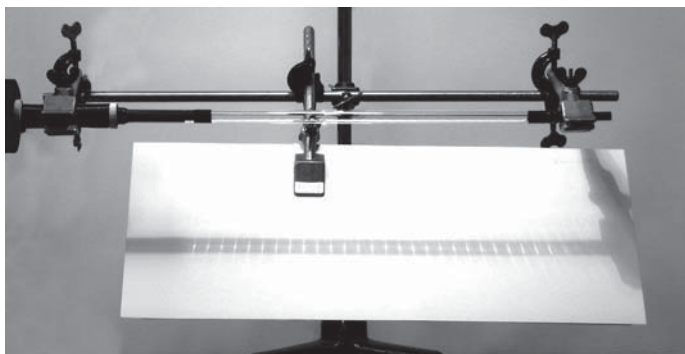


Рис. 8.9. Система изображений спирали лампы, полученная при визуализации слоем жидкости стоячей ультразвуковой волны в стеклянной трубке

Включив лампу, вы увидите на экране тень от стенок трубки и налитой жидкости. Убедитесь, что экран можно перемещать и поворачивать так, что расстояние от него до трубки Кундта меняется в пределах 5–20 см. Настройте генератор в резонанс с вибратором. В каком бы положении ни находился отражатель, на экране обнаружится изменение формы поверхности жидкости и появятся изображения спирали лампы. Однако, пока в трубке

не установится стоячая ультразвуковая волна, картина на экране будет оставаться неустойчивой.

Плавно перемещая отражатель, наблюдайте, как картина периодически становится устойчивой. Одно из положений отражателя, при котором в трубке возникает стоячая волна, отметьте, например, приклеив с внешней стороны трубки полоску изоленты. Выключите генератор и разверните трубку так, чтобы жидкость больше не выливалась, добавьте ее до нужного количества (подбирается экспериментально, зависит от длины и диаметра трубки) и тщательно загерметизируйте место выхода отражателя из трубки, обмотав его изолентой.

Закрепите магнитострикционный излучатель вместе с трубкой Кундта горизонтально. Теперь на экране можно наблюдать устойчивую систему изображений спирали лампы накаливания и исследовать с их помощью стоячую ультразвуковую волну.

8.3.3. Оптический метод измерения расстояний между пучностями стоячей волны. Изображения, получаемые в описанном выше опыте, очень резкие, поэтому позволяют с большой точностью измерить расстояние между пучностями стоячей волны в газе, заполняющем трубку Кундта. Схема эксперимента показана на рис. 8.10.

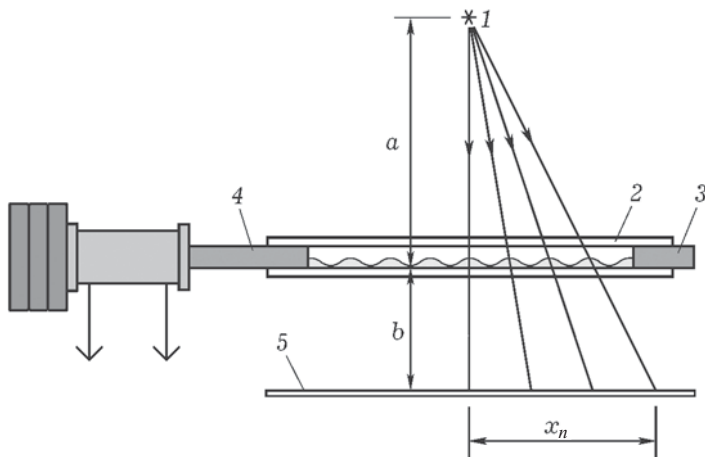


Рис. 8.10. Схема установки по визуализации жидкостью стоячей волны в трубке Кундта и измерению длины ультразвуковой волны: 1 — линейный источник света; 2 — трубка Кундта с тонким слоем жидкости; 3 — отражатель; 4 — вибратор излучателя; 5 — белый экран, на котором получают изображения источника

Нетрудно видеть, что, измерив расстояние a от источника света до слоя жидкости, расстояние b от слоя до экрана и расстояние x_n между первым и $(n + 1)$ -м изображениями источника,

по формуле

$$\lambda = \frac{2a}{a+b} \frac{x_n}{n}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (8.1)$$

можно найти длину волны ультразвука.

Чтобы получить на экране резкие изображения источника, созданные вспучиваниями жидкости в трубке Кундта, нужно подобрать оптимальное расстояние между экраном и трубкой. Свет, отраженный от стенок трубки, при этом, как правило, не мешает ни наблюдениям, ни измерениям. Положение изображений на экране можно отметить остро отточенным карандашом или иглой. Затем экран можно снять и измерить штангенциркулем расстояние x_n . Подстановка значений n и x_n в формулу (8.1) позволяет вычислить длину звуковой волны λ . Оценить погрешность получившегося значения предлагаем вам самостоятельно.

8.3.4. Перегородки из жидкости в трубке Кундта. Сделайте трубку Кундта покороче, длиной всего 5–8 см. Закрыв герметически один конец трубки отражателем, налейте в нее немного спирта или ацетона и получите, как описано выше, стоячую волну в воздухе, заполняющем трубку. Для наглядности подкрасьте жидкость: например, в ацетон можно добавить марганцовокислый калий. Постепенно повышайте интенсивность ультразвука, настраивая более точно генератор в резонанс с вибратором.

Вы увидите, как с ростом интенсивности ультразвука растут вспучивания на поверхности жидкости. Начиная с некоторого значения интенсивности, во вспучиваниях происходит фонтанирование жидкости. Наконец, при максимальной интенсивности ультразвука жидкость разбивается на слои, расположенные вертикально поперек трубки!

Для успешной постановки этого тонкого эксперимента существенна интенсивность стоячей волны, образующейся в трубке Кундта. С целью увеличения интенсивности в опыте нужно использовать сравнительно короткую трубку такого диаметра, чтобы зазор между ее стенками и вибратором излучателя был минимален. Отражатель при этом должен иметь ровную поверхность, ориентированную, как и торец вибратора, строго перпендикулярно оси трубки.

Этот эксперимент позволяет очень точно установить, что в плоскости отражателя и вблизи вибратора находятся узлы смещений стоячей волны (рис. 8.11).

Исследуйте описанный способ наблюдения стоячей ультразвуковой волны на более высокой частоте, используя магнито-стрикционные излучатели с вибраторами длиной 6–10 см. Они позволяют получить более интенсивный ультразвук, но при их

использовании сильнее сказывается влияние ультразвукового ветра. Обратите внимание, что наряду со стоячей волной на

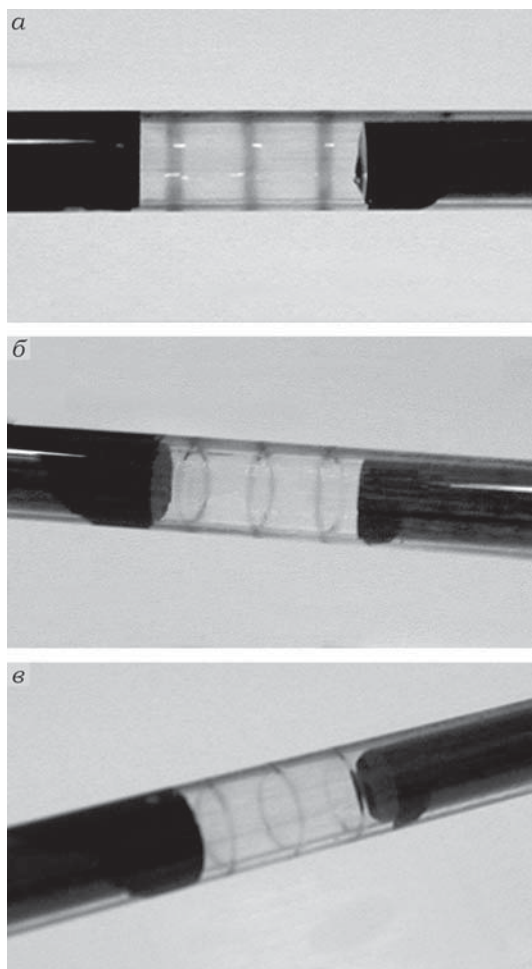


Рис. 8.11. Визуализация стоячей волны жидкостью: в пучностях образуются перегородки ацетона или спирта, перекрывающие трубку Кундта: вид с разных сторон

основной собственной частоте колебаний вибратора образуется стоячая волна и на второй его гармонике. Она менее выражена, но вспучивания жидкости вполне заметны, особенно если жидкость подкрашена.

Глава 9

СТОЯЧАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНА В ЖИДКОСТИ

Метод получения стоячей волны часто используется для измерения скорости звука в различных жидкостях. Казалось бы, ничего особенно нового в этом нет: методом стоячей волны вы уже умеете измерять скорость упругих волн и в твердых телах, и в газах. На самом деле, однако, исследования стоячих упругих волн в жидкостях позволят познакомиться с физическими явлениями, представляющими не только практический, но и познавательный интерес.

9.1. Визуализация стоячей волны методом ориентации взвешенных в жидкости частиц

Исследование стоячей волны в жидкости значительно облегчается, если она тем или иным способом визуализирована, то есть сделана видимой. Начните с уже знакомого вам метода визуализации ультразвукового пучка взвешенными в ацетоне чешуйками алюминиевой краски (см. п. 6.3.4).

9.1.1. Стоячая волна в стеклянной трубке. Нетрудно убедиться, что ориентирующее действие ультразвука позволяет наблюдать непосредственно глазом стоячую ультразвуковую волну в жидкостях.

В стеклянную трубку внутренним диаметром 3–6 мм и длиной 250–300 мм, один конец которой предварительно запаян на пламени газовой горелки или спиртовки, налейте суспензию алюминиевой краски в ацетоне. Трубку запаянным концом поместите в каплю воды, находящуюся на торце вибратора, расположенного вертикально магнитострикционному излучателю. Настройте генератор в резонанс с вибратором так, чтобы получился ультразвук сравнительно небольшой интенсивности, и наблюдайте за содержимым трубки. Если высота столба жидкости в трубке и интенсивность ультразвука подобраны удачно, то в жидкости образуется стоячая волна, которую можно видеть благодаря периодическим просветлениям вдоль трубки с суспензией алюминиевой краски в ацетоне.

Опыт требует тщательности и определенного экспериментального искусства. Часто вместо того, что мы ожидаем, будет получаться уже изученное просветление всего столба жидкости (см. п. 6.3.2). При большой интенсивности ультразвука вместо стоячей волны в трубке получается сильный акустический ветер.

Результат опыта можно объяснить тем, что алюминиевые чешуйки в пучностях скорости (а следовательно, и смещения) стоячей волны поворачиваются перпендикулярно к оси трубки, а в узлах они ориентированы самым беспорядочным образом. Поэтому узлы и пучности стоячей волны по-разному рассеивают свет и в силу этого становятся видимыми непосредственно глазом.

9.1.2. Особенности эксперимента. Держать трубку в капле воды на торце вибратора, как это описано в предыдущем пункте, трудно: вибратор колеблется, и трубка часто соскальзывает с него. Чтобы облегчить постановку эксперимента, можно собрать специальный прибор, обеспечивающий введение ультразвука в жидкость практически без потерь. Ферритовый вибратор магнитоstrictionного излучателя резиновым колечком укрепите в отрезке стеклянной трубки. К ее свободному концу приклейте (или прикрепите подходящей замазкой) небольшую баночку из пластмассы или алюминия (рис. 9.1). В баночку налейте воду и трубку с суспензией алюминиевой краски в ацетоне поместите запаянным концом в воду так, чтобы расстояние между ним и торцом вибратора составляло 0,5–2 мм.

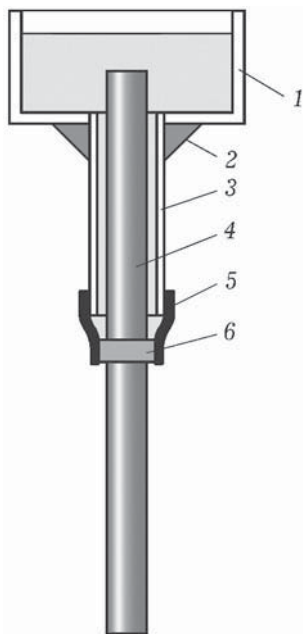


Рис. 9.1. Способ введения ультразвука в жидкость, заполняющую баночку: 1 — пластмассовая баночка, 2 — замазка или клей, 3 — стеклянная трубка, 4 — ферритовый вибратор, 5 — отрезок резинового шланга, 6 — резиновое колечко

Вместо того чтобы запаивать конец трубки, можно затянуть его тонкой резиновой пленкой от детского надувного шарика. Однако этот способ недолговечен, поскольку ацетон сравнительно быстро разьест резину.

9.1.3. Демонстрационный вариант эксперимента. Еще один впечатляющий вариант описанных выше опытов, который можно использовать в демонстрационных целях, заключа-

ется в следующем. В торце ферритового вибратора, смоченным водой, острым углом напильника сделайте небольшое полусферическое углубление. Расположив низкочастотный магнитострикционный излучатель вертикально на столе, в лапке штатива над ним закрепите длинную пробирку (длиной 400–500 мм и внутренним диаметром 10 мм) с суспензией алюминиевой краски в ацетоне. Рукой прижмите дно пробирки к торцу вибратора (для успеха опыта необходимо подобрать оптимальное давление) и включите ультразвук. При этом в пробирке становится видимой прекрасная стоячая волна (рис. 9.2).

Вместо того чтобы делать углубление в торце ферритового вибратора, с тем же успехом можно на мелкой шкурке обработать выпуклое дно пробирки так, чтобы часть его стала плоской.

Наблюдения показывают, что верхняя область, в которой чешуйки алюминиевой краски ориентированы беспорядочно, отстоит от свободной поверхности жидкости на расстояние, равное половине расстояния между любыми соседними такими же областями. Но чешуйки ориентированы беспорядочно в тех областях, где колебательная скорость упругой волны равна нулю, то есть в узлах стоячей волны скоростей. Понятно, что в стоячей упругой волне узлы (пучности) скоростей и смещений совпадают. На свободной поверхности жидкости расположена, очевидно, пучность смещений (скоростей), и именно вблизи этой поверхности наблюдается просветление жидкости, то есть ориентация чешуек, перпендикулярная оси пробирки. Возле дна пробирки, то есть вблизи торца излучателя наблюдается плотная непрозрачная область суспензии алюминиевой краски в ацетоне, значит, там расположен узел смещений и скоростей стоячей волны. Таким образом, из проделанного анализа результатов эксперимента следует, что ориентирующее действие ультразвука имеет

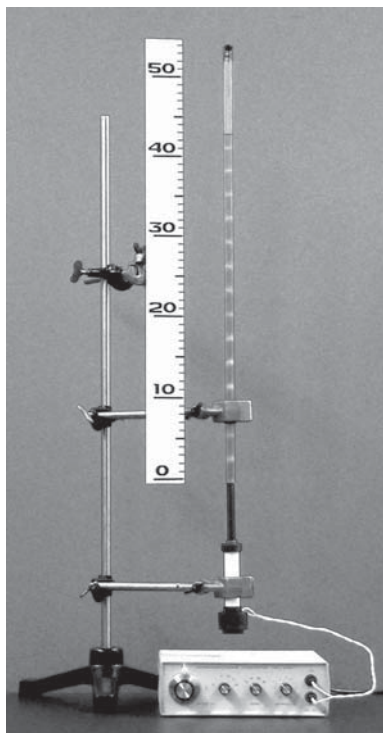


Рис. 9.2. Эксперимент по изучению стоячей волны в суспензии алюминиевой краски в ацетоне, налитой в длинную трубку с запаянным нижним концом

место в пучностях смещений стоячей волны, в узлах чешуйки алюминиевой краски ориентированы беспорядочно.

9.1.4. Измерение скорости ультразвука. Измерьте расстояние между несколькими узлами (они выделяются более резко) стоячей ультразвуковой волны в длинной пробирке. Разделив найденную величину на число промежутков между выбранными узлами, вы получите значение l , равное половине длины ультразвуковой волны $\lambda = 2l$ в жидкости. Зная частоту ν ультразвука, по формуле $c = \lambda\nu$ вычислите скорость звука в жидкости. Если в опыте используется суспензия алюминиевой краски в ацетоне, то при этом получится значение, близкое к 1200 м/с.

Частоту ультразвука в этом опыте можно определить, измерив ее непосредственно частотомером. Но возможно и косвенное определение частоты по скорости ультразвука в ферритовом вибраторе. Действительно, вибратор совершает колебания на основной собственной частоте, поэтому на его длине $l_{\text{ф}}$ укладывается половина длины волны ультразвука в феррите $\lambda_{\text{ф}} = 2l_{\text{ф}}$.

Тогда частота ультразвука $\nu = c_{\text{ф}}/\lambda_{\text{ф}} = c_{\text{ф}}/2l_{\text{ф}}$. Отсюда скорость ультразвука в жидкости, заполняющей стоящую на вибраторе пробирку, равна

$$c = \lambda\nu = 2l\nu = \frac{l}{l_{\text{ф}}} c_{\text{ф}}. \quad (9.1)$$

Попробуйте установить, имеет ли место дисперсия скорости звука в жидкости. Для этого используйте магнитострикционные излучатели с ферритовыми вибраторами различной длины.

9.1.5. Стоячая волна в стеклянной пробирке. Интересно поставить опыты, аналогичные описанным выше, пользуясь вместо длинной обычной стеклянной пробиркой. Такие пробирки внутренним диаметром 15–20 мм и длиной 150–200 мм имеются в любом кабинете химии. На рис. 9.3 представлена фотография демонстрационной установки,

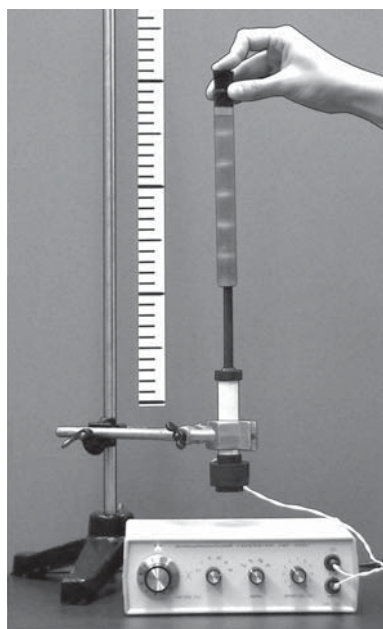


Рис. 9.3. Эксперимент по исследованию стоячей волны в стеклянной пробирке

предназначенной для измерения длины ультразвуковой волны в заполняющей пробирку суспензии алюминиевой краски в ацетоне.

В экспериментах можно заметить (рис. 9.4), что иногда в пробирке образуется стоячая волна, соседние пучности которой отстоят друг от друга на расстояние, много меньшее ожидаемого согласно расчету по формуле (9.1). Это удивительно, поскольку условия опыта, казалось бы, совершенно не меняются и, в частности, неизменной остается частота ультразвука.

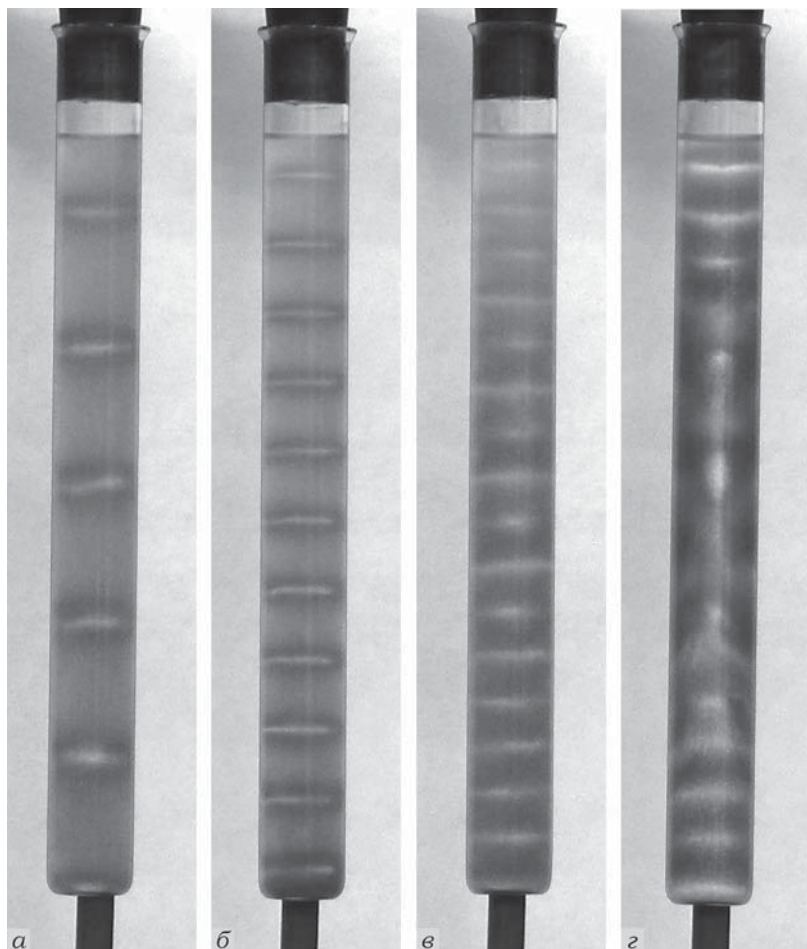


Рис. 9.4. Стоячие ультразвуковые волны в пробирке, заполненной суспензией алюминиевой краски в ацетоне; в отраженном свете узлы смещений видны как блестящие узкие области: *а* — стоячая волна на основной собственной частоте вибратора; *б* — стоячая волна на второй гармонике; *в* — стоячая волна на третьей гармонике; *г* — в жидкости одновременно образовались стоячие волны на первой и третьей гармониках вибратора

Первая мысль, которая приходит в голову, заключается в том, что на наблюдаемый результат оказывает влияние распространение ультразвука не только в жидкости, но и по стеклу пробирки. При этом пробирка совершает поперечные радиальные колебания, что, как известно, приводит к изменению скорости упругой волны в жидкости. Однако это изменение не может быть столь же значительным, как получающееся в эксперименте. Значит, необходимо иное объяснение.

Наблюдения показывают, что расстояния между соседними узлами стоячей волны в заполняющей пробирку жидкости всегда в целое число раз меньше максимального значения, вычисленного по формуле (9.1). Поэтому вполне естественно предположение, что в эксперименте вибратор излучателя совершает колебания не только на основной собственной частоте, но и на гармониках более высокого порядка. На каких именно?

Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо выполнить дополнительное исследование.

Повторите опыты по образованию стоячей волны в суспензии алюминиевой краски в ацетоне, используя магнитострикционные излучатели, дающие ультразвук более высокой частоты. Попробуйте получить стоячую волну в пробирке, подобрав высоту столба жидкости так, чтобы она как можно точнее оказалась кратной целому числу четвертей длин волн. Используйте вместо самодельного промышленный генератор ультразвуковой частоты, например, типа ФГ-100. Возбуждайте вибратор низкочастотного магнитострикционного излучателя на основной частоте и на гармониках. В результате вы будете получать картины стоячих волн, подобные показанным на рис. 9.4.

Отсюда следует вывод: разнообразие картин, наблюдаемых в налитой в пробирку суспензии алюминиевой краски в ацетоне, объясняется тем, что обычно вибратор магнитострикционного излучателя наряду с колебаниями на основной частоте совершает и более слабые колебания на гармониках высшего порядка. Чувствительность же метода визуализации стоячей волны ориентирующим действием ультразвука настолько высока, что при определенных условиях обеспечивает наблюдение не только основной стоячей волны, но и стоячих волн, обусловленных гармониками колеблющегося вибратора.

Мы не можем не привести здесь фотографий стоячей ультразвуковой волны в заполняющей пробирку суспензии алюминиевой краски в ацетоне, полученных, когда картина наблюдается на просвет (рис. 9.5). При фотографировании пробирка с жидкостью была расположена перед белым полупрозрачным экраном, освещенным сзади лампой накаливания. На этих фотографиях отчетливо видно, что интенсивность стоячей волны монотонно

увеличивается в направлении от вибратора магнитострикционного излучателя к свободной поверхности жидкости, которая является отражателем. Объясните это явление!

Наконец, дайте объяснение тому, почему вблизи вибратора, где амплитуда колебаний казалось бы должна быть максимальной, чаще всего наблюдается узел смещений стоячей волны?

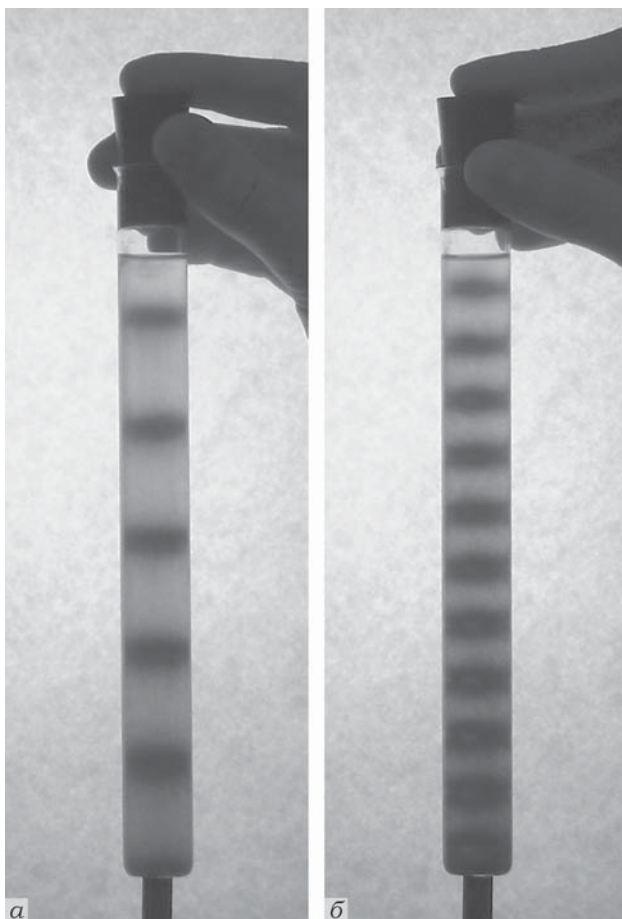


Рис. 9.5. Стоячие ультразвуковые волны в пробирке, заполненной суспензией алюминиевой краски в ацетоне: *а* — при возбуждении вибратора на основной собственной частоте; *б* — при возбуждении вибратора на первой гармонике; на просвет пучности выглядят светлее, чем узлы

И последнее: почему бы не попробовать опустить в пробирку плоский металлический отражатель и не выяснить, что именно — узел или пучность смещений устанавливается возле его поверхности?

9.2. Визуализация стоячей волны методом коагуляции взвешенных в жидкости частиц

Если стоячую ультразвуковую волну в газе, заполняющем трубку Кундта, можно визуализировать легким сыпучим порошком, то не удастся ли сделать то же самое для стоячей ультразвуковой волны в жидкости, используя взвешенный в ней порошок? Визуализация суспензией алюминиевой краски в ацетоне происходит за счет ориентирующего действия ультразвука. В трубке же Кундта частицы порошка перемещаются из пучностей смещений стоячей волны в узлы, где и оседают. Значит, нужно найти такие условия эксперимента, при которых взвешенный в жидкости порошок мог бы переместиться из пучностей в узлы стоячей волны.

9.2.1. Визуализация стоячей волны суспензией крахмала в воде.

Магнитострикционный излучатель ультразвука средней частоты с ферритовым вибратором длиной 20–40 мм позволяет поставить удивительные по красоте опыты со стоячей ультразвуковой волной в жидкости.

Подключите излучатель к ультразвуковому генератору средней частоты (п. 4.4.2) и поместите на торец его вибратора каплю воды. Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором так, чтобы капля на торце начала колебаться.

В заранее приготовленный до опыта высокий стакан налейте дистиллированную или прокипяченную воду, и на его дно поместите слой крахмала толщиной в несколько миллиметров. Стекло́нной трубкой внутренним диаметром 3–6 мм сильно взболтайте крахмал так, чтобы образовалась однородная суспензия белого цвета. Той

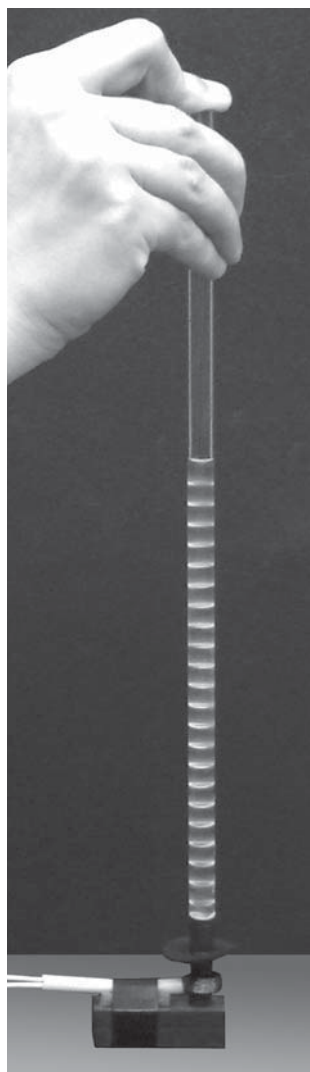


Рис. 9.6. Стоячая ультразвуковая волна в суспензии крахмала в воде

же трубкой наберите получившуюся взвесь крахмала в воде и, закрыв верхний ее конец пальцем, поместите нижний ее конец на торец вибратора работающего излучателя. При этом в столбе воды в трубке устанавливается стоячая ультразвуковая волна: через несколько секунд она отчетливо обозначается собравшимися в ее пучностях частицами крахмала (рис. 9.6).

Когда на торец вибратора ставится трубка с суспензией крахмала в воде, собственная частота вибратора слегка изменяется, так что для получения стоячей волны, возможно, потребуется небольшая подстройка частоты колебаний, даваемых ультразвуковым генератором. В целом же опыт очень прост и получается всегда, если излучатель работает нормально.

9.2.2. Области коагуляции суспензии крахмала в воде. Внимательно наблюдайте стоячую ультразвуковую волну в заполняющей трубку суспензии крахмала в воде. Обратите внимание, что крахмал собирается в плотную область (как говорят, *коагулирует*) непосредственно у поверхности жидкости в трубке. Поскольку поверхность жидкости свободна, в ее плоскости образуется пучность смещений стоячей волны. Таким образом, опыт показывает, что крахмал коагулирует в пучностях смещений или узлах давлений стоячей ультразвуковой волны.

Интересно, что в трубке Кундта порошок собирается не в пучностях, а в узлах смещений стоячей волны. В пучностях стоячей волны в воздухе образуются тонкие пленки.

В стеклянной трубке, заполненной суспензией крахмала в воде, можно получить стоячую волну при возбуждении вибратора не только на основной частоте (рис. 9.7 а), но и на его второй гармонике (рис. 9.7 б). Длина волны ультразвука в воде при этом уменьшается в два раза, о чем свидетельствуют в два раза чаще расположенные области коагуляции крахмала.

9.2.3. Визуализация стоячей волны эмульсией керосина в воде. Мы только что выяснили, что взвешенные в жидкости одинаковые

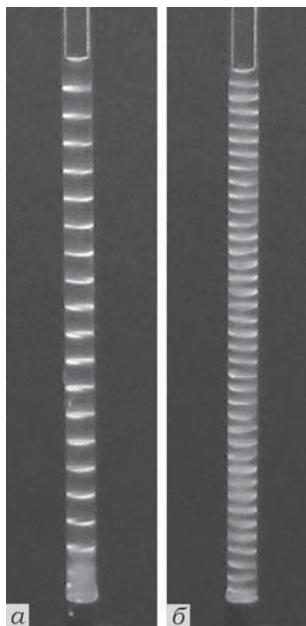


Рис. 9.7. Стоячая ультразвуковая волна в суспензии крахмала в воде: а — при возбуждении вибратора на основной частоте; б — при возбуждении вибратора на второй гармонике

частицы собираются в пучностях смещений стоячей волны. Однако так происходит не всегда. В этом нетрудно убедиться на примере эмульсии керосина в воде. Кратко рассмотрим способ получения эмульсии керосина в воде для опытов со стоячей волной.

В сосуд, имеющий в своем дне кран (или просто закрывающееся отверстие), налейте воду, а поверх нее — слой керосина. Погрузите ферритовый вибратор низкочастотного магнитострикционного излучателя, обеспечивающего получение ультразвука частотой порядка 20 кГц, до границы раздела жидкостей и включите ультразвук. При этом в воде образуется белая эмульсия керосина. Для ускорения процесса можно передвигать излучатель вверх и вниз, чтобы его работающий вибратор многократно пересекал границу между несмешивающимися жидкостями. Дайте приготовленной эмульсии некоторое время отстояться, чтобы относительно крупные капли керосина успели всплыть вверх, и,

открыв кран внизу сосуда, аккуратно слейте эмульсию в пробирку, отделяя ее тем самым от керосина. Для успешной постановки опыта важно отсутствие в эмульсии крупных капель керосина (эмульсия на вид должна быть совершенно однородной).

Еще один способ получения эмульсии керосина в воде заключается в следующем. В пробирку примерно на две трети ее объема налейте 10%-ный водный раствор хорошего моющего средства, например, «Fairgy». Сверху добавьте небольшое количество керосина так, чтобы получился слой толщиной порядка 1 мм, и взболтайте содержимое пробирки. Эмульсия при этом получается, возможно, не столь однородной, как при облучении жидкостей ультразвуком, но вполне пригодной для наблюдения стоячей ультразвуковой волны. В опытах нужно избегать возникновения пены на поверхности эмульсии в пробирке и трубках.

Полученную тем или иным спосо-

бом эмульсию наберите в стеклянную трубку и поместите ее на вибратор ультразвукового излучателя средней частоты точно так же, как это делалось при использовании суспензии крахмала в воде. Спустя некоторое время после начала облучения (обычно

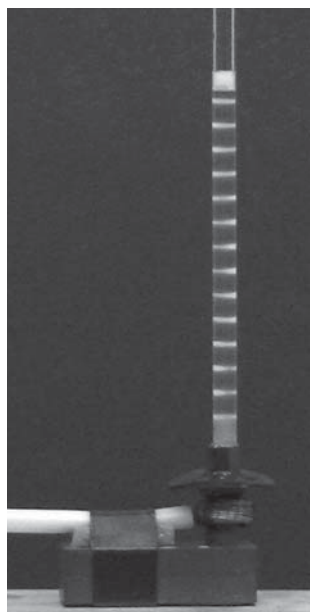


Рис. 9.8. Стоячая ультразвуковая волна в эмульсии керосина в воде

значительно превышающее время, необходимое для коагуляции крахмала в воде) можно увидеть, как мельчайшие капельки керосина коагулируют, но теперь уже не в пучностях, а в узлах смещений, причем верхний узел отстоит от поверхности жидкости на четверть длины волны ультразвука (рис. 9.8).

9.2.4. Зависимость коагуляции взвешенных в жидкости частиц от их плотности. Для более убедительного и эффектного подтверждения вывода о распределении взвешенных частиц в стоячей волне можно провести опыт одновременно с эмульсией керосина и суспензией крахмала в воде. В последнем случае, поскольку керосин коагулирует в узлах смещений (рис. 9.9 б), а крахмал — в узлах давлений (рис. 9.9 а), эти вещества оказываются в трубке пространственно разделенными (рис. 9.9 в).

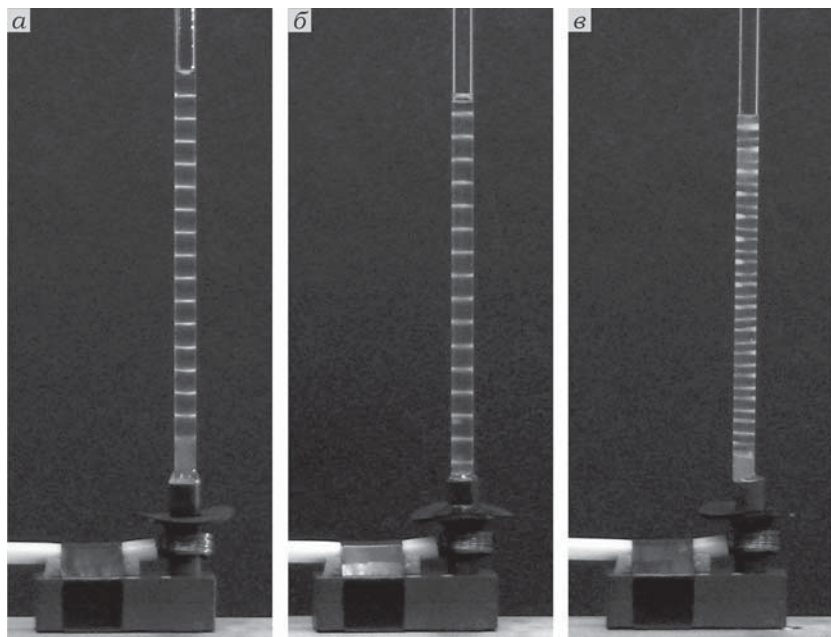


Рис. 9.9. Визуализация стоячей волны частицами, имеющими различную плотность: *а* — стоячая волна в суспензии крахмала в воде, *б* — стоячая волна в эмульсии керосина в водном растворе «Faigu»; *в* — стоячая волна в смеси суспензии крахмала и эмульсии керосина

Из проделанных опытов следует вывод, что *диспергированное* (размельченное) в жидкости вещество коагулирует в узлах смещений, если его плотность меньше плотности жидкости, и в пучностях смещений стоячей волны, если его плотность превышает плотность жидкости. Одной из причин коагуляции

являются силы притяжения и отталкивания Бьеркнеса (см. п. 6.5.2), действующие между одинаковыми частицами, находящимися в ультразвуковом поле. Однако существующие гипотезы относительно физического механизма коагуляции не получили достаточного экспериментального обоснования.

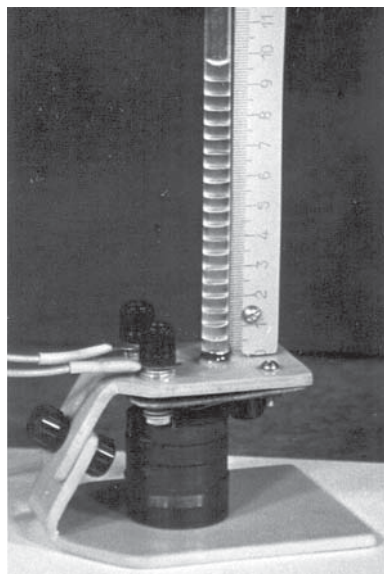


Рис. 9.10. Эксперимент по определению скорости звука в воде

9.2.5. Измерение скорости звука в воде. Визуализация крахмалом стоячей ультразвуковой волны в воде позволяет определить расстояние между соседними узлами и по формуле (9.1) вычислить скорость звука. Напомним, что при этом используется магнитострикционный излучатель, обеспечивающий получение ультразвука средней частоты (рис. 9.10). Интересно оценить точность этих измерений и сравнить ее с точностью аналогичных измерений, которые можно сделать, пользуясь низкочастотным излучателем и суспензией алюминиевой краски в ацетоне.

9.2.6. Акустический волновод. На границе раздела сред твердое тело–газ ультразвук практически полностью отражается назад в ту среду, из которой он падает. Поэтому он хорошо распространяется по твердым волноводам, изогнутым так, как это нужно. Чтобы убедиться в этом, можно поставить опыт с жидкостной моделью твердого волновода, в которой крахмалом визуализируется стоячая волна в воде, заполняющей изогнутую стеклянную трубку.

Из легкоплавкой стеклянной трубки изготовьте ультразвуковой волновод, произвольным образом изогнув трубку над пламенем газовой горелки или спиртовки. В трубку наберите суспензию крахмала в воде. Для этого в воде, налитой в широкий стакан, взболтайте крахмал, изогнутую стеклянную трубку погрузите в жидкость, верхнее отверстие трубки перекройте пальцем и перенесите трубку с суспензией крахмала в воде на торец магнитострикционного излучателя средней частоты. При настройке генератора в резонанс с вибратором излучателя вы будете наблюдать стоячую волну на всем протяжении

получившегося волновода (рис. 9.11). Из опыта следует, что и по волноводу сложной формы энергия ультразвука может быть доставлена в нужное место.

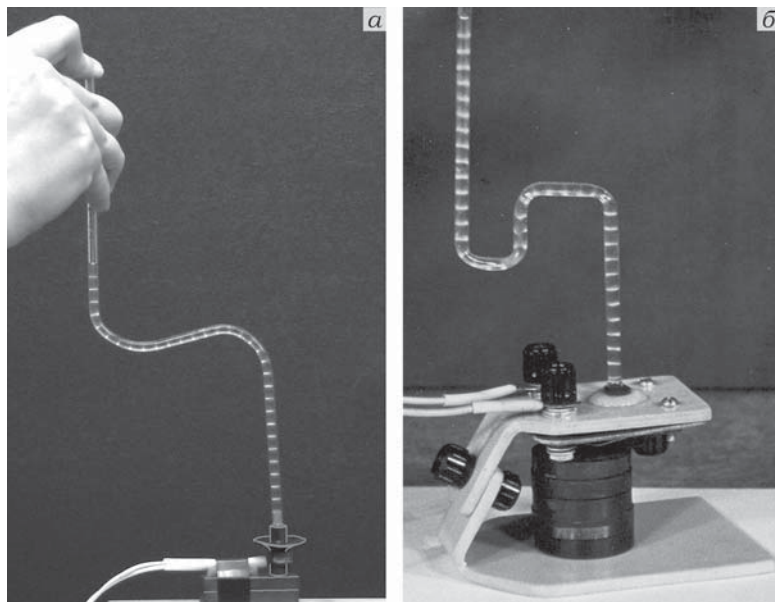


Рис. 9.11. Стоячая волна в ультразвуковом волноводe: стеклянные волноводы разной формы

9.3. Ультразвуковой интерферометр

Опыты показывают, что методом визуализации длину ультразвуковой волны в жидкости можно измерить с гораздо меньшей точностью, чем в воздухе или твердом теле: узлы и пучности стоячей волны, видимые благодаря различной ориентации алюминиевых чешуек или коагуляции частиц крахмала, довольно сильно размазаны. Однако существует значительно более точный метод индикации узлов и пучностей стоячей волны в жидкостях, чем рассмотренный выше. Этот метод используется в специальных приборах, которые называют *ультразвуковыми интерферометрами*.

9.3.1. Модель ультразвукового интерферометра. На рис. 9.12 приведена схема демонстрационной модели ультразвукового интерферометра, рассчитанного на работу с ультразвуком низкой частоты. Для сборки этой модели подберите стеклянную трубку внутренним диаметром 8 мм и длиной 300–400 мм.

На трубке с помощью обжимок из жести или винипласта желательно закрепить линейку. Один конец стеклянной трубки резиновым патрубком соедините с резиновой грушей. Трубку зафиксируйте вертикально в одной лапке универсального штатива. Во второй лапке укрепите струбцину и зажмите ею резиновую грушу.

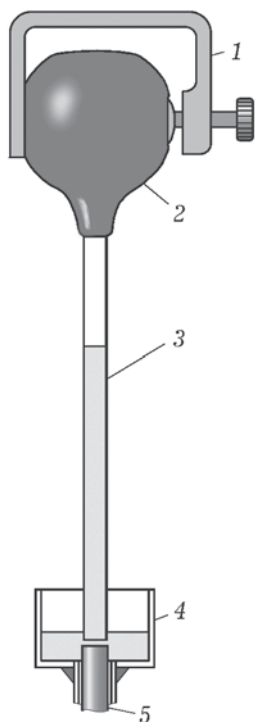


Рис. 9.12. Конструкция модели ультразвукового интерферометра: 1 — струбцина, 2 — резиновая груша, 3 — стеклянная трубка, 4 — сосуд с жидкостью, 5 — ферритовый вибратор магнитострикционного излучателя

Под нижний конец стеклянной трубки подведите магнитострикционный излучатель низкой частоты с укрепленной на его вибраторе чашечкой. В чашечку налейте дистиллированную или прокипяченную воду и, вращая зажимной винт струбцины, поднимите столб воды в трубке.

Далее проведите эксперимент. Включите ультразвуковой генератор и настройте его в резонанс с вибратором. О точности настройки можно судить по громкости шипящего звука (так называемого *кавитационного шума*). Медленно вращайте винт струбцины, изменяя высоту столба воды над вибратором магнитострикционного излучателя. При этом через равные изменения высоты столба жидкости слышны усиление и ослабление кавитационного шума.

При объяснении описанного выше явления разумно предположить, что изменение высоты столба жидкости приводит к систематическому возникновению и исчезновению стоячей ультразвуковой волны, подобно тому, как это имело место при перемещении отражателя в трубке Кундта. Совершенно очевидно, что интенсивность колебаний вибратора излучателя зависит от того, есть ли стоячая волна в трубке или ее нет. Если бы такой зависимости не существовало, то было бы трудно объяснить связь высоты столба жидкости с

громкостью кавитационного шума. Таким образом, из опыта следует, что само появление стоячей волны в столбе жидкости над вибратором оказывает воздействие на излучатель: амплитуда колебаний вибратора меняется в зависимости от того, приводит его работа к образованию стоячей волны или нет.

Но стоячая волна возникает за счет интерференции когерентных волн, распространяющихся навстречу. Приборы, в которых

те или иные физические величины измеряются благодаря интерференции, принято называть *интерферометрами*. Поэтому рассмотренный здесь прибор, в котором используется интерференция ультразвуковых волн, и называется ультразвуковым интерферометром.

9.3.2. Воздействие стоячей волны на работу излучателя.

Явление обратного воздействия образующейся в среде стоячей волны на работу излучателя получило название *реакции излучателя на стоячую волну*.

Оценка на слух моментов, когда в трубке интерферометра устанавливается стоячая волна, не отличается большой точностью. Но изменение интенсивности колебаний вибратора, естественно, должно приводить к изменению мощности, потребляемой излучателем от генератора. Эти изменения мощности вызывают изменения тока, проходящего через излучатель, которые можно зафиксировать посредством соответствующего электроизмерительного прибора.

Изложенные идеи положены в основу типичного ультразвукового интерферометра, предназначенного для научных исследований. Функциональная схема прибора приведена на рис. 9.13.

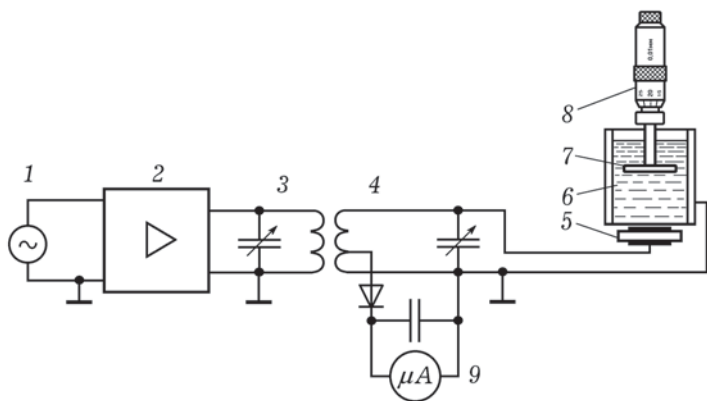


Рис. 9.13. Функциональная схема промышленного ультразвукового интерферометра: 1 — генератор, 2 — усилитель, 3 и 4 — индуктивно связанные параллельные колебательные контуры, 5 — пьезоэлектрический излучатель, 6 — камера с исследуемым веществом, 7 — отражатель, 8 — микрометр, 9 — вольтметр переменного тока

Переменное напряжение ультразвуковой частоты, вырабатываемое задающим генератором 1, подается на вход резонансного усилителя 2, нагрузкой которого является параллельный колебательный контур 3. С ним индуктивно связан колебательный контур 4, к которому подключен пьезоэлектрический излучатель 5,

установленный на дне камеры 6. Параллельно излучателю в камере расположен металлический отражатель 7, соединенный с микрометрическим винтом 8, обеспечивающим поступательное перемещение отражателя. С частью катушки колебательного контура 4 соединен простейший вольтметр переменного тока 9, состоящий из высокочастотного выпрямительного диода, фильтрующего конденсатора и микроамперметра.

При измерениях камеру заполняют исследуемым жидким или газообразным веществом. Настройкой генератора и колебательных контуров возбуждают резонансные колебания пьезоэлектрического вибратора. Далее вращением микрометрического винта поступательно перемещают отражатель, изменяя расстояние между ним и излучателем. При этом за счет реакции излучателя на стоячую ультразвуковую волну изменяется потребляемая излучателем мощность, о чем свидетельствуют периодические изменения показаний вольтметра. Построив график зависимости измеряемого напряжения от расстояния, на которое переместился отражатель, определяя длину ультразвуковой волны. По известным длине волны и частоте ультразвука вычисляют скорость распространения продольной упругой волны в исследуемом веществе.

9.3.3. Схема компенсации. В учебных целях нет необходимости в непосредственной реализации функциональной схемы ультразвукового интерферометра, представленной на рис. 9.13. Можно поступить гораздо проще, если принять во внимание то, что реакция излучателя на стоячую волну неизбежно должна влиять на величину постоянного тока, потребляемого транзисторным генератором от источника питания. Изменения этого тока, вызванные установлением и исчезновением стоячей волны, крайне малы по сравнению с полным током, проходящим через генератор. Поэтому для их обнаружения необходимо тем или иным способом устранить влияние неизменной части потребляемого генератором тока на измерительный прибор.

Одним из способов такого устранения может быть использование специального *компенсатора*. Возможная схема компенсатора, состоящего из постороннего источника питания, переменного резистора и гальванометра, изображена на рис. 9.14.

Разберемся в работе этой схемы. Электрический ток от источника *GB1* проходит к ультразвуковому генератору через гальванометр. Параллельно последнему прибору подключены последовательно соединенные батарея *GB2* и переменный резистор *R1*. Полярность батареи выбрана так, что создаваемый ею в гальванометре ток направлен противоположно току, идущему через тот же гальванометр от источника. Меняя сопротивление переменного резистора, можно добиться равенства по абсолютной величине

токов, проходящих через гальванометр. Поскольку рассматриваемые токи имеют противоположные направления, общий ток, протекающий через прибор, будет равен нулю. Таким образом, схема

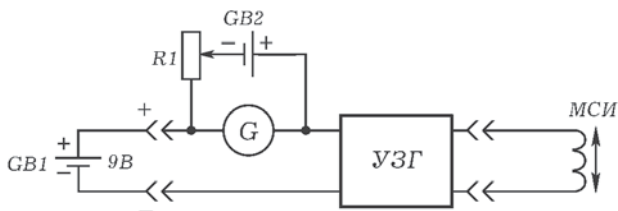


Рис. 9.14. Функциональная схема электрической части ультразвукового интерферометра. Схема компенсатора потребляемого генератором тока состоит из переменного резистора $R1$ и батареи $GB1$

позволяет скомпенсировать значительный по величине постоянный ток, который потребляется от источника питания ультразвуковым генератором, и, следовательно, наблюдать небольшие изменения этого тока, вызванные реакцией излучателя.

9.3.4. Работа с ультразвуковым интерферометром. Рассмотренная выше схема компенсации лучше всего согласуется с ультразвуковым генератором, потребляющим от источника питания сравнительно небольшой ток. Фотография такого генератора приведена на рис. 4.8, а его принципиальная схема изображена на рис. 4.6. Генератор обеспечивает достаточно высокую мощность ультразвука при напряжении питания 30–50 В. В ультразвуковом интерферометре интенсивный ультразвук не нужен, поэтому указанный генератор следует питать пониженным напряжением около 9 В, используя сетевой блок или две последовательно соединенные батареи.

В качестве измерительного прибора (гальванометра) лучше взять стрелочный авометр, который позволяет легко менять пределы измерения. Кроме того, стрелочный прибор предпочтительнее цифрового, поскольку следить за колебаниями стрелки легче, чем за изменениями чисел.

При сборке цепи компенсации используйте одну или две батареи для карманного фонаря, переменный резистор с максимальным сопротивлением 250–500 Ом и авометр, например, типа Ц4315. Собрав установку, включите питание генератора и подсоедините в цепь батарею. Только после этого можно включить в цепь авометр, причем использовать его следует как амперметр с наибольшим пределом измерения (у авометра типа Ц4315 этот предел равен 2,5 А).

Настройте генератор в резонанс с вибратором. Изменяя переменным резистором величину тока компенсации, добейтесь,

чтобы стрелка прибора оказалась вблизи нуля шкалы, а затем переключите амперметр на меньший предел измерения и вновь повторите операцию компенсации тока. Описанным способом нужно дойти до предела измерения 25 мА и установить переменным резистором стрелку миллиамперметра посередине шкалы.

Если в вашем распоряжении нет авометра, то вместо него можно использовать любой миллиамперметр с пределом измерения не больше 30 мА, рассчитав и изготовив по приведенным выше данным (для прибора Ц4315) шунтирующие его резисторы.

Настроив схему компенсации, проведите опыт. Изменяя вращением винта трубки степень сжатия груши (см. рис. 9.12), постепенно увеличивайте высоту столба жидкости над вибратором. При этом обратите внимание, как стрелка прибора колеблется в такт с изменением громкости кавитационного шума. В процессе постановки опыта видно, что по минимальным и максимальным показаниям гальванометра можно отметить минимумы и максимумы потребляемой излучателем мощности значительно точнее, чем на слух.

Если установка отлажена достаточно хорошо, то стрелка прибора в опыте будет колебаться почти на всю шкалу. Столь значительные колебания стрелки позволят даже снять график зависимости изменения потребляемого генератором тока от высоты столба жидкости в трубке. В результате получится кривая, подобная той, которая нами снята в аналогичном опыте и изображена на рис. 9.15.

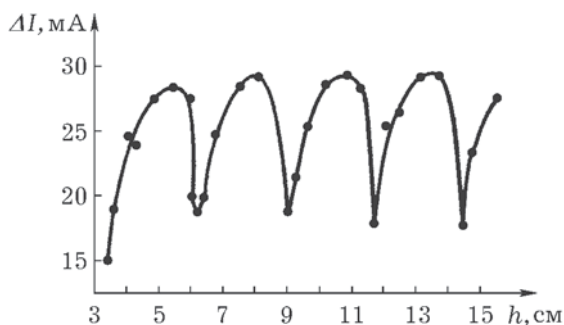


Рис. 9.15. График зависимости изменения силы тока, потребляемого ультразвуковым генератором, от высоты столба воды над излучателем

По графику нетрудно с достаточной точностью определить длину ультразвуковой волны в жидкости и по известной частоте вычислить скорость звука. В нашем опыте для скорости звука в воде получилось значение $c = \lambda \nu = 1350$ м/с. Будет совсем неплохо, если получится близкая величина: табличное значение скорости звука в воде равно 1495 м/с. Различие между

табличной и измеренной в опыте скоростью звука объясняется, во-первых, относительной грубостью экспериментальной установки и, во-вторых, тем, что стеклянная трубка с жидкостью представляет собой волновод, скорость звука в котором несколько отличается от скорости звука в свободной жидкости.

При исследовании зависимости потребляемого генератором тока от высоты столба жидкости над вибратором нередко вместе с «нужными» изменениями тока будут получаться «ненужные» небольшие максимумы и минимумы. Их называют *сателлитами* (спутниками). Теория этого интересного явления не проста, и в нескольких словах ее не объяснить. Мы обращаем внимание на сателлиты лишь для того, чтобы специально подчеркнуть: их появление обусловлено не несовершенством экспериментальной установки, а самим существом происходящих в ней физических явлений.

9.3.5. Мостовая схема компенсации. Учебный ультразвуковой генератор (см. рис. 4.10), который использован вами в большинстве экспериментов, даже при небольшом напряжении питания потребляет от источника сравнительно большой ток. Для такого генератора изображенная на рис. 9.14 схема компенсации недостаточно стабильна. Причину этого понять нетрудно. В самом деле, если генератор в условиях нормальной работы потребляет ток порядка 1 А, то такой же по величине ток должен обеспечивать компенсатор. Но компенсирующий ток получается от батареи, а при большой величине тока напряжение на выводах батареи непрерывно уменьшается (говорят: батарея «садится»). Поэтому непрерывно нарушается компенсация и наблюдается *дрейф нуля* электроизмерительного прибора.

Чтобы избежать этого нежелательного явления, можно в изображенной на рис. 9.15 схеме вместо батарей взять два независимых сетевых источника питания, дающих регулируемое стабилизированное напряжение.

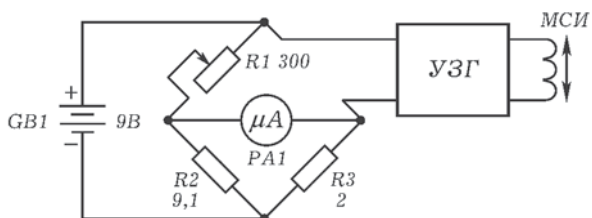


Рис. 9.16. Мостовая схема компенсации для ультразвукового интерферометра; сопротивления резисторов: $R_1 = 300 \text{ Ом}$, $R_2 = 9,1 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$

Лучше, однако, вместо рассмотренной схемы использовать мостовую схему компенсации (рис. 9.16). В ней ультразвуковой

генератор включен в одно из плеч моста, образованного двумя постоянными и одним переменным резисторами. Величины сопротивлений этих резисторов подобраны так, чтобы они были соизмеримы с внутренним сопротивлением генератора. В одну из диагоналей моста включен электроизмерительный прибор, а другая — подключена к источнику питания.

Стабильность этой схемы компенсации гораздо выше, чем ранее рассмотренной, потому что и генератор, и измерительный мост подключены к одному источнику питания. Изменение его напряжения за счет большого тока генератора не приводит к изменению нулевой разности потенциалов между точками моста, к которым подключен измерительный прибор.

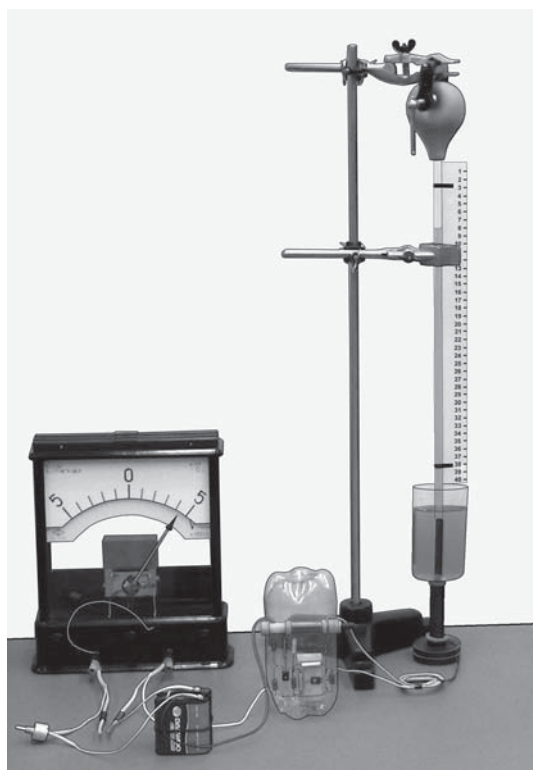


Рис. 9.17. Внешний вид ультразвукового интерферометра, в котором использована мостовая схема компенсации потребляемого генератором тока

В экспериментальной установке в качестве измерительного прибора можно использовать авометр типа Ц4315, предел измерения которого при компенсации тока генератора последовательно уменьшают от 2,5 А до 100 мкА. Если при работе

интерферометра в момент установления стоячей волны хорошо слышен кавитационный шум, то стрелка прибора отклоняется на всю шкалу.

Внешний вид установки для демонстрации принципа действия ультразвукового интерферометра показан на рис. 9.17. В ней в качестве измерителя тока применен демонстрационный гальванометр, который при подборе оптимального тока компенсации должен быть снабжен шунтом.

9.3.6. Зависимость скорости звука в жидкости от частоты. Рассмотренные выше модели ультразвуковых интерферометров позволяют довольно точно измерить скорости звука в различных жидкостях. Заметим, что этого вы не могли сделать, используя методы визуализации ультразвуковой волны, так как далеко не для каждой жидкости удастся подобрать вещество, визуализирующую стоячую волну.

Большой интерес представляют также исследования зависимости скорости звука от частоты. Для таких исследований нужно использовать излучатели ультразвука низкой и средней частоты; конструкция последнего излучателя понятна из эскиза, приведенного на рис. 9.18. Эксперименты показывают, что в первом приближении дисперсионная зависимость скорости звука в жидкостях от частоты отсутствует. Это, конечно, не означает, что явление дисперсии скорости звука для жидкостей вообще не имеет места.

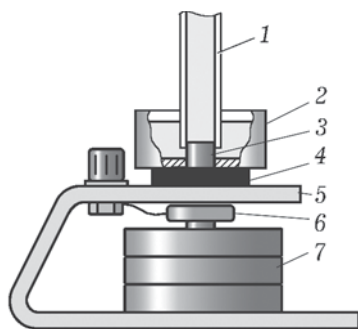


Рис. 9.18. Конструкция магнестрикционного излучателя средней частоты, используемого в ультразвуковом интерферометре: 1 — стеклянная трубка, 2 — чашечка, 3 — вибратор, 4 — резиновый диск, 5 — стойка, 6 — обмотка возбуждения, 7 — магниты

Глава 10

УПРУГАЯ ВОЛНА В ПЛАСТИНКЕ

Настало время подробнее исследовать упругие волны в тонких твердых пластинках. Начать лучше с выяснения того, какие вообще волны могут существовать в твердых телах. Затем нужно научиться возбуждать упругие волны в пластинках с помощью магнитострикционного излучателя ультразвука. Что касается визуализации ультразвуковых волн, распространяющихся в пластинках, то имеет смысл воспользоваться старинным методом порошка, который применял еще Хладни на заре становления акустики как науки. Конечно, в те далекие времена никто и не подозревал об ультразвуке, но метод Хладни сохранил свое значение до наших дней.

10.1. Упругие волны в твердом теле

Мы привыкли к тому, что звук — это *продольная* упругая волна, а свет — это *поперечная* электромагнитная волна. Однако действительность гораздо богаче сформировавшихся стереотипов: и звуковые, и световые волны могут быть как продольными, так и поперечными, да и значительно более сложными, чем эти два простейших типа волн.

В рассмотренных выше исследованиях мы имели дело в основном с продольными упругими волнами. В них частицы колеблются вдоль направления распространения волны так, что в среде распространяются деформации сжатия и растяжения. Но в твердых телах, помимо сжатия и растяжения могут возникать и иные деформации. Следовательно, в них могут распространяться не только продольные волны. Ознакомлению с видами упругих волн в твердых телах и посвящен этот параграф.

10.1.1. Виды деформаций в упругих средах. В газах частицы движутся хаотически, слабо взаимодействуя друг с другом. Если в некоторой области газа возникло возмущение в виде сжатия, то газ в этой области стремиться вернуться в исходное состояние, то есть расширится. Аналогичным образом разрежение в некоторой области газа приводит к тому, что эта область испытывает сжатие со стороны остального объема газа. В результате в газе возникает продольная упругая волна, состоящая

из чередующихся областей сжатий и разрежений. Поперечная волна в газе существовать не может потому, что при сдвиге одних частиц газа относительно других не возникают силы, стремящиеся вернуть эти частицы в исходное положение.

В жидкостях ситуация практически такая же, как в газах. Однако молекулы жидкостей сильнее взаимодействуют между собой, чем молекулы газов, образуя ближний порядок, поэтому в жидкостях на очень высоких частотах может возникнуть поперечная волна, но эта волна весьма быстро затухает. В наших исследованиях можно считать, что в газах и жидкостях существуют только продольные волны.

В твердых телах существует гораздо больше типов волн, чем в газах и жидкостях. Это вполне понятно, так как в твердом теле местоположение каждой частицы относительно соседних строго фиксировано, поэтому при смещении частицы в любом направлении возникает возвращающая сила, благодаря которой частица может совершать собственные колебания. В твердом теле возможны деформации сжатия, растяжения, сдвига, изгиба, кручения и их различные комбинации. Кратко познакомимся с возникающими при таких деформациях упругими волнами.

10.1.2. Продольная волна в твердом теле. Как уже многократно подчеркивалось, продольные упругие волны могут существовать в твердых, жидких и газообразных телах. Выражение для скорости c продольной волны в стержне, поперечный размер которого значительно меньше длины волны, получено раньше (см. п. 5.3.1):

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (10.1)$$

где E — модуль упругости Юнга, ρ — плотность среды.

Если продольная волна распространяется в неограниченном твердом теле, то ее скорость c_l^* дается формулой

$$c_l^* = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}, \quad (10.2)$$

где E — модуль упругости Юнга, σ — коэффициент Пуассона, ρ — плотность среды (рис. 10.1).

Чтобы пояснить физический смысл коэффициента Пуассона, напомним, что при растяжении и сжатии упругого стержня его поперечные размеры соответственно уменьшаются и увеличиваются. Коэффициент Пуассона или коэффициент поперечного сжатия есть отношение относительного уменьшения попереч-

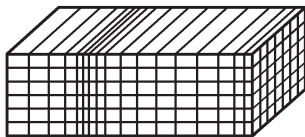


Рис. 10.1. Продольная волна сжатий и растяжений

ного размера стержня к его относительному удлинению. Для большинства твердых тел $\sigma = 0,25$. Подстановка этого значения в формулу (10.2) дает для скорости распространения продольных волн в неограниченной среде значение

$$c_l^* = 1,1 \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (10.3)$$

Эта величина сравнительно мало отличается от скорости продольной волны в стержне.

10.1.3. Поперечная волна в твердом теле. Если частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волн, то упругая волна является *поперечной* (рис. 10.2). При распространении поперечной волны в среде имеют место *деформации сдвига*: параллельные слои твердого тела сдвигаются друг относительно друга. При этом плоскость, перпендикулярная направлению сдвига, поворачивается на некоторый угол α , тангенс которого называют *относительным сдвигом*: $\gamma = \operatorname{tg} \alpha$.

При деформации сдвига подобно закону Гука (см. п. 2.2.3) механическое напряжение пропорционально относительному сдвигу

$$\frac{f}{S} = \mu \gamma. \quad (10.4)$$

Здесь коэффициент μ характеризует твердое тело по отношению к деформации сдвига и поэтому называется *модулем сдвига*. В теории упругости доказывается, что модуль сдвига μ выражается через модуль Юнга и коэффициент Пуассона соотношением

$$\mu = \frac{1}{2} \frac{E}{1 + \sigma}. \quad (10.5)$$

Повторяя для поперечной волны рассуждения, проведенные в п. 5.3.1, получаем, что скорость поперечной волны в твердом стержне выражается формулой

$$c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (10.6)$$

Поскольку коэффициент Пуассона $\sigma = 0,25$, то согласно формулам (10.5) и (10.6) $\mu = 0,4E$ и $c_t = 0,63c_l$ соответственно, то есть скорость распространения поперечной волны в стержне почти в два раза меньше скорости продольной.

В неограниченном твердом теле скорость поперечной волны такая же, как скорость поперечной волны в стержне.

Таким образом в неограниченной твердой упругой среде возможны волны только двух типов: продольные и поперечные.

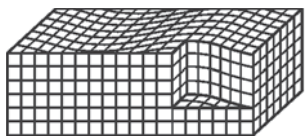


Рис. 10.2. Поперечная волна сдвига

10.1.4. Поверхностные волны в твердых телах. Подобно тому, как по поверхности воды распространяются продольно-поперечные гравитационные и капиллярные волны, по поверхности твердого тела могут распространяться продольно-поперечные упругие волны. Эти поверхностные волны по имени ученого, впервые исследовавшего их, называют *волнами Рэлея* (рис. 10.3). В волне Рэлея частицы среды описывают эллипсы, большая полуось которых перпендикулярна поверхности, а малая — параллельна направлению распространения волны. Скорость волны Рэлея примерно равна $c_R = 0,9c_t$ и не зависит от частоты. Энергия волны Рэлея локализована в приповерхностном слое толщиной, не превышающей двух длин волн.

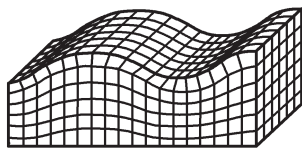


Рис. 10.3. Продольно-поперечная поверхностная волна Рэлея

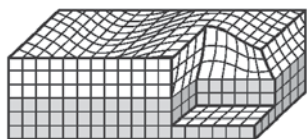


Рис. 10.4. Поперечная поверхностная волна Лява

Если на поверхность протяженного твердого тела нанесен относительно тонкий слой другого твердого тела, то в нем могут распространяться и чисто поперечные упругие волны, которые называются *волнами Лява* (рис. 10.4). Скорость их несколько больше скорости волн Рэлея и зависит от частоты.

10.1.5. Упругая волна в твердой пластинке. В твердых пластинках могут распространяться продольно-поперечные упругие волны, которые называются *волнами Лэмба*. Если толщина d пластинки достаточно мала ($\omega d/c_t \ll 1$), то в пластинке возможно распространение только двух типов волн Лэмба: продольной (см. рис. 10.1) и изгибной (рис. 10.5).

Теория показывает, что скорость продольной волны в пластинке выражается формулой

$$c = c_l \sqrt{\frac{1 - 2\sigma}{(1 - \sigma^2)}}, \quad (10.7)$$

где σ — коэффициент Пуассона. Это значение мало отличается от скорости продольной волны в неограниченном твердом теле.

10.1.6. Изгибная волна в твердой пластинке. Как уже говорилось, изгибная волна в твердой пластинке является продольно-поперечной (рис. 10.6).

Направление распространения

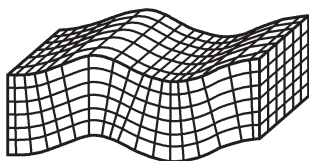


Рис. 10.5. Изгибная продольно-поперечная волна

Теоретическое изучение распространения звука в пластинках показывает, что, если вертикально расположенным вибратором

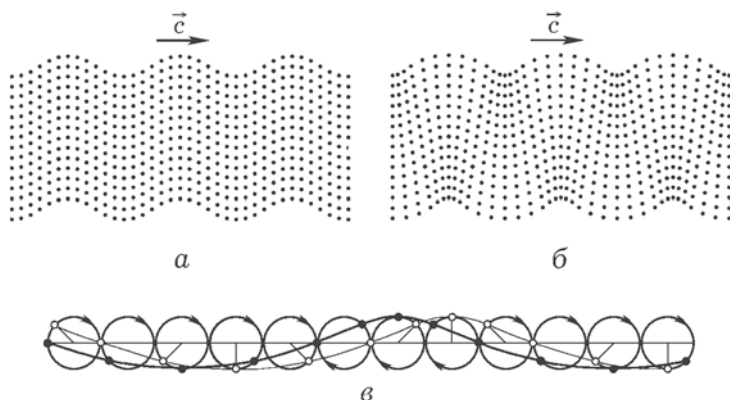


Рис. 10.6. В поперечной волне частицы смещаются перпендикулярно направлению распространения волны (а); в изгибной волне частицы колеблются одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль и поперек направления распространения волны (б); при сложении взаимно перпендикулярных колебаний частицы движутся по эллиптическим траекториям (в)

коснуться поверхности тонкой пластинки, то в ней распространяется изгибная волна, скорость которой определяется выражением

$$c_{\text{и}} = \frac{\pi d}{\lambda_{\text{и}}} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} = \sqrt{\pi d \nu} \sqrt[4]{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}}, \quad (10.8)$$

где d — толщина пластинки, $\lambda_{\text{и}}$ — длина изгибной волны, ν — ее частота, ρ — плотность материала пластинки, E — модуль упругости и σ — коэффициент поперечного сжатия Пуассона.

Поскольку изгибная волна возбуждается вибратором, колеблющимся в направлении, перпендикулярном к плоскости пластинки, кажется вполне разумным допущение, что изгибная волна поперечна. На самом же деле, как показывают теория и эксперимент, изгибная волна одновременно и продольна, и поперечна (рис. 10.6).

10.2. Фигуры Хладни

Хладни был первым, кто целенаправленно исследовал колебания тонких пластинок, не подозревая, впрочем, что имеет дело с изгибными волнами и их интерференцией. Для возбуждения колебаний он использовал скрипичный смычок, а для их визуализации — мелкий сыпучий порошок. В ваших исследованиях

возбуждение изгибной волны в тонких пластинках естественно осуществлять посредством магнитострикционного излучателя.

10.2.1. Фигуры Хладни на изотропной круглой пластинке. Из эбонита, оргстекла или дюралья толщиной 1–2 мм вырежьте круг диаметром 10–15 см. Положите круг на мягкую подложку, в качестве которой лучше всего использовать слой поролона или полиуретана толщиной около 1 см, подойдут и несколько листов тонкой газетной бумаги. Равномерно посыпьте диск мелкими кристалликами какого-либо не прилипающего к нему вещества. Если диск изготовлен из светлого материала, то в опытах удобно использовать марганцовокислый калий, если из темного — нашатырь, хлорноватокислый калий, сахарный песок. Можно взять обычный речной песок, который в этом случае необходимо промыть и высушить.

Торцом вибратора расположенного вертикально магнитострикционного излучателя прикоснитесь к центру круга. Включите ультразвук. При этом кристаллики на поверхности диска сразу придут в движение и через несколько секунд обозначат concentрические круговые линии (рис. 10.7).

Отсюда следует, что в круглой пластинке устанавливается стоячая ультразвуковая волна: частицы порошка сбрасываются с пучностей колебаний этой волны и собираются в ее узлах.

Стоячая волна возникает, очевидно, благодаря интерференции падающей от излучателя и отраженной краем пластинки бегущих волн. Поскольку отражение происходит от акустически менее плотной среды, на краю должна образоваться пучность смещений стоячей волны (см. п. 5.1.2). Эксперимент подтверждает это: первый узел отстоит от края пластинки на расстояние, равное половине проме-



Рис. 10.7. Хладниевы фигуры на круглой пластинке, полученные при возбуждении колебаний в ее центре: *а* — пластинка из эбонита; *б* — пластинка из оргстекла; *в* — пластинка из дюралья



ХЛАДНИ Эрнст Флоренс Фридрих (1756–1827). Немецкий физик. Основные работы в области акустики. Открыл продольные колебания струн, стержней, пластин, камертонов, колоколов, вращательные колебания стержней. Первый тщательно и точно исследовал колебания камертона, установил законы колебания стержней. Открыл и описал «акустические фигуры», получаемые вследствие колебания упругой пластины, посыпанной песком (фигуры Хладни). Хладни — первый достаточно точно измерил скорость распространения звука в различных газах. Вопреки господствующему тогда мнению

доказал, что в твердых телах звук распространяется не мгновенно, а с конечной скоростью, и определил скорость звука в твердых телах по отношению к скорости в воздухе. Объяснил эхо, экспериментально определил верхний порог слышимости звука.

жутка между любимыми соседними узлами. Так как расстояние между соседними узлами равно половине длины волны ультразвука в пластинке, то первый узел — в полном соответствии с теорией — образуется на расстоянии четверти длины волны от края пластинки.

Возбуждая изгибную волну в центре изготовленных из одного материала дисков одинакового радиуса, но разной толщины,

вы обнаружите, что расстояния между соседними узлами образующихся в них стоячих волн различны. Это означает, что различны длины интерферирующих изгибных волн. Поскольку при использовании одного и того же излучателя частота волн остается неизменной, из опыта следует, что скорость распространения изгибной волны зависит от толщины диска. Используя диски одинакового радиуса и одинаковой толщины, но изготовленные из различных материалов, нетрудно убедиться, что скорость изгибных волн зависит от упругих параметров тонкой пластинки.



Рис. 10.8. Фигуры Хладни на круглой эбонитовой пластинке, полученные при возбуждении колебаний вблизи ее края

Прикасаясь вибратором работающего магнитострикционного излучателя к различным точкам посыпанного порошком диска, вы увидите, что при этом каждый раз получаются разные фигуры Хладни (рис. 10.8).

10.2.2. Фигуры Хладни на анизотропной круглой пластинке. Из текстолита толщиной 1–2 мм вырежьте диск диаметром 100–120 мм. Текстолитовый диск положите на пороновую

прокладку, поверхность диска равномерно посыпьте нашатырем и поставьте торец вибратора в центр диска так, чтобы вибратор был ориентирован вертикально. Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором. Вы увидите, что моментально порошок на поверхности диска перераспределится так, что окажутся обозначенными узловые линии (рис. 10.9).

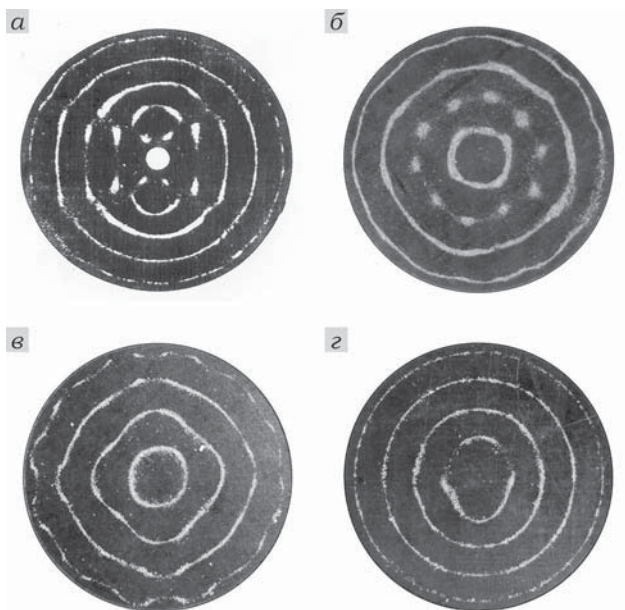


Рис. 10.9. Фигуры Хладни на круглых пластинках из текстолита: пластинки из текстолита разных сортов и толщины

Но теперь система узловых линий мало похожа на те фигуры Хладни, которые вы наблюдали в аналогичных опытах с дисками из эбонита, оргстекла и дюралю (рис. 10.7). Правда, две ближайшие к краю диска узловые линии близки к окружностям, но чем дальше от края и ближе к центру диска проходит узловая линия, тем меньше она напоминает окружность.

Чтобы объяснить результат опыта, нужно вспомнить, что расстояния между соседними узлами стоячей волны равны половине длины волны в той среде, в которой она получена. В опытах упругая изгибаемая волна распространяется от центра диска, где она возбуждается вибратором, по радиусам к его краю и, отразившись от края, возвращается к центру вновь по радиусам. Фигуры Хладни на текстолитовом диске свидетельствуют о том, что по различным радиусам устанавливаются разные стоячие волны. Так как частота ν волны, очевидно, не зависит от направления

ее распространения (она определяется частотой источника), то различие длин волн λ по разным радиальным направлениям может быть объяснено только различными значениями скорости изгибной волны в этих направлениях: $c = \lambda\nu$.

Итак, проделанный вами опыт показывает, что текстолит является *анизотропной средой*, в которой скорость упругих волн зависит от направления распространения. Причину этого понять нетрудно, если внимательно посмотреть на структуру текстолитовой пластинки: хорошо видна матерчатая основа этого материала, которая пропитана соответствующими смолами.

10.2.3. Фигуры Хладни на пластинках произвольной формы. Вырежьте из однородного изотропного материала (стекло, оргстекло, дюраль, латунь, эбонит и т. д.) треугольную, квадратную и прямоугольную пластинки. Поместите их на го-

ризонтально лежащую поролоновую прокладку, равномерно посыпьте сыпучим порошком и возбуждите в пластинках изгибные волны, прикасаясь в разных точках к их поверхностям вертикально расположенным вибратором магнитострикционного излучателя. Вы будете наблюдать самые разнообразные хладниевы фигуры (рис. 10.10). Существенно то, что все они могут достаточно точно рассчитаны. Соответствующая теория, конечно, не проста — иначе мы бы ее здесь изложили. Но это вовсе не значит, что при желании вы не сможете овладеть ею. Впрочем, в наши дни, возможно,

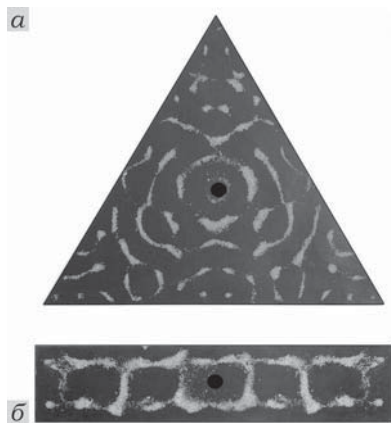


Рис. 10.10. Фигуры Хладни, полученные в пластинках треугольной (а) и прямоугольной (б) формы

более интересно составить компьютерные программы, моделирующие реальные явления, и затем сравнить результат с натурным экспериментом.

10.3. Дисперсия изгибных волн

Проделанные вами опыты показывают, что дисперсия упругих волн в газах (п. 8.2.2) и жидкостях (п. 9.3.6) практически отсутствует. А как дело обстоит для упругих волн в твердых пластинках? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно провести соответствующее исследование.

10.3.1. Явление дисперсии изгибных волн. Напомним выражение для скорости изгибной волны частотой ν в пластинке толщиной d и плотностью ρ , материал которой характеризуется коэффициентом поперечного сжатия σ и модулем упругости E :

$$c_{\text{и}} = \sqrt{\pi d \nu} \sqrt[4]{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}}. \quad (10.9)$$

Сравнив это выражение с формулой (5.24) $c = \sqrt{E/\rho}$, определяющей скорость продольной волны в стержне, нетрудно видеть, что скорость звука в пластинке, в отличие от скорости звука в стержне, зависит от частоты или длины изгибной волны. Такое явление, как уже отмечалось выше, называется *дисперсией скорости звука*.

Для каждой данной пластинки величина

$$\sqrt{\pi d} \sqrt[4]{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}}$$

постоянна. Значит, формула (10.9) утверждает, что скорость изгибной волны в упругой пластинке пропорциональна корню квадратному из частоты волны. Этот дисперсионный закон можно записать следующим образом:

$$c_{\text{и}} \sim \sqrt{\nu}. \quad (10.10)$$

Поскольку $c_{\text{и}} = \lambda_{\text{и}} \nu$, отсюда следует, что

$$\lambda_{\text{и}} \sim \frac{1}{\sqrt{\nu}}. \quad (10.11)$$

Таким образом, теория показывает, что скорость изгибной волны прямо пропорциональна корню квадратному из ее частоты, а длина изгибной волны в пластинке обратно пропорциональна корню квадратному из ее частоты. Чтобы подтвердить эти дисперсионные зависимости, вам осталось лишь убедиться на опыте, что так и есть на самом деле.

10.3.2. Экспериментальное исследование дисперсии изгибных волн. Длину изгибной волны естественно определять методом стоячей волны в круглой пластинке (п. 10.2.1), возбуждаемой ультразвуком в ее центре. Для этого измерьте расстояние между соседними узлами хладниевой картины и вы получите значение половины нужной величины. Частоту ультразвука можно изменять, применяя в магнитострикционном излучателе вибраторы разных длин. Основная собственная частота вибратора длиной l по формуле (5.5) равна $f = c/2l$, где c — скорость звука

в феррите. Подставляя это значение частоты в формулу (10.11), получаем, что

$$\lambda_{\text{и}} \sim \sqrt{l}. \quad (10.12)$$

Таким образом, если вы экспериментально покажете, что длина изгибной волны в пластинке пропорциональна корню квадратному из длины вибратора, используемого для получения в пластинке этой волны, то тем самым докажете справедливость формулы (10.9) и одновременно убедитесь в существовании дисперсии для изгибных волн.

Изготовьте ферритовые вибраторы длиной 20, 40, 80, 120 и 160 мм и ими возбуждайте колебания в центре одной и той же круглой пластинки. Измерьте соответствующие разным частотам длины изгибных волн. Чтобы повысить точность измерений, вы можете вначале найти расстояние между несколькими (например, десятью) узловыми линиями, а затем поделить его на число промежутков между узлами и умножить на два. Результаты измерений занесите в таблицу.

Далее обработайте полученные результаты непосредственных измерений. Формулу (10.12) можно переписать в виде $\lambda_{\text{и}} = a\sqrt{l}$, где a — некий коэффициент. Чтобы избавиться от него, поделите все значения длины вибратора и длины изгибной волны на наибольшие l_m и $\lambda_{\text{и}m}$. По полученным данным нанесите в декартовой системе координат точки, соответствующие экспериментальным результатам. Теперь вычислите значения $\sqrt{l/l_m}$ и постройте в той же системе координат график функции $y = \sqrt{l/l_m}$. Вы обнаружите, что экспериментальные точки неплохо ложатся на теоретически построенный график (рис. 10.11 а). Тем самым вы доказали справедливость формулы (10.12), а значит, и формулы (10.10).

Во многих случаях для подтверждения справедливости предполагаемой зависимости между физическими величинами удобно строить график так, чтобы получалась прямая линия. С этой целью в нашем случае следует использовать систему координат \sqrt{l} О $\lambda_{\text{и}}$. На рис. 10.11 б показано, что тогда получается.

Внимательно проанализируйте проведенные выше рассуждения. Убеждены ли вы в том, что экспериментально подтвердили справедливость теории? Во всяком случае, вы должны хорошо представлять себе главное, что сделали: доказали, что скорость звука в пластинке пропорциональна корню квадратному из частоты.

Чтобы исключить всякие сомнения в справедливости этого вывода, попробуйте расширить диапазон частот, в котором он экспериментально обоснован. Для этого изгибные волны в пластинке возбуждайте колеблющимися стеклянными труб-

ками длиной порядка одного метра (см. п. 1.2.2). Конечно, предварительно вам потребуется определить скорость звука

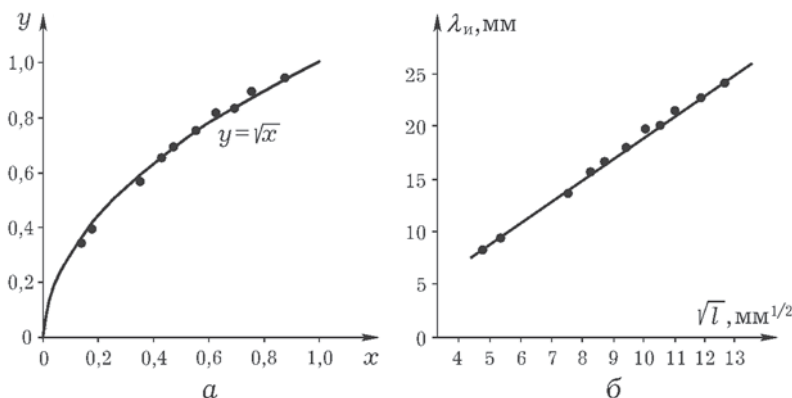


Рис. 10.11. Результаты исследования дисперсии изгибных волн: а — зависимость между длиной изгибной волны в пластинке и длиной вибратора нелинейна (на графике $x = l/l_m$, $y = \lambda_n/\lambda_{nm}$); б — линейная зависимость λ_n от \sqrt{l}

в них, но мы надеемся, что с этой задачей вы справитесь самостоятельно.

10.4. Поверхности равных фаз изгибных волн

В современном стандарте школьного физического образования прямо говорится, что одна из основных задач обучения физике заключается в овладении учащимися сущностью метода научного познания. Решением этой задачи без лишних слов мы занимаемся на протяжении всей книги. Однако имеет смысл и в явном виде проиллюстрировать метод научного познания учебным исследованием конкретного физического явления.

10.4.1. Волны на бумаге. Глядя на распространение волн по поверхности воды, можно без труда разглядеть движение отдельных гребней, поскольку частота этих волн достаточно мала. Если же волны распространяются с высокой частотой, то на первый взгляд кажется, что нельзя увидеть волновую поверхность определенной фазы. Однако эксперимент показывает, что в некоторых случаях можно «остановить» волну и сделать видимыми ее линии равных фаз.

На мягкую подкладку, состоящую из нескольких слоев тонкой бумаги, поместите плотный бумажный лист белого цвета. На лист через марлевое сито тонким слоем равномерно насыпьте мелкий песок. Расположив излучатель под углом примерно 45° к горизонту, прикоснитесь концом его вибратора к центру

листа бумаги и настройте ультразвуковой генератор в резонанс с вибратором. При этом песок на листе бумаги быстро перераспределится так, что станут видны круговые волны с центром в точке прикосновения вибратора (рис. 10.12). Опыт не удастся, если вибратор излучателя расположить вертикально: песчинки

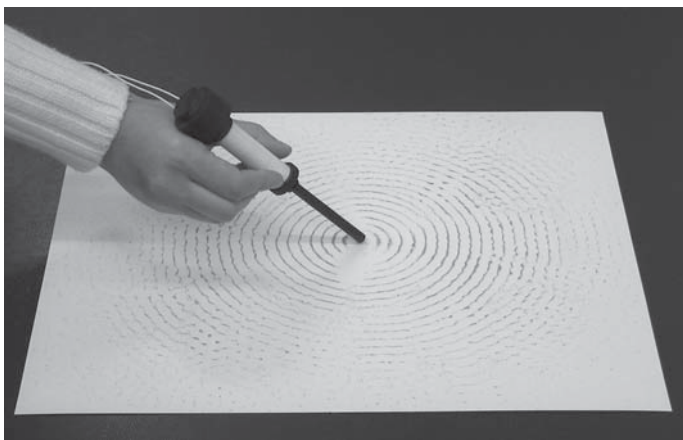


Рис. 10.12. Визуализация изгибной волны в плотном листе бумаги

на поверхности листа интенсивно колеблются, однако никакой картины волн не видно. Для получения хорошей картины волн необходимо экспериментально подобрать подложку, его толщину и сорт листа бумаги.

Результат опыта при вертикально расположенном излучателе можно объяснить так: вибратор, колеблющийся в направлении, перпендикулярном листу, возбуждает в нем бегущую изгибную волну. Эта волна, проходя через точки листа, приводит в колебательное движение частицы порошка, находящиеся в этих точках, но не перемещает их. Поэтому никакой картины волн не возникает.

Если излучатель расположен наклонно, то на бумажном листе образуется стационарная картина волн. Чем объясняется это явление?

10.4.2. Цикл научного познания. Великий Альберт Эйнштейн, умудренный жизненным опытом фундаментальных физических открытий, в письме другу юности разъяснил суть метода научного познания. Он писал, что в основе физической теории всегда лежат факты. Они нуждаются в объяснении и являются предпосылкой теоретической модели, которая возникает интуитивно как догадка ума, размышляющего над фактами. Справедливость этой модели нуждается в экспериментальном обосно-

вании, которое, как правило, нельзя получить непосредственно. Поэтому из модели логически с использованием математики выводят следствия. Обдумывая следствия, интуитивно приходят к идее эксперимента, который может либо подтвердить, либо опровергнуть их. Далее проводят эксперимент и, если все следствия модели подтверждаются опытом, то теоретическая модель в области ее применимости считается верной. Подтвержденная теоретическая модель становится новым фактом. Так циклично происходит процесс научного познания.

Русский педагог В. Г. Разумовский¹⁾ в середине прошлого века пришел к выводу, что оптимальным будет такое обучение физике, которое происходит в соответствии с циклом научного познания А. Эйнштейна.

За прошедшие десятилетия этот вывод многократно подтвержден многочисленными исследованиями в дидактике физики и, как уже отмечалось, в настоящее время положен в основу стандарта физического образования.

На рис. 10.13 а схематически изображен цикл Эйнштейна научного познания, в результате которого возникает новая физическая теория, поэтому будем называть его циклом теоретического познания или короче *теоретическим циклом*. С ним вы хорошо

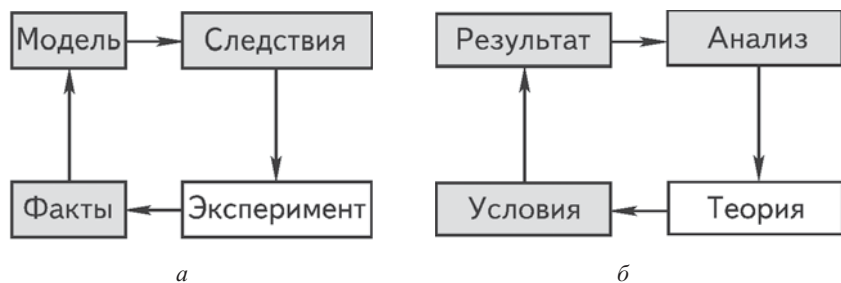


Рис. 10.13. Теоретический (а) и экспериментальный (б) циклы научного познания

знакомы по школьным учебникам физики, которые в большинстве своем носят теоретический характер и построены в соответствии со схемой: факты → модель → следствия → эксперимент. Эксперимент в них играет вспомогательную роль, подтверждая, а чаще просто иллюстрируя, следствия теории. Традиционный урок физики включает теоретическое изучение материала, решение физических задач и демонстрационный эксперимент иллюстративного характера.

¹⁾ Разумовский В. Г. Развитие творческих способностей учащихся в процессе обучения физике. — М.: Просвещение, 1975.

Но научные открытия совершаются не только в теоретических, но и в экспериментальных исследованиях. В них создаются условия для возникновения предполагаемого явления, выполняется эксперимент, дающий определенный результат, проводится анализ полученного результата и на его основе строится теория. Структура *экспериментального цикла* научного познания условия → результат → анализ → теория схематически приведена на рис. 10.13 б.

Сравнение теоретического и экспериментального циклов познания показывает, что они симметричны и совершенно равноправны. Поэтому полный цикл научного познания может быть изображен схемой, представленной на рис. 10.14.

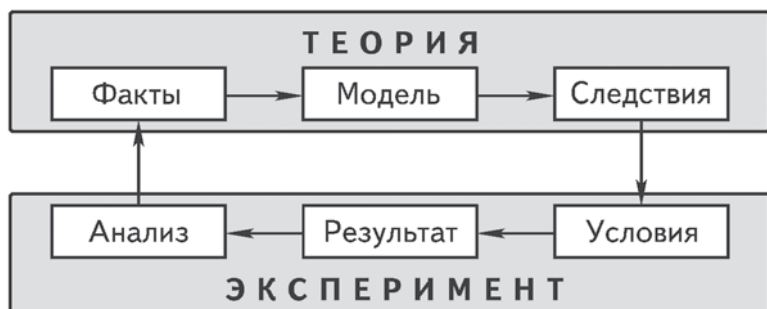


Рис. 10.14. Полный цикл научного познания

Знание схем научного познания отнюдь не свидетельствует о том, что вы тут же начнете в изобилии совершать великие открытия. Чтобы это делать, нужно заниматься реальными исследованиями. Схемы же нужны лишь для того, чтобы несколько упорядочить свою деятельность. Действительно, далеко не всякая наша догадка — это истина, и далеко не все, что мы наблюдаем, — это реальность. Нужно уметь делать не только «открытия», но и «закрытия». Одним словом, нужно радостно жить, постигая этот мир во всем его бесконечном разнообразии, используя, если нужно, любые схемы, но не заикливаясь на них.

Поэтому здесь мы покажем, как реализуются циклы теоретического и экспериментального познания конкретного физического явления, которое можно назвать *волнами на бумаге* или, для тех, кто любит высокий штиль, *визуализацией линий равных фаз изгибающей волны* в тонкой упругой пластинке.

10.4.3. Учебная физическая теория. Вначале рассмотрим исследование явления визуализации линий равных фаз изгибающей волны в теоретическом цикле научного познания.

Факты

Известно, что если в тонкой упругой пластинке вибратором в направлении, перпендикулярном пластинке, возбудить колебания, то по пластинке будет распространяться изгибная волна, скорость которой

$$c = \sqrt{\pi d \nu} \sqrt[4]{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}}, \quad (10.13)$$

где d — толщина пластинки, ν — частота колебаний, E — модуль упругости, ρ — плотность материала, σ — коэффициент поперечного сжатия.

Если пластинка имеет небольшие размеры, то отраженная ее краем волна интерферирует с падающей так, что в пластинке устанавливается стоячая волна. Распределение узлов и пучностей ее можно сделать видимым (рис. 10.15), если посыпать пластинку легким сыпучим порошком (фигуры Хладни).

Опыт показывает, что при увеличении размеров пластинки хладниевы фигуры не образуются — порошок просто колеблется на поверхности пластинки, не собираясь в определенные линии. Это объясняется тем, что вблизи вибратора отраженная волна имеет существенно меньшую интенсивность по сравнению с падающей. В таком случае результат наложения двух волн не дает контрастного или устойчивого во времени распределения интенсивности.

Однако, если в тех же условиях вибратор расположить не перпендикулярно, а под углом к поверхности пластинки, то опять появляется устойчивое распределение порошка в виде концентрических равноотстоящих друг от друга окружностей с центром в точке возбуждения колебаний.

Модель

От наклонного вибратора по пластинке распространяется бегущая изгибная волна. Но в этом случае равномерно распределенный по поверхности порошок должен оставаться на своих местах, совершая колебания, вызванные проходящей волной. Од-

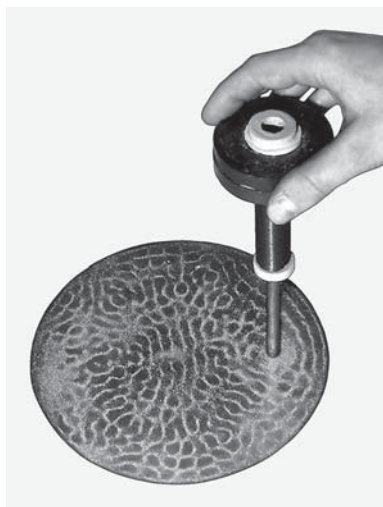


Рис. 10.15. Фигуры Хладни при возбуждении колебаний в произвольной точке дюралевого диска

нако порошок собирается в линии. Это явно узловые линии, так как в их точках колебания отсутствуют. Но узлы присущи не бегущей, а стоячей волне, которая может возникнуть лишь при интерференции по крайней мере двух волн.

Поэтому разумно предположение, что от излучателя по пластинке помимо изгибной распространяется еще одна волна. Допустим, что это продольная волна.

Обе волны, идущие в пластинке от вибратора, имеют одинаковые частоты, но различные длины волн. Поэтому каждая точка среды участвует в двух колебаниях, и ее смещение определяется суммой смещений, обусловленных этими колебаниями. Таким образом, волны складываются, при этом точки среды, в которые волны приходят в противофазе, находятся в покое. Поскольку частоты волн одинаковы, области, состоящие из покоящихся точек, имеют неизменное положение на листе. В них и скапливается порошок.

Пусть от вибратора вдоль оси x распространяются изгибная и продольная волны одинаковой частоты ω и амплитуды a :

$$s_1 = a \sin(\omega t - k_1 x) \quad \text{и} \quad s_2 = a \sin(\omega t - k_2 x), \quad (10.14)$$

где $k_1 = 2\pi/\lambda_1$ и $k_2 = 2\pi/\lambda_2$ — волновые числа, λ_1 и λ_2 — длины изгибной и продольной волн соответственно. Результирующая волна

$$s = s_1 + s_2 = 2a \cos \frac{k_1 - k_2}{2} x \cdot \sin \left(\omega t - \frac{k_1 + k_2}{2} x \right) \quad (10.15)$$

тоже бегущая волна той же частоты, что и составляющие волны, но в отличие от них имеющая не постоянную, а зависящую от координаты амплитуду:

$$A = 2a \cos \frac{k_1 - k_2}{2} x. \quad (10.16)$$

Результирующая амплитуда обращается в нуль при условии, что аргумент косинуса равен нечетному числу $\pi/2$:

$$\frac{k_1 - k_2}{2} x = (2n + 1) \frac{\pi}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

то есть в точках с координатами

$$x = \frac{2n + 1}{2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (10.17)$$

Очевидно, геометрические места таких точек образуют концентрические окружности, отстоящие друг от друга на одинаковые расстояния

$$\Delta x = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (10.18)$$

Построенная модель явления позволяет сделать предположения, допускающие экспериментальную проверку.

Следствия

В рамках рассмотренной теоретической модели сделаем количественные оценки условий конкретного эксперимента.

Пусть в качестве пластинки используется тонкий лист дюрала размером $0,3 \times 500 \times 700$ мм. Подставляя в формулу (10.13) значения $d = 0,3$ мм, $\nu = 19 \cdot 10^3$ Гц, $E = 7,0 \cdot 10^{10}$ Па, $\rho = 2700$ кг/м³, $\sigma = 0,32$, получаем скорость изгибной волны 236 м/с. Тогда длина изгибной волны в дюралевой пластинке $\lambda_1 = 12,4$ мм.

Скорость продольной волны в дюрале $c = 6400$ м/с и ее длина волны $\lambda_2 = c/\nu = 337$ мм. Подставляя найденные значения длин волн в формулу (10.18), находим, что расстояние Δx между соседними линиями, обозначенными порошком, $\Delta x = 12,9$ мм, что достаточно близко к вычисленному по формуле (10.13) значению длины изгибной волны $\lambda_1 = 12,4$ мм.

Продольная волна в рассматриваемом случае может считаться опорной. Действительно, так как $\lambda_2 \gg \lambda_1$, то на расстоянии, содержащем сравнительно много длин волн λ_1 , фаза опорной волны изменяется незначительно, поэтому расстояние между соседними окружностями, обозначенными порошком, практически равно λ_1 . Это следствие теории вытекает также из формулы (10.18).

Эксперимент

Подберите прямоугольный лист из дюрала, латуни, жести или из другого материала. Микрометром или штангенциркулем определите как можно точнее его толщину и по справочнику или приведенной ниже табл. 1 — упругие характеристики. Вычислите скорость и по ней определите длину изгибной волны в пластинке, которую вы подготовили. Экспериментально исследуйте явления, связанные с распространением продольной и изгибной волн в тонкой упругой пластинке.

Таблица 1

Вещество	ρ , кг/м ³	E , ГПа	σ	c , м/с
Сталь	7800	216	0,28	6100
Медь	8960	110	0,35	4700
Латунь	8500	100	0,37	4250
Алюминий	2700	70	0,32	6400

Экспериментальная проверка полученных следствий теоретической модели показывает, что расстояние между узловыми линиями на листе дюрала при указанных условиях в пределах погрешности совпадает с вычисленным. Таким образом, эксперимент подтверждает следствия теории, значит, теория исследуемого явления в области ее применимости верна.

Заметим, что существует глубокая аналогия между исследованным здесь методом визуализации линий равных фаз изгибной волны и методом нахождения точек равной фазы звуковой волны в воздухе, рассмотренным раньше в § 2.3. И в том, и в другом методах используется опорный сигнал неизменной фазы, во всех точках волнового поля представляющий собой колебание той же частоты, что и исследуемая волна. Но в первом методе опорный сигнал реализуется как продольная волна, а во втором — как переменное электрическое напряжение.

10.4.4. Учебный физический эксперимент. Теперь рассмотрим исследование того же самого явления визуализации линий равных фаз изгибной волны в экспериментальном познавательном цикле.

Условия

Лист дюрала прямоугольной формы толщиной 0,3 мм и размером примерно 50×70 см поместите на горизонтальную поверхность и равномерно посыпьте легким сыпучим порошком. К ультразвуковому генератору подключите магнитострикционный излучатель низкой частоты и настройте генератор в резо-



Рис. 10.16. Если ориентированным вертикально вибратором излучателя прикоснуться к посыпанной песком пластинке, то песчинки на ней просто колеблются. Более или менее упорядоченные линии, в которых собирается песок, обусловлены интерференцией волн, идущей от излучателя и отраженных от краев пластинки

нанс с вибратором. Вибратор расположите сначала вертикально, затем наклонно и в этих положениях концом вибратора прикоснитесь к поверхности листа (рисунки 10.16 и 10.17).



Рис. 10.17. Концентрические линии обозначаются порошком в результате касания поверхности тонкой пластинки наклонным излучателем

Затем из такого же листа дюралю вырежьте диск диаметром примерно 20 см и повторите опыт, прикасаясь вибратором к центру диска (рис. 10.18).

Результат

Вы будете наблюдать, что когда вибратор расположен вертикально, на большом прямоугольном листе порошок только колеблется, не перераспределяясь по листу, а на диске порошок перераспределяется, собираясь в равноотстоящие друг от друга окружности. Расстояние между соседними окружностями, в которых собрался порошок, составляет 6 мм, причем первая окружность отстоит от края диска на 3 мм.

Когда вибратор расположен наклонно, картина на поверхности диска практически не изменяется, а на поверхности прямоугольного листа порошок собирается в концентрические круговые линии с центром в точке касания вибратором, причем расстояние между соседними линиями составляет 12 мм.

Анализ

Допустим, что от вертикально расположенного вибратора по листу распространяется изгибная волна. Тогда, если лист имеет большие размеры, через каждую его точку проходит бегущая

волна, которая вызывает колебания порошка и по мере распространения затухает (рис. 10.16).

Если изгибная волна распространяется от центра диска сравнительно небольшого радиуса, то, дойдя до его края, она практически полностью отражается назад и идет к центру. Две когерентные волны примерно одинаковой амплитуды интерферируют, и в пластинке возникает стоячая изгибная волна: порошок сбрасывается с пучностей и собирается в ее узлах, отстоящих друг от друга на половину длины волны. Очевидно, на краю диска образуется пучность стоячей волны, следовательно, первый узел должен отстоять от края на расстояние, в два раза меньшее расстоя-

ния между любыми соседними узлами. Это и показывает результат эксперимента (рис. 10.18).

Расположив излучатель под углом к большому листу, мы получаем на нем картину узловых линий, подобную той, которая наблюдалась на диске. Но теперь расстояние между соседними узловыми линиями (рис. 10.17) в два раза больше того, которое получалось на диске. Значит, на листе порошок собирается в точках минимумов, отстоящих друг от друга не на полволны, как на диске, а на целую длину изгибной волны.

Рис. 10.18. Расстояние между соседними узловыми линиями составляет примерно половину измеренного в опыте, фотография которого приведена на рис. 10.17

изгибная волна окажется в противофазе с колебаниями листа и получатся узловые линии, наблюдающиеся в опыте.

Но лист как единое целое в опыте не колеблется — просто вибратор расположен наклонно к его поверхности. Значит, наряду с изгибной волной вибратор возбуждает в листе еще и такую волну, длина которой соизмерима с размерами листа. Поэтому вторая волна вызывает практически синфазные колебания всех точек листа. Но такой волной может быть только продольная волна в материале листа: при наклонном положении вибратор наряду с поперечными возбуждает в листе продольные колебания, которые и порождают продольную волну.



Теория

Анализ результатов эксперимента позволяет продумать план построения теории явления. Во первых, необходимо вычислить скорость распространения продольной упругой волны в тонкой пластинке, а по ней определить длину продольной волны. Во-вторых, нужно найти выражение для скорости изгибной волны через геометрические и упругие параметры пластинки и вычислить длину изгибной волны. Далее, следует теоретически изучить условия возбуждения одновременно продольной и изгибной волн в тонкой пластинке. Наконец, нужно разобраться с тем, как эти волны взаимодействуют и т. д. В результате будет создана количественная теория явления, следствия которой можно будет проверить экспериментом.

Вы, конечно, помните, что такая теория действительно создана, причем значительный вклад в ее разработку внес Лэмб (см. п. 10.1.5). Теория эта сложна и не может быть здесь изложена. Но ее следствиями являются выражения (10.13) и (10.18), которые позволяют вычислить скорости и длины продольной и изгибной волн в тонкой упругой пластинке. При этом, как вы уже убедились, получаются результаты, полностью совпадающие с данными эксперимента.

Таким образом, рассмотренный в этом параграфе пример показывает, что физическое исследование одинаково успешно может быть осуществлено в рамках как теоретического, так и экспериментального познавательных циклов. Лучше сказать так: полноценное физическое исследование представляет собой неразрывное единство теории и эксперимента. При этом несущественно, что послужило первоначальным толчком к проведению исследования: внезапная догадка или удачное наблюдение.

10.5. Стоячая волна в стеклянном сосуде

Упругие волны существуют, конечно, не только в плоских, но и в изогнутых тонких пластинках. Первое, что в связи с этим приходит в голову, — это сделать из пластинки цилиндр и посмотреть, на каких частотах он возбуждается. Такие исследования действительно произведены, но их рассмотрение увело бы нас слишком далеко.

Другой пример волн в тонкой изогнутой оболочке, который у каждого из нас на слуху — это колокол. Известно, что звучащий на основной собственной частоте колокол разделен меридиональными узловыми линиями на 4 равные части. Иными словами, вдоль окружности колокола устанавливается стоячая упругая волна, состоящая из четырех пучностей и четырех узлов. Гармоники соответствуют разделению колокола плоскостями, про-

ходящими через его ось вращения, на 6, 8, 10 и т. д. равных частей.

Явления возбуждения колебаний в цилиндрических и сферических оболочках весьма красивы и поучительны. Мы, к сожалению, не имеем возможности заниматься ими сколько-нибудь подробно. Поэтому кратко рассмотрим здесь лишь два впечатляющих опыта. Подробно исследовать обнаруживающиеся в них явления, если они вас заинтересовали, вы вполне сможете самостоятельно.

10.5.1. Стоячая волна в стеклянном стакане. Для опытов используйте стеклянный химический стакан с ровным дном и тонкими стенками. На дно налейте слой суспензии алюминиевой краски в ацетоне толщиной порядка 5 мм. Магнитострикционный излучатель ультразвука низкой частоты поставьте на стол вертикально, включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором. К верхнему торцу вибратора дном прижмите стакан с суспензией алюминиевой краски в ацетоне. При этом в зависимости от места контакта вибратора с дном стакана вы будете наблюдать различные картины стоячих волн. На рис. 10.19 приведена фотография одного из результатов описанного опыта.

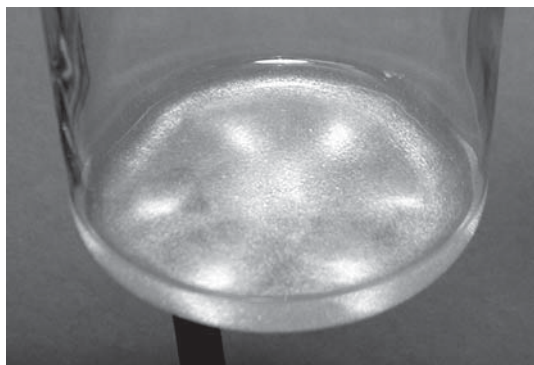


Рис. 10.19. Стоячая волна в дне стеклянного химического стакана, визуализированная суспензией алюминиевой краски в ацетоне

В нем использовался химический стакан емкостью 250 мл и диаметром 60 мм, причем возбуждение осуществлялось в точке, отстоящей на 10 мм от центра дна стакана. Попробуйте изменять положение точки возбуждения упругой волны, перемещая ее по дну стакана. Возбудите упругую волну в стенке стакана, прижав к ней вибратор сбоку. Изменяйте толщину слоя жидкости и акустический контакт между ферритом вибратора и стеклом стакана. Одним словом, экспериментально исследуйте это интересное явление настолько тщательно, насколько сможете.

10.5.2. Стоячая волна в стенках стеклянной колбы.

В стеклянную круглодонную колбу объемом 500 мл с тонкими стенками налейте немного ацетона так, чтобы образовался слой высотой 1–2 см. Герметично закройте колбу резиновой пробкой и поместите ее на торец ферритового вибратора вертикально стоящего на столе магнитострикционного излучателя низкой частоты. Включите ультразвуковой генератор.

При достаточно хорошей настройке в резонанс вы увидите вблизи середины поверхности ацетона нечто, напоминающее небольшой фонтанчик. Поверхность жидкости вблизи него сильно колеблется так, что фонтанчик то появляется, то проваливается внутрь жидкости.

Вдоль стенки колбы поверхность ацетона принимает волнообразный вид. Наклоняя колбу в сторону так, чтобы вибратор касался ее сбоку, вы заметите, что местами жидкость довольно высоко поднимается по стенке и слегка распыляется внутрь колбы. Проведя пальцами по стенке колбы, вы почувствуете, что на ее поверхности есть области, которые интенсивно колеблются. Значит, в стеклянной колбе устанавливается стоячая упругая волна.

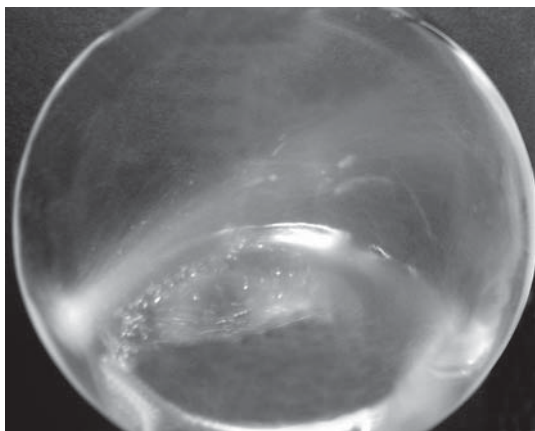


Рис. 10.20. В стенке стеклянной колбы устанавливается стоячая волна, в пучностях которой происходит распыление жидкости

Переверните колбу так, чтобы жидкость заполнила ее горловину, оказавшуюся снизу и сбоку. Прижмите колбу к вибратору магнитострикционного излучателя тем местом, возле которого сферическая поверхность переходит в цилиндрическую. Вы обнаружите, что в этих условиях на стенке колбы возникают области, с которых происходит интенсивное распыление ацетона. На рис. 10.20 приведена фотография эксперимента, в котором аце-

тон распыляется с двух диаметрально противоположных участков стенки перевернутой колбы. Результаты подобных опытов объясняются, очевидно, возникновением стоячей упругой волны в стеклянной стенке колбы. Места, интенсивно распыляющие жидкость, колеблются с наибольшей амплитудой и поэтому являются пучностями смещений стоячей волны.

Для успеха опытов важны такие параметры, как материал, толщина стенок и диаметр колбы, плотность, вязкость и количество жидкости в колбе, качество акустического контакта между вибратором и стенкой колбы. Экспериментируйте, несколько изменяя условия опытов, и вам откроются удивительные по красоте явления.

Глава 11

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДРУГИЕ ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Если вы спросите себя, что такое волна, то, даже очень хорошо подумав, вряд ли сможете вразумительно ответить на этот вопрос. Конечно, какое-то определение волны дать можно, и на страницах этой книги мы это уже делали. Существенно, однако, что какое-бы определение вы ни дали, при тщательном анализе окажется, что оно не вполне соответствует действительности. На это особое внимание обращал выдающийся русский физик Л. И. Мандельштам, который о колебательных процессах писал так.

«Вы можете сказать: вот все время говорится о колебаниях и еще долго будет говориться, а не дано *определения*, что такое колебания. Я считаю, что давать определения — это трудная и неблагодарная задача. Вы дадите какое-то определение, а через два года его измените. Мне кажется, что важно и целесообразно другое. Важно указывать общие идеи, выделять *руководящие точки зрения*, которые позволяют вам *объединять целый класс проблем* наряду с указанием *тех фактических явлений*, о которых идет речь, с тем чтобы вызвать в памяти все их разнообразие.»¹⁾

Понятие волны относится к основным понятиям физики и не может быть логически безупречно определено через другие более простые понятия. Пожалуй, самое лучшее определение таково. Волна — это физический процесс, для которого характерны основные волновые явления: излучение, распространение, перенос энергии, затухание, доплеровское смещение частоты, дисперсия, отражение, преломление, интерференция, дифракция. Если экспериментально доказано, что некоторый физический процесс сопровождается перечисленными выше явлениями, то этот процесс есть волна.

Откуда мы знаем, что звук и ультразвук представляют собой упругую волну? Дело в том, что эти физические процессы существуют только в упругой среде и, кроме того, для них характерны следующие волновые явления.

¹⁾ Мандельштам Л. И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. — М.: Наука, 1972. — 440 с. (С. 409).

Звук и ультразвук *излучаются* источниками, которые в принципе одинаковы: это колеблющиеся тела, возбуждающие в окружающей среде упругую волну.

Звуковые и ультразвуковые волны *распространяются* с определенной (обычно постоянной) скоростью, зависящей от свойств окружающей среды.

При распространении ультразвуковые и звуковые волны *переносят энергию*, причем часть энергии «теряется» в среде, что приводит к *затуханию волн*.

Для ультразвуковых волн, так же как и для звуковых, существует явление *Доплера* — эффект изменения воспринимаемой приемником частоты волны при движении приемника или источника относительно среды.

Скорость звука в определенных условиях зависит от частоты. Это явление, называемое *дисперсией*, имеет место и в ультразвуковом диапазоне.

Переход звуковых и ультразвуковых волн из одной среды в другую сопровождается *отражением* и *преломлением* на границе раздела сред.

При наложении нескольких когерентных звуковых волн происходит явление *интерференции*. То же явление наблюдается и для ультразвука.

Если звуковая или ультразвуковая волна встречает на своем пути препятствие, она огибает его. Это явление называется *дифракцией* упругой волны.

Наконец, ультразвуковые и звуковые волны могут быть как продольными (в газах, жидкостях и твердых телах), так и поперечными (в твердых телах).

К волновым процессам в широком смысле этого слова обычно относят те, для которых характерна интерференция. В этой главе мы рассмотрим интерференцию изгибных волн, а также ряд других волновых явлений, которые в своей совокупности и позволяют считать то, что распространяется в пластинке, изгибая ее, волной.

11.1. Интерференция изгибных волн

Явление наложения двух или нескольких волн, при котором результирующая интенсивность не равна сумме интенсивностей каждой из волн по отдельности называется *интерференцией*, а сами волны называются *когерентными*. Понятно, что устойчивое в пространстве и во времени интерференционное распределение интенсивности могут дать только волны одинаковой частоты. Если частота накладываемых волн невелика, то в эксперименте можно наблюдать разность фаз между волнами. Это дает

основание для независимого от интерференции определения когерентности: две волны одинаковой частоты когерентны, если разность фаз между ними неизменна.

11.1.1. Интерференция волн от двух реальных источников. Исследуем явление интерференции изгибных волн, возбуждаемых в пластинке когерентными магнитострикционными излучателями.

Для следующих экспериментов потребуются два совершенно одинаковых магнитострикционных излучателя ультразвука. Чтобы изготовить их, возьмите две одинаковые обмотки возбуждения, соедините параллельно и подключите их вместе к выходу ультразвукового генератора. Вставьте в каркасы обмоток ферритовые вибраторы одинаковой длины и подмагнитьте одинаковым числом магнитов.

Попробуйте настроить ультразвуковой генератор в резонанс с обоими вибраторами. Наиболее вероятна ситуация, что это не удастся: вибратор одного излучателя будет возбуждаться на чуть большей частоте, а другого — на немного меньшей. Это объясняется тем, что изготовить совершенно идентичные излучатели практически невозможно. Поэтому один из излучателей нужно подогнать под другой. С этой целью проще всего подрабатывать тот вибратор, который возбуждается на более низкой частоте.

Достаньте из обмотки возбуждения этого излучателя ферритовый вибратор и немного сточите его на наждачном бруске или на стекле с водной суспензией абразива. Ставший несколько короче вибратор введите в обмотку возбуждения и вновь настройте генератор в резонанс. Если вибраторы обоих излучателей возбуждаются на одной и той же частоте, то операция подгонки одного из вибраторов успешно завершена. В противном случае придется повторять ее столько раз, сколько потребуется для получения требуемого результата. Работа, конечно, не самая приятная, но вы должны научиться радоваться любой работе!

Вертикально расположенным вибратором работающего излучателя коснитесь листа, посыпанного легким сыпучим порошком. Вы увидите, что частицы порошка колеблются вверх и вниз возле своих первоначальных положений. Убедитесь, что второй излучатель дает точно такой же эффект.

Теперь к поверхности равномерно посыпанного порошком листа бумаги одновременно прикоснитесь сразу двумя работающими излучателями, вибраторы которых находятся на расстоянии 5–10 см друг от друга. Лучше, конечно, в нужном положении закрепить излучатели в лапках штатива и уже затем настроить генератор в резонанс с вибраторами. При этом вы обнаружите,

что порошок на поверхности листа перераспределяется и обозначает упорядоченную систему линий (рис. 11.1).

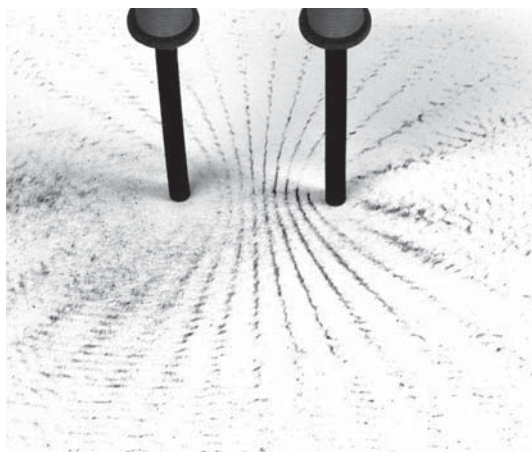


Рис. 11.1. При интерференции волн от двух когерентных источников в пластинке возникает устойчивое распределение интенсивности, и песок собирается в минимумах интерференционной картины

Очевидно, порошок сбрасывается с тех точек листа, в которых колебания максимальны, и собирается там, где колебания минимальны или отсутствуют вообще. Иными словами, порошок собирается в минимумах интенсивности результирующего волнового поля.

Таким образом, опыт показывает, что в листе бумаги от излучателей распространяются круговые изгибные волны, которые, накладываясь, создают устойчивое во времени и в пространстве распределение интенсивности. Наличие интерференционного распределения интенсивности свидетельствует о том, что волны когерентны.

11.1.2. Интерференция круговых волн. Проведем расчет наблюдаемого в эксперименте интерференционного распределения интенсивности. Для этого схематически изобразим условия эксперимента, обозначив через S_1 и S_2 источники изгибных волн в пластинке, P — произвольную точку наблюдения, x_1 и x_2 — расстояния, проходимые волнами от источников до точки наблюдения (рис. 11.2). Будем вначале считать, что источники возбуждают волны в фазе. Тогда, колебания, вызванные в точке P проходящими через нее волнами, описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} s_1 &= a_1 \sin(\omega t - kx_1) = a_1 \sin(\omega t - \psi_1), \\ s_2 &= a_2 \sin(\omega t - kx_2) = a_2 \sin(\omega t - \psi_2), \end{aligned} \quad (11.1)$$

где начальные фазы соответственно равны $\psi_1 = kx_1$ и $\psi_2 = kx_2$.

Результат сложения этих колебаний найдем стандартным методом векторных диаграмм. Суть его сводится к тому, что колебаниям одинаковой частоты сопоставляются векторы, причем

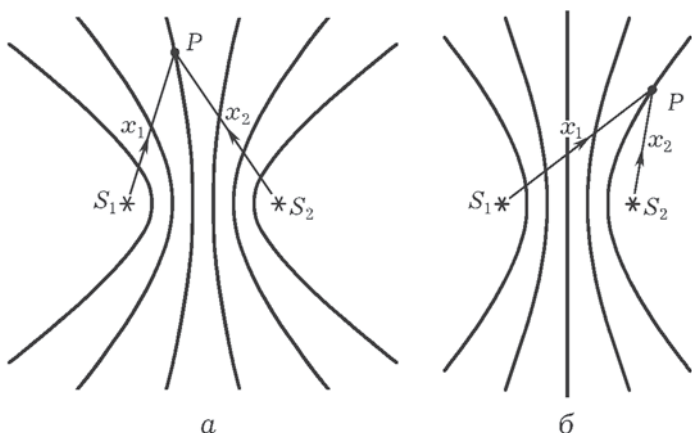


Рис. 11.2. Схематическое изображение интерференционной картины: *а* — источники колеблются в одной фазе; *б* — источники колеблются в противофазе; сплошными линиями обозначены минимумы интенсивности

амплитуде колебаний соответствует модуль вектора, а фазе колебаний — угол между вектором и определенной осью. Обоснованность такого сопоставления следует из того, что если представить вектор вращающимся вокруг его начала с постоянной угловой скоростью, равной угловой частоте колебания, то его проекция на выбранную ось выражается гармонической функцией вида (11.1).

В декартовой системе координат построим векторы \vec{s}_1 и \vec{s}_2 и найдем их сумму \vec{s} (рис. 11.3). Из геометрических соображений квадрат модуля результирующего вектора \vec{s} равен

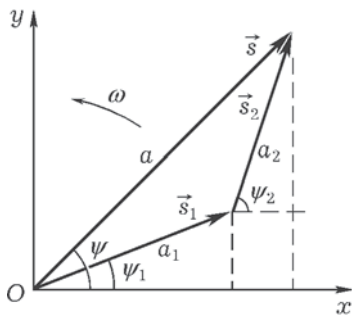


Рис. 11.3. К нахождению результата сложения двух колебаний

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\psi_2 - \psi_1), \quad (11.2)$$

а угол, который он составляет с осью x , определяется условием

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{a_1 \sin \psi_1 + a_2 \sin \psi_2}{a_1 \cos \psi_1 + a_2 \cos \psi_2}. \quad (11.3)$$

Полученные формулы определяют амплитуду и фазу результирующего колебания. Поскольку интенсивность волны I пропорциональна квадрату ее амплитуды a , из формулы (11.2) имеем

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\psi, \quad (11.4)$$

где разность фаз, как это видно из (11.1), равна

$$\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1 = k(x_2 - x_1). \quad (11.5)$$

Из формулы (11.5) следует, что если

$$\Delta\psi = 2n\pi, \quad \text{где } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (11.6)$$

то результирующая интенсивность волны в точке наблюдения максимальна и равна

$$I_{\max} = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2. \quad (11.7)$$

Если разность фаз

$$\Delta\psi = (2n + 1)\pi, \quad \text{где } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (11.8)$$

то результирующая интенсивность волны в точке наблюдения минимальна и равна

$$I_{\min} = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2. \quad (11.9)$$

В случае, если интерферируют волны равной интенсивности, то максимальная интенсивность в четыре раза больше интенсивности каждой из волн $I_{\max} = 4I$, а минимальная равна нулю $I_{\min} = 0$.

В общем случае интерферируют волны разной интенсивности, поэтому различие между максимумами и минимумами результирующей картины не столь велико. Оно характеризуется специальной величиной, которая называется *контрастностью* или *видимостью* интерференционного распределения интенсивности

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (11.10)$$

В эксперименте мы не умеем непосредственно измерять разность фаз между волнами, зато без всяких проблем можем измерить разность хода $\Delta = x_2 - x_1$ между волнами, идущими из источников S_1 и S_2 , в точку наблюдения P (рис. 11.2). Поэтому результаты, полученные в теории, нужно перевести на язык эксперимента. Из формулы (11.5) следует, что разность фаз $\Delta\psi$ связана с разностью хода Δ соотношением

$$\Delta\psi = k(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta \quad \text{или} \quad \Delta = \frac{\Delta\psi}{2\pi}\lambda. \quad (11.11)$$

Подставляя в это выражение значение (11.6), получаем, что при интерференции максимум интенсивности образуется в тех точках, в которые волны приходят из источников с разностью хода, равной целому числу длин волн или четному числу длин полуволен

$$\Delta = x_2 - x_1 = n\lambda = 2n \frac{\lambda}{2}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (11.12)$$

Аналогичным образом из (11.4) следует, что минимум интенсивности получается, когда разность хода между волнами равна нечетному числу длин полуволен

$$\Delta = x_2 - x_1 = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (11.13)$$

Из сказанного видно, что если два когерентных источника совершают колебания в фазе, то в центре отрезка, соединяющего их, окажется максимум интенсивности, а если они колеблются в противофазе, то посередине этого отрезка будет минимум.

11.1.3. Экспериментальное обоснование теории интерференции круговых волн. Повторите опыты, описанные в п. 11.1.1, и внимательно наблюдайте получающуюся интерференционную картину.

В первую очередь вы обнаруживаете, что интерференционные полосы наиболее отчетливо выражены вблизи прямой линии симметрии, перпендикулярной отрезку, соединяющему источники, и проходящей через его центр. Это объясняется тем, что в указанной области интерферируют волны примерно равной амплитуды, поэтому минимальная интенсивность I_{\min} близка к нулю (11.9), и контрастность интерференционной картины V (11.10) максимальна. Чем дальше от центральной области интерференционной картины, тем менее заметны интерференционные полосы.

Второе важное наблюдение заключается в том, что по указанной выше линии симметрии интерференционной картины может быть расположен как максимум, так и минимум интенсивности. Если в опыте по этой линии расположен максимум интенсивности, то есть порошок на ней отсутствует, то достаточно поменять местами концы обмотки возбуждения одного из излучателей, как вместо максимума окажется минимум интенсивности, и линия симметрии картины будет обозначена собравшимся на ней порошком.

Теория, изложенная в п. 11.1.2, показывает, что по линии симметрии интерференционной картины должен проходить максимум интенсивности. Но теория построена для случая, когда оба излучателя работают в фазе (см. рис. 11.2 а). Если концы обмотки возбуждения одного из излучателей поменять местами, то его вибратор станет совершать колебания в противофазе с ко-

лебаниями вибратора второго излучателя. В результате, как нетрудно сообразить, максимумы первоначальной интерференционной картины сменяются минимумами и наоборот (см. рис. 11.2 б).

Третье наблюдение, которое вы, бесспорно, сделали, касается расстояния между соседними интерференционными полосами: оно тем больше, чем меньше расстояние между когерентными источниками. Объяснить эту зависимость вы вполне можете самостоятельно.

11.1.4. Интерференция при отражении от прямого края листа. Опыты с двумя реальными источниками изгибных волн, в качестве которых используются магнитострикционные излучатели ультразвука, вряд ли можно отнести к самым простым. Сложны, впрочем, не сами опыты, а их подготовка: изготовление двух совершенно одинаковых излучателей требует и времени, и терпения. Но даже сделав одинаковые излучатели, вы сможете исследовать интерференцию только на вполне определенной частоте: чтобы сменить частотный диапазон, придется вновь делать идентичные излучатели, но уже с иной длиной вибраторов. А что, если в интерференционных опытах ограничиться одним

излучателем, а вместо второго использовать его изображение в зеркале? Понятно, что такое изображение будет когерентно самому источнику. Но как его получить?

Лист плотной бумаги положите горизонтально на слой поролона или полиуретана и равномерно посыпьте мелким песком. Вертикально расположенным вибратором магнитострикционного излучателя коснитесь листа вблизи его незакрепленного края. Вы увидите появление характерной картины, обозначенной перераспределившимися песчинками (рис. 11.4).

Попробуем объяснить результат эксперимента. Из опытов с магнитострикционным излучателем (см. § 5.4) и с тонкими пластинками (см. § 10.2) вы уже знаете, что ультразвуковая волна хорошо отражается на границе между твердым веществом и

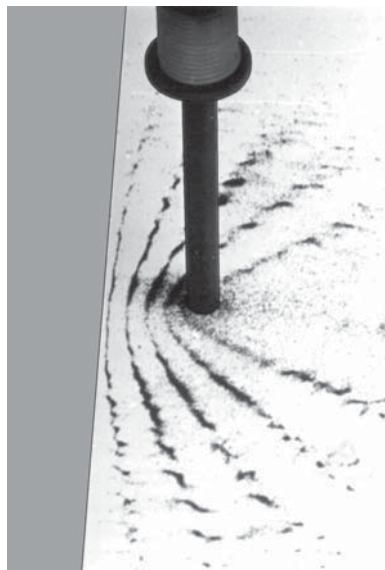


Рис. 11.4. Если вибратором магнитострикционного излучателя коснуться посыпанного порошком листа бумаги вблизи его края, то порошок обозначит систему линий, соответствующих минимумам интерференции

газом. В результате наложения падающей от вибратора и отраженной краем листа волн (подчеркнем еще раз: обе волны, очевидно, когерентны) образуется интерференционная картина, представляющая собой распределение максимумов и минимумов интенсивности ультразвукового поля. Эта картина неподвижна, и поэтому легкий порошок сбрасывается с максимумов интенсивности, где лист колеблется со значительной амплитудой, и собирается в минимумах. В итоге порошок обозначает распределение интенсивности в ультразвуковом интерференционном поле.

Внимательно рассмотрите получающуюся в опыте интерференционную картину. Видно, что кристаллики не собираются на самом краю листа. Это означает, что по краю листа проходит максимум интенсивности. Разность хода между волнами, идущими от излучателя к краю листа и отраженными от края, равна нулю. В самом деле, ведь можно представить себе, что отраженная волна испускается мнимым излучателем, являющимся зеркальным изображением действительного, отраженного от края, как от зеркала (то есть расположенным симметрично ему относительно края листа). Два таких излучателя дают на краю листа максимум интенсивности, если они колеблются синфазно.

Таким образом, опыт показывает, что при отражении ультразвука от акустически менее плотной среды (среды с меньшим акустическим сопротивлением) фаза волны не меняется. Раньше при объяснении работы магнестрикционного излучателя мы использовали это положение без доказательства (см. п. 5.2.1). Впрочем, уже опыты по резонансному возбуждению магнестрикционного вибратора с достаточной убедительностью свидетельствуют в пользу этого положения (см. п. 5.2.2). Наконец, обращаем ваше внимание и на опыты с круглыми пластинками (см. п. 10.2.1), которые также говорят о том же самом.

11.1.5. Количественное подтверждение теории. Выясним, соответствуют ли получающиеся в экспериментах интерференционные картины теоретическим выводам.

Согласно теории интерференции волн (см. п. 11.1.2) минимумы интенсивности располагаются в точках, в которые волны от источников приходят с разностью хода, равной нечетному числу длин полуволн (11.13):

$$\Delta = (2n + 1) \frac{1}{2} \lambda, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Геометрические места таких точек на плоскости представляют собой семейство *гипербол*, в фокусах которого расположены излучатели. Напомним, что по определению гиперболой называется кривая, представляющая собой геометрическое место точек, разность расстояний которых от двух точек, называемых фокусами, есть величина постоянная.

Исследуйте интерференционную картину при отражении изгибной ультразвуковой волны от края листа. Остро отточенным карандашом обозначьте на листе полученные линии минимумов интенсивности и положение торца излучателя. Убрав порошок и наложив лист бумаги на другой, иглой переколите экспериментальные точки, а карандашом отметьте положение края листа. Соединив точки плавными линиями, вы получите чертеж, подобный изображенному на рис. 11.5. Нанесите на этот чертеж точку S' , симметричную относительно края листа точке S , в которой вибратор касается бумаги. Если предположение, что полученные в эксперименте линии суть гиперболы с фокусом в точке S , верно, то точка S' — второй фокус семейства гипербол.

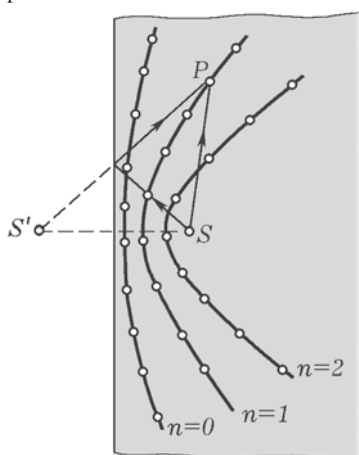


Рис. 11.5. Исследование явления интерференции изгибных волн при отражении от прямого края

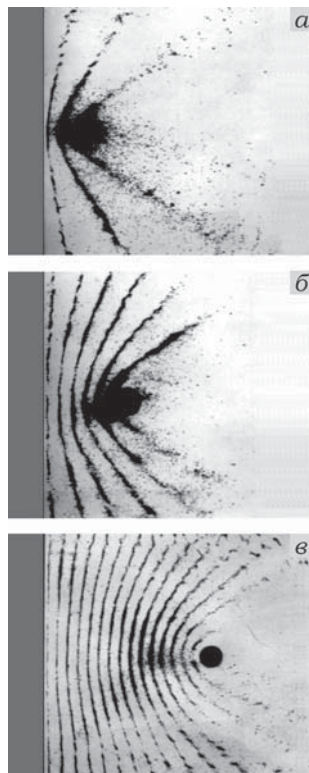


Рис. 11.6. Интерференционные картины при увеличении расстояния от источника до края

На любой из линий чертежа выберите произвольную точку P . Измерьте расстояния от нее до точек S и S' и найдите разность этих расстояний. Теперь на той же линии возьмите любую другую точку и для нее проделайте ту же операцию. Вы получите результат, в пределах ошибок опыта совпадающий с первым. Взяв еще несколько точек на выбранной линии, нетрудно убедиться, что разность расстояний от них до точек S и S' остается неизменной, следовательно, эта линия действительно является гиперболой.

Подсчитайте разности расстояний от фокусов до точек, принадлежащих различным линиям чертежа. Вы заметите, что при

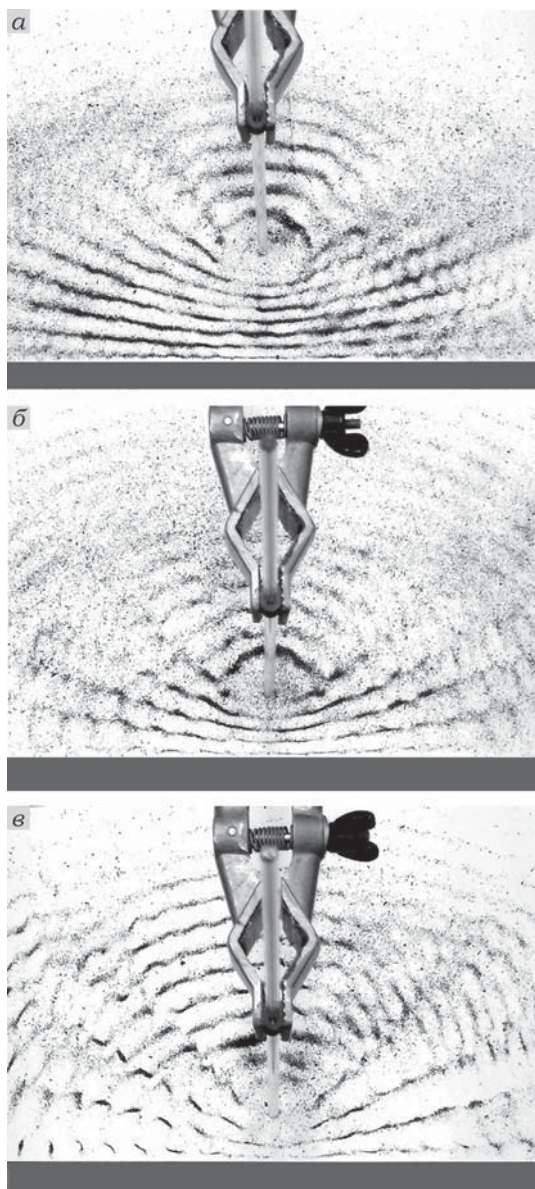


Рис. 11.7. Интерференционные картины в звуковом диапазоне волн, полученные при уменьшении расстояния от источника до края

переходе от первой линии ко второй эта разность увеличивается в три раза, от первой к третьей — в пять раз и т. д. Поэтому для разности расстояний можно записать экспериментальную формулу

$$\delta = (2n + 1)a, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (11.14)$$

где a — некоторая постоянная, имеющая размерность расстояния. Эта экспериментальная формула совпадает с приведенной выше теоретической, если положить, что постоянная a равна половине длины изгибной волны, распространяющейся в бумажном листе. Таким образом, результаты опыта полностью подтверждают теорию.

В заключение предлагаем исследовать зависимость интерференционной картины от расстояния между когерентными источниками волн. Для этого достаточно изменять положение конца вибратора магнитострикционного излучателя относительно прямого края бумажного листа. Получающиеся интерференционные распределения максимумов и минимумов интенсивности показаны на фотографиях, представленных на рис. 11.6. Если вы не сделали приборы для получения ультразвука, а интересовались интерференционными картинками, приведенными на фотографиях, то получить их можно и в звуковом диапазоне упругих волн с помощью стеклянной трубки, возбуждаемой трением (рис. 11.7), как это описано в п. 1.2.2.

11.2. Интерференция при отражении волны от круглого края пластинки

Продолжим экспериментальные исследования изгибных волн в тонких упругих пластинках. Явления, которые вы при этом сможете наблюдать, не только чрезвычайно важны для физики, но еще и просто красивы. Трудно сказать, что важнее: знания и умения, которые вы получите, или чувство эстетического наслаждения, след которого навсегда останется в вашей душе.

11.2.1. Интерференция при отражении от выпуклого и вогнутого краев листа. При интерференции изгибных волн, падающей и отраженной прямым краем пластинки, максимум интенсивности нулевого порядка образующейся интерференционной картины проходит в точности по краю пластинки (п. 11.1.4). А нельзя ли сместить этот максимум с края, чтобы убедиться, что он действительно представляет собой ось симметрии картины?

Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним о сферических зеркалах. Выпуклое сферическое зеркало, подобно плоскому, всегда дает мнимое изображение действительного источника. Вогнутое зеркало дает действительное изображение реального источника, если он отстоит от зеркала на расстоянии, превышающем фокус-

ное. Что касается фокусного расстояния сферического зеркала, то оно равно половине его радиуса кривизны. При этом справедлива формула идеального сферического зеркала:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (11.15)$$

где a и b — расстояния от зеркала Z до предмета S и изображения S' соответственно, f — фокусное расстояние зеркала.

Вогнутое зеркало имеет *действительный фокус*, в котором на самом деле пересекаются лучи, параллельные главной оптической оси зеркала, а выпуклое зеркало имеет *мнимый фокус*, в котором пересекаются не сами лучи, а их мнимые продолжения. Чтобы пользоваться одной формулой (11.15) для любых зеркал, принято подставлять в нее значения расстояний f , a и b со знаком плюс, если фокус, предмет или изображение действительны, и со знаком минус, если фокус, предмет или изображение мнимые. На наш взгляд, лучше всегда брать положительные значения всех расстояний, а формулу (11.15) писать для каждого конкретного случая с соответствующими знаками. На рис. 11.8 приведены примеры построения изображений действительного

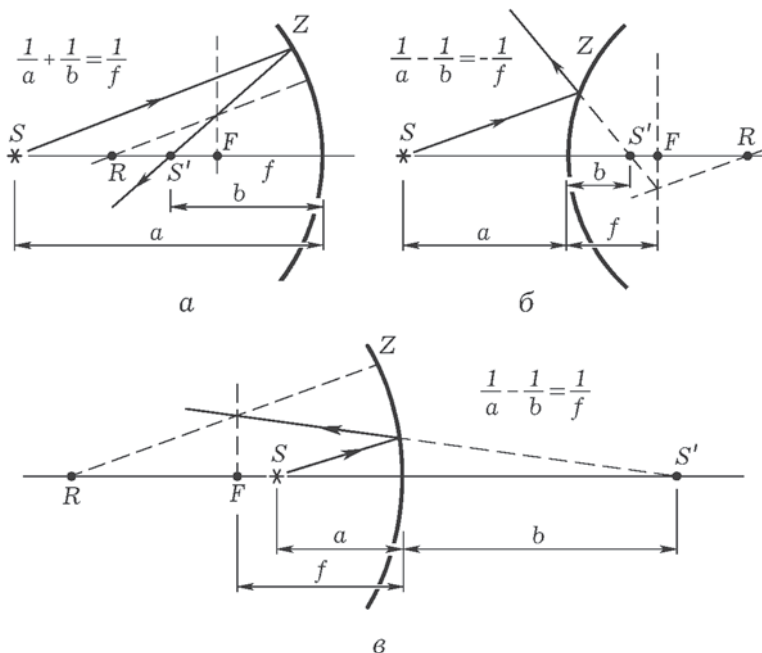


Рис. 11.8. Ход лучей при отражении от круглого края: а — получение действительного изображения; б, в — получение мнимого изображения

точечного источника света в вогнутом и выпуклом зеркалах и для каждого случая представлены расчетные формулы.

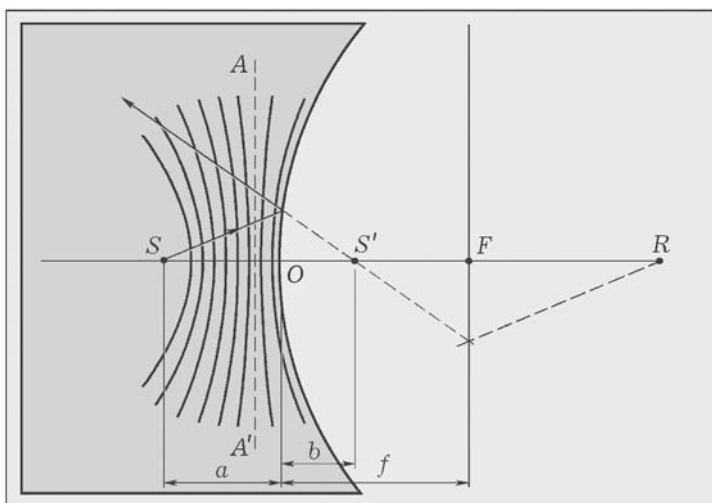


Рис. 11.9. К исследованию интерференции при отражении от вогнутого края

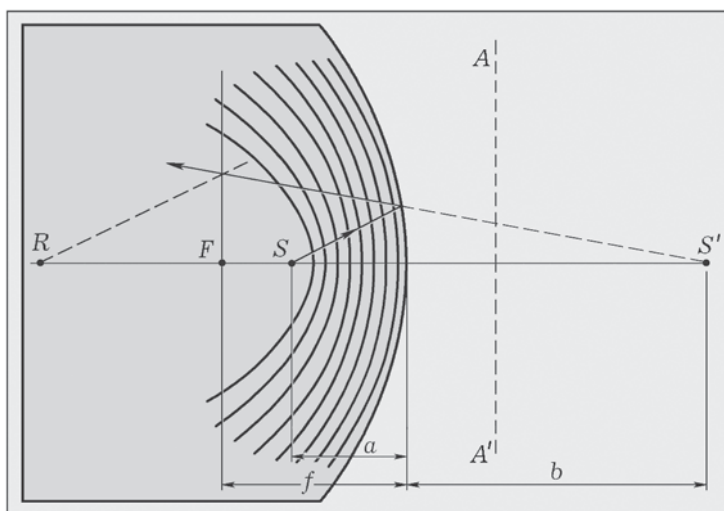


Рис. 11.10. К исследованию интерференции при отражении от выпуклого края

В опытах в качестве тонкой упругой пластинки удобно использовать лист плотной белой бумаги. Вырежьте один край листа в форме вогнутого круга с радиусом кривизны 7–15 см.

Карандашом проведите на листе ось так, чтобы она проходила через центр кривизны круглого края. Подготовленный лист как обычно посыпьте на мягкую горизонтальную подложку и равномерно посыпьте легким сыпучим порошком. Прикоснитесь торцом вертикально расположенного вибратора к произвольной точке листа, лежащей на обозначенной оси. Вы увидите, что порошок на листе перераспределится, обозначив минимумы интенсивности интерференционной картины (рис. 11.11). Теперь максимум интенсивности нулевого порядка, относительно которого симметрична вся картина, оказался смещенным от края в глубь листа.

Карандашом аккуратно обозначьте точки минимумов, стряхните с листа порошок и нарисуйте систему минимумов интенсивности (рис. 11.9). Нарисуйте положение максимума нулевого порядка AA' . Обозначьте центр кривизны R круглого края и его фокус через F . Пользуясь хорошо известными правилами (см. рис. 11.8), постройте изображение S' источника S в круглом крае. Для этого из S проведите произвольный луч до края зеркала, через R параллельно этому лучу проведите вспомогательную прямую до пересечения с фокальной плоскостью зеркала и, наконец, через найденную точку и точку касания луча с зеркалом проведите отраженный луч и продолжите его до пересечения с оптической осью зеркала. Так вы получите мнимое изображение S' источника волны S .

Убедитесь, что максимум интенсивности нулевого порядка AA' проходит в точности через середину отрезка SS' и перпендикулярен ему. Измерьте расстояния a , b , f и убедитесь, что справедлива формула (11.15), написанная для выпуклого зеркала и действительного источника (рис. 11.8 б).

Теперь выпуклым круглым краем листа смоделируйте вогнутое зеркало и для него повторите исследование интерференции изгибных волн, действуя точно так же, как в опытах с вогнутым краем листа. Чтобы облегчить работу, на рис. 11.9 приведен возможный результат соответствующего эксперимента.

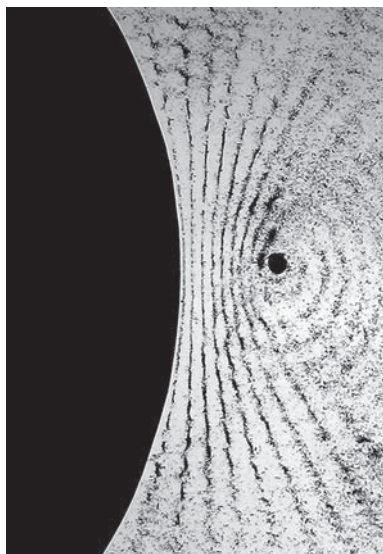


Рис. 11.11. Интерференция при отражении от круглого вогнутого края пластинки

11.3. Фокусировка волны

Проделанные только что исследования показывают, что край пластинки способен дать изображение источника изгибной волны. Отсюда следует, что при определенных условиях волна может быть сфокусирована краем пластики.

11.3.1. Получение действительного изображения в круглом крае. Из дюралю толщиной порядка 0,3 мм вырежьте прямоугольную пластинку размером 200 × 400 мм. Узкие края этой пластинки обрежьте так, чтобы один из них приобрел форму выпуклого, а другой — вогнутого полукруга радиусом 100 мм. Карандашом проведите осевую линию пластинки и на ней обозначьте центр кривизны и фокус круглого выпуклого края. Посыпав пластинку песком, прикоснитесь вертикально расположенным вибратором на расстоянии 12–13 см от выпуклого края. Вы обнаружите, что этот край дает действительное изображение источника волны, и увидите прекрасную интерференционную картину (рис. 11.12)!

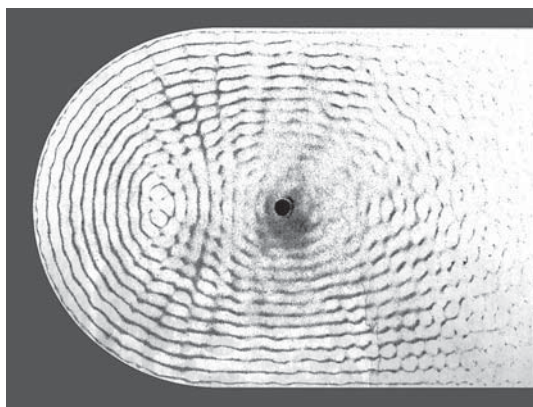


Рис. 11.12. Используя выпуклый край дюралевой пластинки, можно получить действительное изображение источника изгибной волны, подобно тому, как с помощью вогнутого сферического зеркала можно получить действительное изображение источника света

Таким образом, в пластинке интерферируют волны, идущие от реального источника и его действительного изображения в крае пластинки. Наблюдения показывают, что интерференционная картина представляет собой семейство гиперболических полос, расположенных симметрично относительно прямой, которая проходит перпендикулярно отрезку, соединяющему источник, через его середину. Обратите внимание: в отличие от ранее исследованных случаев интерференции круговых волн в последнем опыте в центре интерференционной картины расположен не



ФЕРМА Пьер (1601–1665). Французский математик и физик. Сформулировал общий принцип (принцип Ферма): свет от источника до точки наблюдения распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется наименьшее время. Показал, что из этого принципа следуют законы отражения и преломления света. Принцип Ферма стимулировал возникновение вариационного исчисления и сыграл значительную роль в становлении современной физики.

максимум, а минимум интенсивности. Это означает, что источники испускают волны в противофазе (см. п. 11.1.1). Но при отражении от свободного края пластинки фаза волны не меняется. Следовательно, опыт свидетельствует, что при фокусировке волны происходит изменение фазы на π или потеря полуволны! Этот достаточно тонкий эффект вы без особого труда обнаружили в опытах с изгибными волнами.

Переместите вибратор излучателя по оси пластинки из прежнего положения на расстояние 7–8 см от выпуклого края и вы увидите, что действительное изображение получается с другой стороны от источника волны. Изображение источника и интерференционная картина оказываются менее четкими, чем в первом случае. Это объясняется тем, что в условиях последнего эксперимента интерферирующие волны заметнее отличаются друг от друга по интенсивности.

Если вместо дюралевой пластинки в описанных здесь опытах использовать плотную бумагу, то из-за сильного поглощения изгибной волны результат получится значительно хуже.

11.3.2. Отражение от эллиптической поверхности. Сферическое зеркало в принципе не в состоянии сфокусировать свет точечного источника в одну точку. Более качественную фокусировку света обеспечивают эллиптическое и параболическое зеркала (рис. 11.13). Смоделируем соответствующие оптические явления изгибными волнами в упругих пластинках.

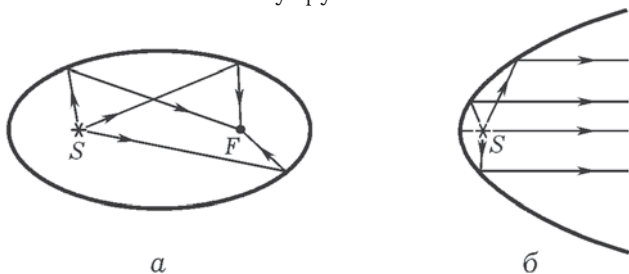


Рис. 11.13. Фокусирующее действие эллиптической (а) и параболической (б) отражающих поверхностей

Из тонкого листа дюрала (толщиной 0,3 мм) вырежьте эллиптическую пластинку. Напомним, что *эллипс* — это геометрическое место точек, сумма расстояний от которых до двух данных точек, называемых фокусами, есть величина постоянная. Исходя из этого определения, нетрудно начертить эллипс на бумаге. Для этого достаточно обозначить положения фокусов будущего эллипса, воткнуть в них булавки, на булавки накинуть нитяную петлю, длина которой превышает удвоенное расстояние между фокусами, натянуть петлю грифелем карандаша и провести им замкнутую кривую по бумаге. Попробуйте! Мы рекомендуем для начала взять петлю длиной 25 см и с ее помощью нарисовать два эллипса с расстояниями между фокусами 5 и 8 см.

Вырезанную из дюрала эллиптическую пластинку равномерно посыпьте песком. Вертикально расположенным вибратором работающего излучателя прикоснитесь к пластинке в одном из фокусов эллипса. Вы обнаружите удивительно симметричную

картину: круговая волна, вышедшая из одного фокуса эллиптической пластинки, собирается во втором фокусе (рис. 11.14 а). Если использовать другую пластинку с эллиптическим краем, то явление остается тем же (рис. 11.14 б).

Можно утверждать, что волны, одновременно вышедшие по разным направлениям из одного фокуса эллипса, приходят во второй фокус тоже одновременно. Действительно, по самому определению эллипса эти волны от одного до другого фокуса проходят равные расстояния, а поскольку пластинка однородна и изотропна, скорости этих волн одинаковы, значит и одинаково время их прохождения.

Французский ученый П. Ферма сформулировал общий принцип,

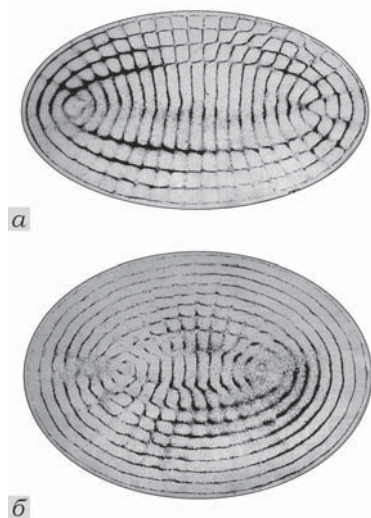


Рис. 11.14. Фокусировка волн в пластинках, вырезанных в виде эллипсов

согласно которому волна от одной до другой точки распространяется по такому пути, время прохождения по которому экстремально, то есть максимально, минимально или стационарно. Волны, идущие из одного фокуса эллипса после отражения в другой, распространяются по *таутохронным* траекториям, время прохождения которых стационарно.

Внимательно рассмотрев распределение порошка на эллиптических пластинках, вы увидите, что интерференционные полосы между фокусами представляют собой равноотстоящие друг от друга гиперболы, центральные части которых перпендикулярны отрезку, соединяющему фокусы (рис. 11.15). Но подобные интерференционные картины вы получали и раньше (см. рис. 11.1).

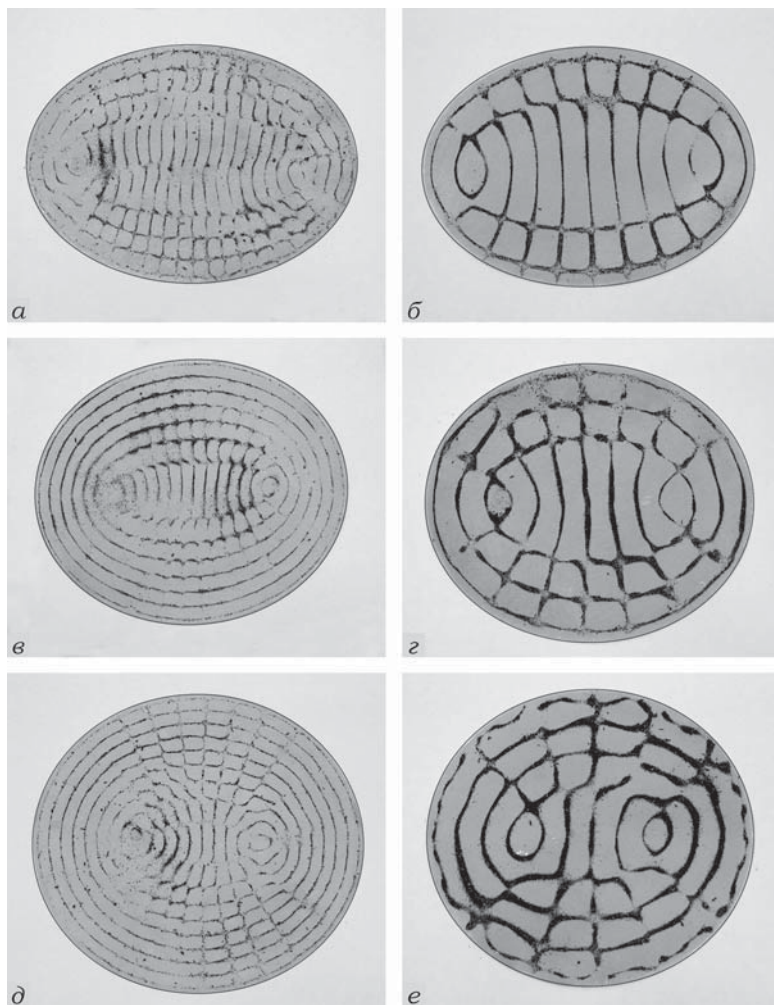


Рис. 11.15. Фокусировка изгибных волн, распространяющихся в дюралевых пластинках эллиптической формы: *а-б, в-г, д-е* — пары пластинок одинакового размера, но разной толщины 0,3 и 1,5 мм соответственно; расстояния между фокусами эллиптических краев пар пластинок последовательно уменьшаются

Отсюда следует, что на эллиптической пластинке интерферируют две круговые волны с центрами в ее фокусах. Значит, круговая расходящаяся из одного фокуса волна после отражения от эллиптического края пластинки превращается в круговую волну, сходящуюся во втором фокусе. Через центр интерференционной картины проходит минимум интенсивности. Это означает, что после фокусировки фаза волны меняется на противоположную.

Фокусирующее действие эллиптической поверхности часто используется на практике. Например, в лазерах для оптической накачки импульсную лампу помещают в одной фокальной линии зеркального эллиптического цилиндра, а активное вещество в другой.

11.3.3. Отражение от параболической поверхности.

Спросим себя: каким должен быть край пластинки, чтобы при отражении от него круговая волна превратилась в прямолинейную? Чтобы ответить на этот вопрос, можно воспользоваться принципом Ферма.

В прямоугольной системе координат xOy на оси y обозначим точку $S(0, f)$, из которой выходит круговая волна Σ_S (рис. 11.16). Будем считать, что при отражении от криволинейного края пластинки эта волна превращается в прямолинейную Σ . Согласно принципу Ферма все пути типа SAB должны быть таутохронными. Это значит, что для произвольной точки $A(x, y)$ криволинейного края пластинки должно выполняться равенство

$SA + AB = SO + OC$. Вспоминая теорему Пифагора, имеем

$$\sqrt{x^2 + (f - y)^2} + (a - y) = f + a.$$

Отсюда

$$\sqrt{(f - y)^2 + x^2} = f + y.$$

Далее, освобождаясь от корня, и производя небольшие преобразования, получаем

$$y = \frac{1}{4f} x^2. \quad (11.16)$$

Но ведь это ни что иное, как уравнение параболы!

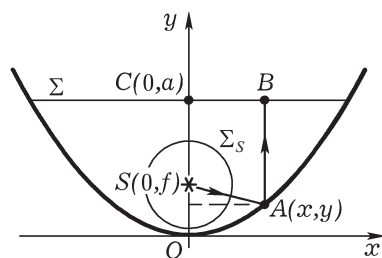


Рис. 11.16. К нахождению формы края, при отражении от которого волновой фронт представляет собой прямую линию

Выберите фокусное расстояние параболы, например, $f = 30$ мм. По формуле (11.16) для абсциссы x , изменяющейся от 0 до, скажем, 180 мм, вычислите соответствующие значения y . По этим данным на листе бумаги постройте параболу и изготовьте шаблон. Пользуясь им, вырежьте из дюрала толщиной около 0,3 мм пластинку, один край которой представляет собой параболу, а второй — прямую, перпендикулярную оси симметрии параболы. Посыпьте ее песком и, установив в фокусе параболического края излучатель так, чтобы его вибратор был перпендикулярен пластинке, возбуждите изгибную волну. Убедитесь, что после отражения от параболического края получается прямолинейная волна (рис. 11.17)!

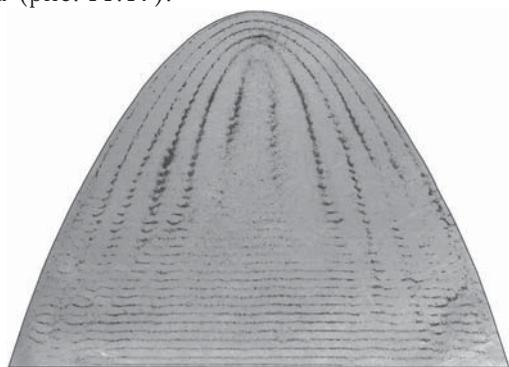


Рис. 11.17. Распределение порошка по поверхности пластинки, в которой распространяется волна, вышедшая из фокуса параболического края

Результат опыта объясняется тем, что выходящая из источника круговая волна после отражения от параболического края пластинки становится прямолинейной и падает на прямой край пластинки нормально. После отражения от него волна идет обратно в фокус параболического края. При этом в пластинке устанавливается стоячая волна, и порошок собирается в ее узлах, которые обозначают фронты падающей на прямой край пластинки и отраженной им волн.

Кроме того, порошок собирается в явно выраженных интерференционных минимумах интенсивности. Эта картина обусловлена, очевидно, интерференцией круговой волны, непосредственно вышедшей из источника, и прямолинейной волны, образующейся при отражении круговой волны от параболического края.

Напомним, что параболические отражающие поверхности имеют зеркала всех приличных оптических и радиотелескопов, прожекторов, спутниковых антенн и других устройств, предназначенных для получения параллельных пучков или фокусировки их в точку.

11.4. Некоторые волновые явления

Экспериментируя с изгибными волнами в пластинках, вы исследовали явления отражения, интерференции, фокусировки, дисперсии. Но для изгибных волн характерны и другие волновые явления. Попробуйте самостоятельно разработать такие учебные эксперименты, которые позволяют наблюдать все основные волновые явления, перечисленные в начале главы. Чтобы наметить направление работы, кратко опишем несколько опытов.

11.4.1. Преломление изгибной волны. Физическая сущность преломления заключается в том, что при переходе через границу раздела сред, скорость распространения волны в которых различна, изменяются направление распространения и длина волны.

Из формулы (10.9) видно, что скорость изгибной волны зависит от толщины, плотности и упругих параметров пластинки. Для изменения скорости распространения проще всего создать такие условия, при которых изгибная волна проходит через границу раздела двух пластинок, имеющих разную толщину. Один из способов получения таких условий заключается в соединении тонким слоем клея двух одинаковых по толщине пластинок.

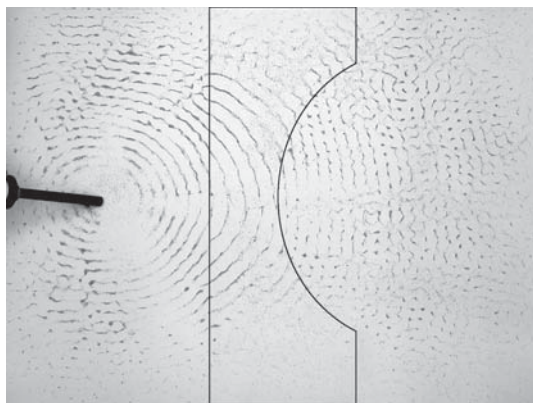


Рис. 11.18. Преломление изгибной волны в листе бумаги с приклеенной к нему снизу бумажной «линзой»

Плотный лист белой бумаги размером 30×40 см с одной стороны целиком покройте тонким ровным слоем клея ПВА и наложите на нее «призму» или «линзу», вырезанную из такого же листа бумаги. Подождите, пока свободная поверхность листа не подсохнет и положите склейку под пресс. Предварительное смазывание клеем всего бумажного листа необходимо для того, чтобы после высыхания клея бумага оставалась достаточно ровной.

После полного высыхания клея положите лист бумаги приклеенным элементом вниз на мягкую ровную горизонтальную подложку, посыпьте поверхность листа песком и прикоснитесь к нему расположенным наклонно вибратором работающего излучателя. Если поверхность листа достаточно плоская, то будет видно, что при переходе изгибной волны из однослойной части в двухслойную и наоборот длина волны и направление ее распространения меняются.

На рис. 11.18 приведена фотография, показывающая, что после прохождения сквозь собирающую «линзу» круговой фронт изгибной волны становится близким к прямолинейному. Обратите внимание, что в опыте плосковогнутая «линза» является для изгибных волн собирающей. Это вполне понятно, так как скорость изгибной волны пропорциональна корню квадратному из толщины пластинки (см. п. 10.1.6), а исследованная в опыте бумажная «линза» имеет толщину, в два раза превышающую толщину остального листа.

11.4.2. Рассеяние волны. Если тонкая упругая пластинка однородна, то от источника распространяется волна, линии равных фаз которой представляют собой концентрические окружности с центром в источнике. Если же в пластинке имеется



Рис. 11.19. Изгибная волна рассеивается на небольшой неоднородности пластинки, которая сама становится источником круговой изгибной волны

ярко выраженная неоднородность, размер которой меньше или сравним с длиной волны, то волна рассеивается на этой неоднородности. Для наблюдения рассеяния изгибной волны удобно

использовать плотную прозрачную пленку толщиной 0,2 мм, например, пленку для кодослайдов.

С помощью не очень острого металлического предмета деформируйте небольшой участок пленки диаметром 3–4 мм, делая продавливающие усилия. Посыпьте песком поверхность пленки и коснитесь ее наклонным вибратором работающего магнитострикционного излучателя на расстоянии нескольких сантиметров от неоднородности.

Вы увидите, что от точки касания распространяется круговая волна, но кроме нее круговая волна несколько меньшей интенсивности распространяется и от созданной вами неоднородности (рис. 11.19).

11.4.3. Распространение волны в волноводе. Из дюралевого листа толщиной около 0,3 мм вырежьте волновод — изогнутую полоску шириной 2–3 см. Поместите его на несколько слоев тонкой бумаги и посыпьте песком. Прикоснувшись вибратором работающего излучателя вблизи одного из концов волновода под углом примерно 45° к его поверхности, вы увидите, что порошок по всей поверхности волновода перераспределяется в виде линий, ориентированных преимущественно перпендикулярно краям волновода (рис. 11.20). Порошок, находящийся за пределами волновода, остается неподвижным, значит изгибная волна не выходит за пределы волновода.

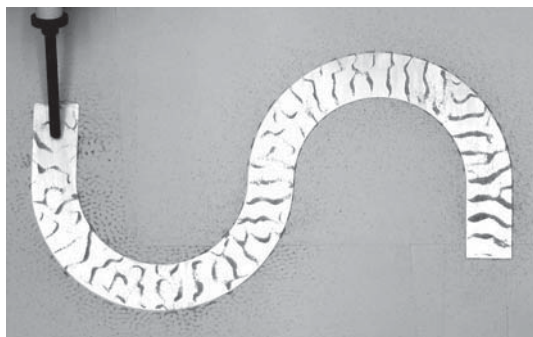


Рис. 11.20. Изгибная волна не выходит из волновода и распространяется вдоль него

Мы надеемся, что простые опыты, доказывающие существование дифракции упругих волн и явления Доплера вы сумеете разработать самостоятельно.

Глава 12

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КАВИТАЦИЯ

Ультразвуковая кавитация возникает при распространении в жидкостях ультразвука средней и большой интенсивности и относится к явлениям нелинейной акустики. С кавитацией тесно связано большое количество физических, химических, биологических процессов, происходящих в ультразвуковом поле. Многочисленные практические применения ультразвука низкой частоты возможны благодаря кавитационным явлениям. В главе рассмотрены эксперименты, доказывающие существование ультразвуковой кавитации и показывающие некоторые сопутствующие ей физические явления.

12.1. Физическая сущность ультразвуковой кавитации

Собственно кавитация была впервые обнаружена при изучении быстрого движения твердых тел внутри жидкости. Огромную разрушающую силу этого явления почувствовали в первую очередь инженеры, испытывающие гребные винты судов. При большой скорости вращения лопастей винта в жидкости происходит образование кавитационных полостей, которые, захлопываясь, вызывают разрушение материала, из которого изготовлены гребные винты. В этом смысле кавитация — вредное явление. Но кавитация бывает и полезна. Например, гигантская кавитационная полость, искусственно создаваемая носовой частью современной торпеды, способствует резкому снижению сопротивления и значительному увеличению скорости движения грозного оружия в воде.

12.1.1. Получение кавитационной полости. В одноразовый пластиковый шприц объемом 20 мл до половины наберите воду. Шприц переверните и переместите поршень так, чтобы из шприца вышел весь воздух. Отверстие для иглы шприца герметично закройте специально подготовленной пробкой, кусочком резины или просто пальцем. Быстро выдерните поршень из шприца, резко снижая давление в воде.

При этом вы увидите, что вода внутри шприца как бы вскипает: в ней образуется большое количество пузырьков разных размеров (рис. 12.1). Отпускание поршня приводит к тому, что

пузырьки исчезают, и объем шприца вновь оказывается сплошь заполненным водой.

Из опыта следует, что пузырьки, возникающие в воде при внезапном снижении давления, заполнены насыщенным паром, который при возрастании давления до нормального значения конденсируется так, что пузырьки без следа исчезают.

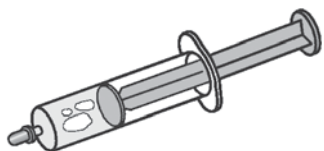


Рис. 12.1. К опыту по наблюдению образования кавитационных пузырей в медицинском шприце

Поставьте заполненный водой шприц на массивную подставку и ударьте по поршню молотком. Возникает ощущение, что удар производится не по податливой жидкости, а по упругому твердому телу.

Проделанные вами опыты показывают, что жидкость без заметных изменений своих свойств переносит значительные сжимающие нагрузки, поскольку она слабосжимаема. Однако уже сравнительно небольшие растягивающие усилия приводят к образованию в жидкости разрывов — *кавитационных полостей* (от латинского *cavitas* — «пустота», каверна или пустая замкнутая полость).

12.1.2. Гидродинамический удар. При схлопывании кавитационной полости жидкость, с большой скоростью со всех сторон втекающая в полость, внезапно тормозится и порождает ударную волну. Иными словами, возникает *гидродинамический удар*, который обладает огромной разрушающей силой.

Чтобы продемонстрировать явление гидродинамического удара при схлопывании кавитационной полости, приготовьте стеклянную полулитровую бутылку, киянку (деревянный молоток массой около 0,5 кг), матерчатую перчатку и тазик для сбора воды. В бутылку налейте воду несколько выше плечиков. В левую руку с надетой перчаткой возьмите бутылку за горлышко и расположите ее над тазиком.

Резко, но не сильно ударьте молотком по горлышку. При этом вы услышите звонкий звук, напоминающий удар твердого тела о твердое тело. Результат опыта объясняется, очевидно, тем, что при резком ударе бутылка с большим ускорением идет вниз, а вода в ней в силу инерционности в первый момент остается на месте. Поэтому вода отрывается от дна бутылки и возле дна возникает кавитационная полость, заполненная насыщенным паром. Атмосферное давление загоняет воду в бутылку, при этом насыщенный пар конденсируется и слабо сжимаемая вода, ударяясь о дно бутылки, ведет себя подобно твердому телу, производя звонкий звук удара.

Повторите опыт, ударяя молотком по горлышку бутылки столь же резко, но несколько сильнее, чем раньше. При этом дно бутылки отваливается (рис. 12.2)!

Опыт свидетельствует о том, что при схлопывании кавитационной полости возникают большие давления. Количественная оценка показывает, что в условиях рассмотренного эксперимента давление в стеклянной бутылке примерно в 30 раз превышает атмосферное.

12.1.3. Наблюдение ультразвуковой кавитации.

Для непосредственного наблюдения ультразвуковой кавитации соберите установку по одной из схем, изображенных на рис. 12.3. Перед темным фоном расположите склеенную из оргстекла или стекла прямоугольную прозрачную кювету размером $30 \times 60 \times 80$ мм и осветите ее сбоку параллельным или слегка расходящимся пучком света, выходящим из подходящего осветителя. В кювету налейте дистиллированную или прокипяченную воду и погрузите в нее на глубину порядка 1 см вибратор магнитострикционного излучателя, обеспечивающего получение ультразвука низкой частоты. Наблюдения проводите в направлении, перпендикулярном к направлению распространения светового пучка.

Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором. При этом возникает резкий шипящий звук (кавитационный шум) и вблизи торца вибратора появляется небольшое белесоватое облачко, состоящее из кавитационных пузырьков (рис. 12.4). Выключите генератор; кавитационное облачко и шум немедленно пропадают. Из опыта следует, что появление шума при работе вибратора в жидкости непосредственно связано с появлением кавитационного облачка.

Белесоватое облачко, которое наблюдается в опыте, состоит из мельчайших кавитационных пузырьков, видимых непосред-



Рис. 12.2. Опыт по наблюдению действия гидродинамического удара на дно бутылки

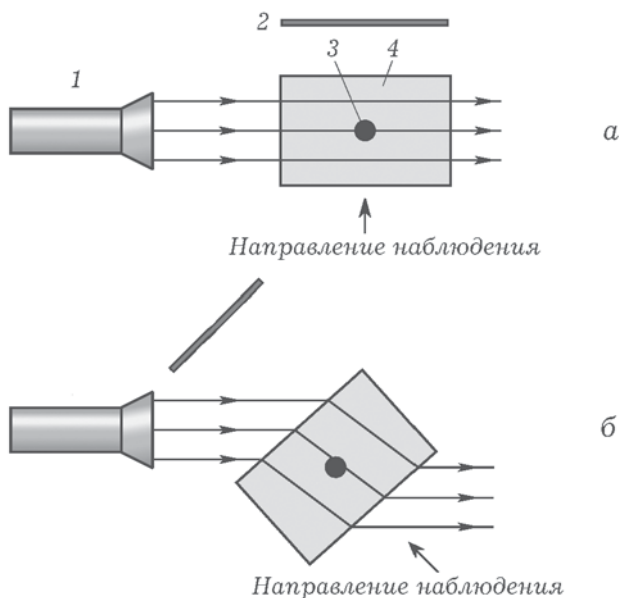


Рис. 12.3. Схемы установок для визуального наблюдения ультразвуковой кавитации: а — перпендикулярно световому пучку; б — под углом к нему; 1 — осветитель (фонарик или проектор), 2 — темный фон (лист черной бумаги), 3 — вибратор низкочастотного магнитострикционного излучателя, 4 — прозрачная кювета с дистиллированной водой

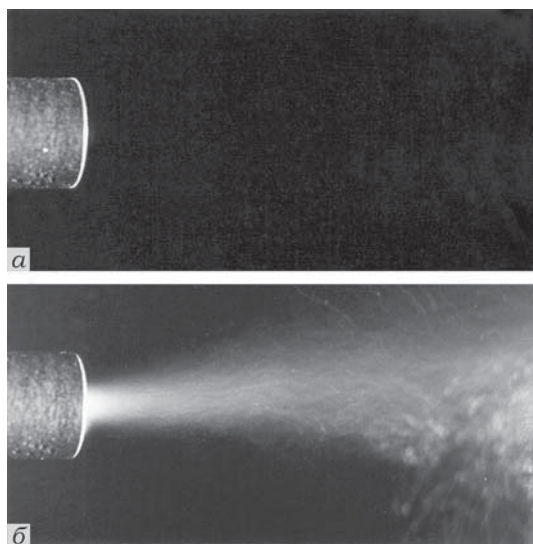


Рис. 12.4. Внешний вид кавитационного облака: а — ультразвук выключен; б — ультразвук включен

ственно глазом на темном фоне благодаря тому, что они сильно рассеивают свет. Характерный шум, появляющийся и исчезающий вместе с облачком, объясняется примерно тем же, что и шипение воды в чайнике перед ее закипанием: захлопываясь, кавитационные пузырьки порождают звуковые импульсы в широком диапазоне частот, то есть шум. Мгновенное исчезновение кавитационного облачка при выключении ультразвука свидетельствует о том, что в опыте наблюдается *истинная кавитация*. Существует явление ультразвуковой дегазации жидкости (см. ниже п. 13.3.2), при котором под воздействием ультразвука также появляются пузырьки, но не исчезающие сразу по выключении ультразвука и, следовательно, не имеющие ничего общего с кавитационными.

Расположите вибратор излучателя в воде под углом около 45° к горизонту так, чтобы сбоку был виден его торец. При внимательном наблюдении можно заметить, что кавитационное облачко неоднородно: вблизи центра торца оно имеет вид небольшой плотной области; по плоскости торца кавитационные пузырьки распределяются в виде своеобразной, похожей на многоконечную звезду, фигуры.

12.1.4. Разрушающее действие ультразвуковой кавитации. Ферритовый вибратор удалите из каркаса обмотки возбуждения и мелкой шкуркой тщательно зачистите его торец. Погрузите вибратор зачищенным концом в воду и добейтесь появления ультразвуковой кавитации. После пятиминутной работы излучателя при максимальной интенсивности ультразвука достаньте вибратор из каркаса и рассмотрите его торец. По всей поверхности торца вы обнаружите более или менее сильные разрушения: на торце оказывается как бы выгравированной та звездообразная фигура, которая наблюдалась раньше в опыте с кавитационным облачком (рис. 12.5). Результат опыта свидетельствует об огромной разрушающей силе ультразвуковой кавитации.

Ультразвуковая кавитация разрушает не только материал вибратора. Если в воду вблизи вибратора поместить тонкую латун-

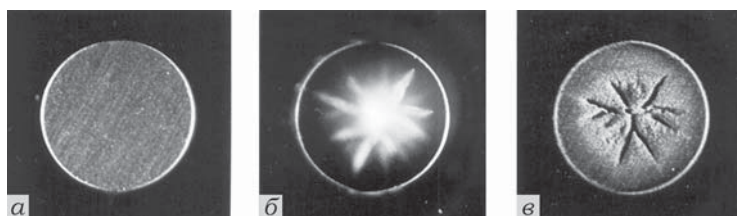


Рис. 12.5. Разрушающее действие кавитации на торец вибратора: *а* — ровный торец до воздействия кавитации; *б* — кавитационное облачко; *в* — выгравированная кавитацией звездочка на торце

ную или алюминиевую фольгу, то спустя небольшое время можно заметить кавитационные разрушения ее поверхности и даже сквозные отверстия.

12.1.5. Причина ультразвуковой кавитации. При распространении ультразвуковой волны даже сравнительно небольшой интенсивности (всего несколько ватт на квадратный сантиметр) в жидкости возникает переменное звуковое давление, амплитуда которого достигает порядка нескольких атмосфер. Под действием этого давления жидкость попеременно испытывает сжатие и растяжение. Хорошо известно, что жидкость без существенного изменения ее свойств можно сильно сжать. Иначе обстоит дело, если в жидкости создать разрежение: уже простое уменьшение давления над водой приводит к ее закипанию — парообразованию внутри воды (п. 12.1.1).

Нечто аналогичное происходит и при распространении ультразвуковой волны в жидкости: растягивающие усилия в области разрежения волны приводят к образованию в жидкости разрывов, то есть мельчайших пузырьков, заполненных газом и паром. Эти пузырьки и являются кавитационными микрополостями.

Кавитационные пузырьки в некоторой области жидкости возникают всякий раз, когда до этой области доходит фаза разрежения ультразвуковой волны. Как правило, кавитационные пузырьки долго не живут: уже следующая за разрежением фаза сжатия приводит к захлопыванию большей их части. Поэтому кавитационные пузырьки исчезают практически сразу вслед за прекращением облучения жидкости ультразвуком.

При захлопывании кавитационного пузырька возникает ударная волна, развивающая громадные давления. Если ударная волна встречает на своем пути препятствие, то она слегка разрушает его поверхность. Существует теория, согласно которой при схлопывании кавитационных пузырьков возникают кумулятивные струи жидкости, движущиеся с большой скоростью и проникающие внутрь твердых тел (рис 12.6). Поскольку кавита-

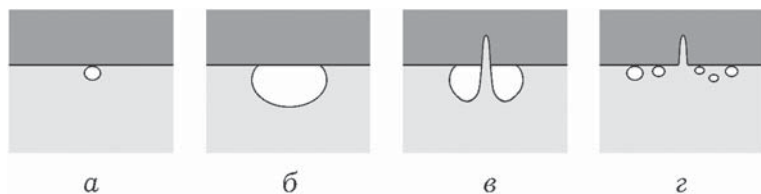


Рис. 12.6. К объяснению разрушающего действия кавитации: *а* — газовый зародыш; *б* — рост кавитационного пузырька в фазе разрежения; *в* — схлопывание кавитационного пузырька с образованием кумулятивной струи в фазе сжатия ультразвуковой волны; *г* — проникновение струи внутрь твердого тела

ционных пузырьков много и захлопывание их происходит много тысяч раз в секунду, кавитация может произвести значительные разрушения.

Создание ультразвуковых генераторов сделало возможным управление кавитационным процессом, а значит, и полезное применение его на практике.

12.2. Звукокапиллярный эффект

Суть звукокапиллярного эффекта заключается в том, что под действием ультразвука жидкость в капилляре поднимается на высоту, значительно превышающую ту, которая обусловлена действием сил поверхностного натяжения и радиационного давления (см. п. 7.2.5). Звукокапиллярный эффект был открыт в 1973 г. академиком Е. Г. Коноваловым. Можно почти с полной уверенностью утверждать, что десятки ученых не раз наблюдали явление, лежащее в основе открытия, и только Коновалов, исследовав это явление, показал его принципиальную новизну.

12.2.1. Аномальное поднятие жидкости в капилляре. На столе вертикально расположите магнитоотрицательный излучатель, на вибраторе которого с помощью резинового колечка укреплен сосуд (рис. 12.7). В сосуд налейте воду и опустите в нее, не касаясь вибратора, конец стеклянной трубки внутренним диаметром 0,5–2 мм. За счет сил поверхностного натяжения вода несколько поднимается по трубке.

Включив генератор, получите ультразвук максимальной интенсивности. При этом столбик воды в капилляре поднимается на высоту не более 1–3 мм. Это поднятие, как показано выше (см. п. 7.2.5), объясняется радиационным давлением ультразвука. По формуле (7.9) нетрудно рассчитать, что указанному изменению уровня воды соответствует интенсивность ультразвука менее 1 Вт/см^2 . Этот результат неплохо согласуется с теми, которые получаются, при измерении интенсивности ультразвука в воде с помощью радиометра, поскольку интенсивность ультразвука в узком канале трубки должна быть меньше, чем в свободной жидкости.

Теперь прикоснитесь концом трубки к вибратору и постепенно перемещайте его по торцу. При необходимости слегка подстройте генератор. Вы обнаружите, как вдруг рывками стол-



Рис. 12.7. К наблюдению звукокапиллярного эффекта

бик воды в капилляре начинает расти и через несколько секунд поверхность жидкости оказывается на высоте 50–60 мм. На рис. 12.7 схематически изображена основная часть экспериментальной установки, в которой закрепленный на вибраторе сосуд изготовлен из пластиковой бутылки.

Если удачно подобраны стеклянная трубка, вибратор излучателя и хорошо настроен ультразвуковой генератор, то можно добиться поднятия воды до высоты 20–30 см! Это, безусловно, новый эффект, который нельзя объяснить одним лишь радиационным давлением.

Таким образом, эксперимент показывает, что при определенных условиях ультразвук приводит к поднятию жидкости в капилляре на высоту, в десятки и сотни раз превышающую ожидаемую за счет воздействия лишь радиационного давления!

12.2.2. Экспериментальное исследование звукокапиллярного эффекта. Попробуем дать объяснение звукокапиллярному эффекту. Аномально большое поднятие жидкости в капилляре наблюдается в случае, когда капилляр касается торца излучателя. При этом ультразвук распространяется как по жидкости внутри капилляра, так и по стеклу, из которого он изготовлен. По стеклянной стенке капилляра бежит упругая волна, при этом вдоль капилляра распространяются своеобразные перетяжки. Не работают ли они подобно перистальтическому насосу, поднимая жидкость по капилляру?

Чтобы подтвердить или опровергнуть это предположение, надо создать условия, при которых ультразвуковая волна, бегущая по стенке капилляра, заведомо не может создать такие перетяжки, которые способны поднимать жидкость по капилляру. Если и в этих условиях звукокапиллярный эффект будет наблюдаться, то «перистальтическую гипотезу» придется отбросить, как несостоятельную.

Очевидно, требуемые условия будут обеспечены, если в опыте вместо узкого капилляра использовать широкую цилиндрическую трубку с сужающимся концом. По стеклянной стенке широкой трубки, бесспорно, побежит ультразвуковая волна, но незначительные по сравнению с диаметром трубки деформации ее стенки вряд ли смогут перекачивать жидкость.

Для выполнения эксперимента необходимо, чтобы конец магнитострикционного излучателя, рассчитанного на получение ультразвука частотой 16–20 кГц, находился в жидкости (воде). Затем нужно подобрать стеклянную трубку длиной около полуметра внутренним диаметром до 10 мм с оттянутым нижним концом, отверстие которого имеет диаметр 0,5–1 мм. Вполне подойдет медицинская бюретка емкостью 10 мл (ее длина 350 мм, внешний

диаметр 11 мм). Можно использовать обычную стеклянную трубку в одном конце которой резиновой пробкой закреплен чистый пишущий узел шариковой ручки без шарика.

На столе вертикально расположите магнитострикционный излучатель и в его обмотку возбуждения введите ферритовый вибратор с закрепленным по его середине сосудом, изготовленным, например, из пластиковой бутылки. В сосуд налейте воду так, чтобы ее поверхность находилась на высоте примерно 20 мм от торца вибратора. На стеклянную трубку наденьте небольшой отрезок резинового шланга и зажмите его в лапке штатива так, чтобы оттянутый конец вертикально расположенной трубки оказался в воде на расстоянии не более 1 мм от торца вибратора.

Опыт можно провести следующим образом. Излучатель подключите к выходу ультразвукового генератора и подайте на генератор напряжение питания 4,5–9 В. Изменяя частоту генератора, настройте его в резонанс с вибратором излучателя, добиваясь устойчивой кавитации возле оттянутого конца трубки. При этом вы будете наблюдать, что вода поднимается на всю высоту трубки и даже переливается через ее верхнее отверстие обратно в сосуд, закрепленный на вибраторе (рис. 12.8).

Из проделанного эксперимента со всей очевидностью следует, что звукокапиллярный эффект не может быть объяснен действием упругой волны, распространяющейся по стеклянной стенке капилляра.

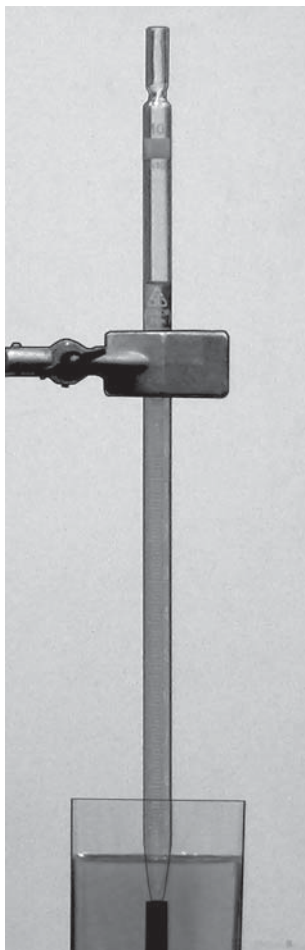


Рис. 12.8. Поднятие жидкости в стеклянной бюретке вследствие звукокапиллярного эффекта

12.2.3. Элементарная теория звукокапиллярного эффекта. Общепринятая теоретическая модель звукокапиллярного эффекта предложена Ю.И.Китайгородским. В этой модели жидкость в капилляре рассматривается, как сосредоточенная масса. Это позволяет считать силу давления во входном отверстии

капилляра приложенной к центру масс жидкости в капилляре. Поднятие жидкости происходит вследствие действия импульсов давления, возникающих благодаря распространению ударных волн, образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков. Из обсуждаемой модели следует, что скорость поднятия жидкости по капилляру уменьшается со временем, и высота поднятия стремится к некоторому значению даже без учета силы тяжести. Несмотря на то, что положения модели проверялись экспериментально, некоторые из них вызывают сомнения. Дело в том, что в экспериментах использовались вертикально расположенные капилляры постоянного сечения, причем влияние силы тяжести на явление не было исключено.

Рассмотрим более простую теоретическую модель звукокапиллярного эффекта. Вблизи вибратора в фазе разрежения ультразвуковой волны возникают и растут кавитационные пузырьки (рис. 12.9). При этом жидкость вытесняется из области кави-

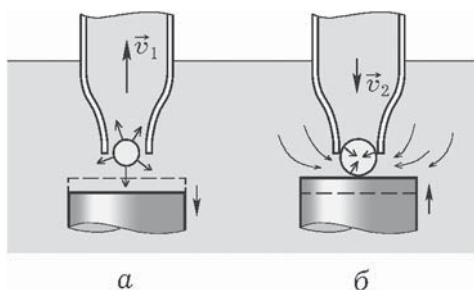


Рис. 12.9. К объяснению звукокапиллярного эффекта: *а* — в фазе разрежения кавитационные пузырьки увеличиваются и вытесняют жидкость в разные стороны, в том числе и в отверстие трубки; *б* — в фазе сжатия пузырьки схлопываются, и жидкость выходит из трубки лишь частично

тации во все стороны и, если рядом расположено отверстие капилляра, вталкивается в него. В фазе сжатия кавитационные пузырьки схлопываются, но из капилляра обратно успевает вытечь лишь часть вошедшей в него в фазе разрежения жидкости. Таким образом, кавитационная область, периодически возникая и исчезая вблизи устья капилляра, действует подобно поршню насоса, каждый раз загоняя внутрь капилляра одинаковые порции жидкости.

Из этой модели следует, что жидкость по капилляру должна перемещаться с постоянной скоростью, причем объем, попадающий в трубку за один период колебаний торца вибратора, должен иметь такой же порядок величины, как и объем кавитационной области.

12.2.4. Экспериментальная проверка следствий теоретической модели. Для экспериментальной проверки полученных следствий модели необходимо исключить влияние силы тяжести на характер перемещения жидкости по трубке. Тогда движение будет происходить только вследствие попадания в трубку новой порции жидкости. Для этого жидкость должна перемещаться по трубке, расположенной горизонтально.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 12.10. Для изготовления капиллярного устья воспользуйтесь пустым

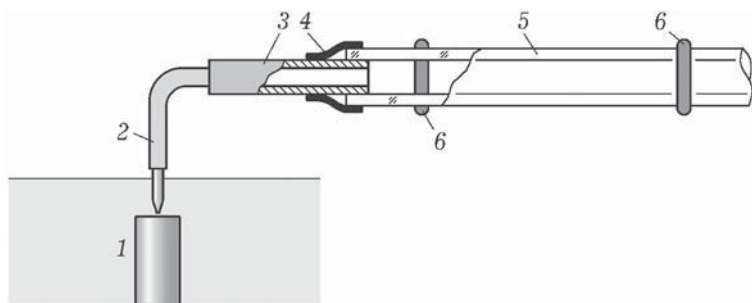


Рис. 12.10. Схема экспериментальной установки для проверки следствий элементарной теории ультразвукового капиллярного эффекта: 1 — ферритовый вибратор; 2 — стержень шариковой ручки; 3, 4 — отрезки резиновых шлангов, герметизирующие соединение; 5 — стеклянная трубка; 6 — резиновые колечки, предназначенные для измерения пройденного поверхностью жидкости пути

полиэтиленовым стержнем от шариковой ручки. С помощью кусачек аккуратно извлеките шарик из пишущего узла. На расстоянии 2–3 см от пишущего узла согните стержень под прямым углом. Для этого нагрейте сгибаемое место над пламенем свечи, придавая стержню нужную форму. Отрежьте отогнутый конец стержня на расстоянии 3–5 см от сгиба. Герметично соедините его при помощи резиновых трубок различного диаметра со стеклянной трубкой. Диаметр этой трубки должен быть достаточно мал, чтобы мениск жидкости в ней был расположен почти вертикально. Длина стеклянной трубки должна быть такова, чтобы для большей убедительности можно было провести 5–6 измерений прохождения уровнем жидкости отрезков по 10 см. На трубку через каждые 10 см наденьте узкие (шириной 1–2 мм) резиновые колечки, которые будут служить метками для измерения пройденного уровнем жидкости пути. Закрепите трубку горизонтально в двух местах с помощью резиновых или бумажных прокладок. При этом расстояние от устья до торца излучателя не должно превышать 1 мм.

После этого включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором магнитострикционного излучателя. Вы обнаружи-

те, что появление кавитационного шума при резонансе сопровождается перемещением уровня жидкости по стеклянной трубке. Для количественных оценок напряжение питания генератора установите 4,5 В, чтобы жидкость по трубке перемещалась не слишком быстро. Секундомером измерьте время прохождения уровнем жидкости отрезков по 10 см.

Теперь можно рассчитать объем жидкости, входящей в трубку за один период колебаний вибратора. Если трубка имеет диаметр d , и за время t поверхность жидкости в ней перемещается на расстояние l , то за единицу времени в трубку заходит объем жидкости

$$V = \frac{l\pi d^2}{4t}.$$

При частоте ультразвуковых колебаний ν за один период в трубку попадает жидкость объемом

$$\Delta V = \frac{l\pi d^2}{4\nu t}. \quad (12.1)$$

Проводя описанные измерения, можно убедиться, что жидкость передвигается по горизонтальной трубке практически с постоянной скоростью. При этом вычисленное по формуле (12.1) значение объема жидкости, попадающей в трубку за период ультразвуковых колебаний вибратора, совпадает с оцененным на глаз объемом кавитационной области. Это свидетельствует о том, что вероятность осуществления указанного механизма проталкивания жидкости по трубке достаточно высока. Значит, предложенная выше теоретическая модель звукокапиллярного эффекта имеет право на существование.

Приведем пример оценочных расчетов, проведенных по данным одного из наших экспериментов. В установке использовалась стеклянная трубка длиной 68 см и диаметром 6 мм. Среднее время прохождения уровнем воды по трубке расстояния 10 см составило 16 с. Колебания торца излучателя совершались с частотой 16 кГц. Количество жидкости, закачиваемой в трубку за период, согласно формуле (12.1) составило $0,01 \text{ мм}^3$. Диаметр шара, имеющего такой объем, примерно равен 0,3 мм. Размер кавитационного облачка в воде, который можно увидеть в центре торца работающего вибратора, имеет тот же порядок величины, поэтому можно сказать, что учебный эксперимент подтверждает учебную теорию.

12.3. Явление сонолюминесценции

Под действием ультразвука многие жидкости начинают светиться. Это явление получило название *сонолюминесценции* (от латинского *sono* — звук). Интенсивность сонолюминесценции

большинства жидкостей очень мала, при облучении ультразвуком лучше других жидкостей люминесцирует глицерин, и он к тому же вполне доступен. Поэтому опыты по сонолюминесценции глицерина можно рекомендовать для повторения. Ставить их лучше всего, используя мощный ультразвуковой генератор, рассмотренный в § 4.2, но вполне подойдет и учебный генератор, описанный в § 4.3.

12.3.1. Обнаружение сонолюминесценции. В прозрачную кювету, заполненную глицерином, погрузите конец вибратора магнитострикционного излучателя и настройте ультразвуковой генератор так, чтобы возле вибратора образовалось кавитационное облачко. Настройка должна быть такой, чтобы был слышен громкий кавитационный шум и возле центра вибратора была видна плотная белая кавитационная область диаметром около миллиметра. Выключите свет и, подождав несколько минут, чтобы глаза привыкли к темноте (*адаптировались на темноту*), посмотрите в направлении торца вибратора. При этом вы заметите небольшую светящуюся область синеватого оттенка. Это свидетельствует о том, что глицерин действительно люминесцирует под действием ультразвука.

Теория этого интересного явления разработана еще далеко не полностью. Согласно одной из гипотез сжатие кавитационных пузырьков при захлопывании приводит к сильному нагреванию и свечению содержащегося в них газа. По другой гипотезе свечение газа в кавитационных пузырьках обусловлено электрическими разрядами. Ясно одно: сонолюминесценция непосредственно связана с ультразвуковой кавитацией.

12.3.2. Способы наблюдения сонолюминесценции. Чтобы опыт по наблюдению сонолюминесценции прошел без особых осложнений, нужно создать соответствующие условия. Свечение глицерина под действием ультразвука незначительно по яркости, поэтому вначале его будет трудно обнаружить. Дело осложняется еще и тем, что в полной темноте нет привычных ориентиров и трудно направить взгляд туда, куда нужно. Чтобы облегчить наблюдения, на свету перед прозрачной кюветой с глицерином расположите лупу, через которую виден торец вибратора (рис. 12.11). Далее, получив в полной темноте ультра-

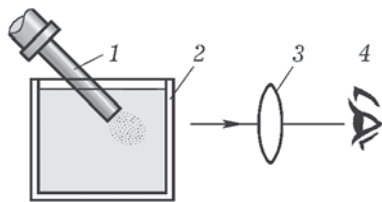


Рис. 12.11. Схема установки для наблюдения сонолюминесценции: 1 — вибратор магнитострикционного излучателя; 2 — кювета с глицерином; 3 — лупа, наведенная на торец вибратора; 4 — глаз наблюдателя

звук максимальной интенсивности, приблизьте глаз к лупе. При этом вы увидите люминесценцию глицерина в виде синеватого свечения. После обнаружения сонолюминесценции лупу можно убрать. Более того, когда экспериментатор точно знает, что нужно увидеть, он сумеет обнаружить сонолюминесценцию и при сравнительно плохом затемнении.

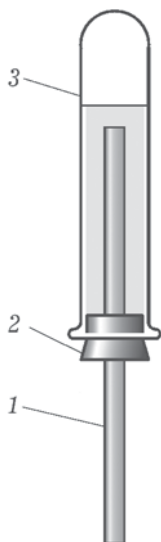


Рис. 12.12. Прибор для наблюдения сонолюминесценции: 1 — ферритовый вибратор магнотростриционного излучателя; 2 — резиновая пробка; 3 — стеклянная пробирка с глицерином

Удобный прибор для наблюдения сонолюминесценции в глицерине изображен на рис. 12.12. Он представляет собой стеклянную пробирку диаметром 15 мм и длиной 150 мм, герметически закрытую резиновой пробкой, в которой за середину закреплен ферритовый вибратор. Пробирка заполнена глицерином настолько, что когда вибратор находится в каркасе обмотки возбуждения стоящего вертикально излучателя, поверхность глицерина оказывается на расстоянии около 5 мм от торца вибратора. В нерабочем состоянии прибор хранится пробиркой вниз, при этом весь глицерин находится в пробирке и не касается вибратора. При постановке опытов прибор переворачивают и вибратор вводят внутрь каркаса обмотки возбуждения так, чтобы он находился там совершенно свободно. Основное преимуще-

ство описанного прибора в том, что он всегда готов к работе, причем для исследования сонолюминесценции требуется совсем небольшое количество глицерина.

12.3.3. Зависимость сонолюминесценции глицерина от температуры. Наблюдения показывают, что при первом включении ультразвука громкость кавитационного шума мала, и глицерин люминесцирует сравнительно слабо. Затем по мере проведения опытов яркость люминесценции повышается, и громкость кавитационного шума растет. Если опыт проводится в пробирке с глицерином, то даже рукой ощущается, что температура глицерина повышается. Заметным становится и снижения вязкости глицерина.

Эти наблюдения приводят к мысли, что с ростом температуры снижается вязкость глицерина, растет интенсивность ультразвуку-

ковой кавитации, а это ведет к увеличению яркости сонолюминесценции. Чтобы проверить сделанное предположение, нужно провести соответствующий эксперимент. Для его постановки можно сделать электрический нагреватель, а температуру глицерина измерять посредством термопары. Пробирку с глицерином покройте слоем тонкой электротехнической слюды. На него намотайте 10 витков нихромового провода диаметром 0,4 мм и обмажьте обмотку термостойкой замазкой из силикатного клея и мела. На выводы обмотки подайте напряжение от регулируемого источника, обеспечивающего силу тока от 0 до 1 А при напряжении до 4 В. К обмотке прижмите термопару медь–константан, включите ультразвук и наблюдайте за яркостью свечения глицерина при различных температурах.

Подобные опыты, проведенные нами, показали, что яркая сонолюминесценция наблюдается при температуре глицерина около 40 °С. Такая температура устанавливается в небольшом сосуде с глицерином без внешнего нагревания под одним лишь действием ультразвука, спустя время, зависящее от объема сосуда. Далее при повышении температуры сонолюминесценция ослабевает и при температуре глицерина около 60 °С невооруженным глазом она уже практически не видна.

Глава 13

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА

Ультразвук получил самое разнообразное практическое применение: медицина, техника, пищевая промышленность, радиоэлектроника, горнорудное дело, фармацевтическая промышленность, металлургия, гидролокация — вот далеко не полный перечень областей, в которых с успехом используется ультразвук. В этой главе мы ограничимся учебными исследованиями тех явлений ультразвуки, которые нашли применение в современных технологиях.

13.1. Максимальная интенсивность ультразвука от ферритового вибратора

Прежде чем исследовать практическое применение ультразвука, нужно убедиться, что от магнитострикционного излучателя с ферритовым вибратором действительно получена максимально возможная интенсивность ультразвука.

13.1.1. Предельная интенсивность ультразвука. Оценим максимальную интенсивность ультразвука, которую обеспечивает ферритовый вибратор, нагруженный на жидкость. Для простоты будем считать, что излучающая поверхность вибратора имеет размеры, существенно превышающие длину ультразвуковой волны в жидкости (рис. 5.22). Тогда вибратор излучает в жидкость плоскую ультразвуковую волну, и ее интенсивность

$$I = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 a^2 = 2\pi^2 \rho c \nu^2 a^2, \quad (13.1)$$

где ρc — акустическое сопротивление жидкости, ν — частота вибратора (см. п. 2.2.5).

Согласно теоретической оценке, сделанной в п. 5.4.6, предельная для ферритового вибратора амплитуда колебаний на частоте $\nu = 18 \text{ кГц}$ составляет

$$a_m = \frac{\sigma_{\text{пр}} l}{\pi E} = (4,2 \div 7,1) \cdot 10^{-6} \text{ м}. \quad (13.2)$$

Подставляя эту оценку в формулу (13.1) и учитывая, что акустическое сопротивление воды $\rho c = 1,5 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$, для макси-

мально достижимой в воде интенсивности ультразвука получаем $I_m = (16,9 \div 48,3) \text{ Вт/см}^2$.

Это явно завышенное значение интенсивности. Чтобы разобраться в причине такого результата, по формуле (2.9) вычислим соответствующее значение амплитуды колебательной скорости торца вибратора

$$v_m = \omega a_m = (0,47 \div 0,80) \text{ м/с.} \quad (13.3)$$

В этом случае амплитуда переменного акустического давления

$$p_m = \rho c v_m = (0,71 \div 1,2) \cdot 10^6 \text{ Па.} \quad (13.4)$$

При таком большом переменном давлении в воде неизбежно возникает кавитация. Приблизненно условием появления кавитации можно считать равенство эффективного значения давления ультразвуковой волны атмосферному давлению

$$p_{\text{эф}} = \frac{p_m}{\sqrt{2}} = p_a. \quad (13.5)$$

Если в жидкости имеет место кавитация, то пользоваться формулой (13.1) уже нельзя. Принято считать, что интенсивность ультразвука в кавитирующей жидкости I_k во столько раз K меньше интенсивности I , вычисленной без учета кавитации, во сколько раз атмосферное давление p_a меньше действующего (эффективного) значения переменного звукового давления:

$$K = \frac{I}{I_k} = \frac{p}{\sqrt{2} p_a}. \quad (13.6)$$

Тогда, учитывая (13.6), вместо выражения (13.1) получаем

$$I_k = \frac{I}{K} = \frac{1}{K} \frac{1}{2} \rho c \omega^2 a^2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{p_a}{\rho c \omega a} \rho c \omega^2 a^2 = \pi \sqrt{2} \nu p_a a. \quad (13.7)$$

Подстановка в эту формулу соответствующих значений показывает, что максимальная интенсивность ультразвука в воде, обеспечиваемая магнитострикционным излучателем с ферритовым вибратором, составляет

$$I_{k_m} = \pi \sqrt{2} \nu p_a \cdot a_m = (3,3 \div 5,6) \text{ Вт/см}^2. \quad (13.8)$$

По вашим измерениям (см. п. 5.4.5) амплитуда колебаний торца ферритового вибратора при максимальной мощности ультразвукового генератора составляет $(6 \pm 0,6) \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Следовательно согласно (13.7) излучатель обеспечивает получение ультразвука в воде интенсивностью $4,8 \pm 0,5 \text{ Вт/см}^2$.

Таким образом, рекомендуемые для учебных опытов ультразвуковой генератор и магнитострикционный излучатель исчер-

пывают все возможности вибратора, выполненного из феррита. Дальнейшее совершенствование магнитострикционного излучателя возможно только в направлении увеличения площади поперечного сечения ферритового вибратора.

13.1.2. Ультразвуковой концентратор. Проведенное только что исследование показало, что на максимальную интенсивность ультразвука, обеспечиваемую магнитострикционным излучателем с ферритовым вибратором, накладывает ограничение предел прочности феррита. Это, однако, не означает, что интенсивность ультразвука не может быть повышена. Одним из способов увеличения интенсивности ультразвуковых колебаний является использование *концентраторов*. На рис. 13.1 изображены концентраторы двух типов, наиболее часто применяющиеся на практике.

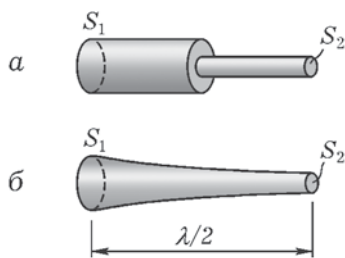


Рис. 13.1. Конструкции концентраторов, нашедших наибольшее применение: *а* — ступенчатый концентратор; *б* — экспоненциальный концентратор

Ультразвуковой концентратор представляет собой прикрепленный к вибратору металлический стержень, сечение которого постепенно (или скачком) уменьшается. Возбуждаемая вибратором ультразвуковая волна не может выйти за пределы стержня, поскольку коэф-

фициент отражения ультразвука на границе металл–воздух весьма близок к единице (см. п. 7.3.3). Если пренебречь потерями, то можно сказать, что вся энергия, поступающая в единицу времени в концентратор, затем проходит в единицу времени через меньшее сечение концентратора.

Таким образом, интенсивность ультразвука — энергия, проходящая в единицу времени через единицу площади — по мере сужения концентратора возрастает. Вместе с ростом интенсивности растет и амплитуда ультразвуковой волны (см. формулу (2.27) в п. 2.2.5). Квадрат амплитуды ультразвуковых колебаний при использовании концентраторов возрастает во столько раз, во сколько раз площадь основания концентратора, которым он прикреплен к вибратору, больше площади его конца. Понятно, что во столько же раз возрастает и колебательная скорость (п. 2.2.1).

Длину концентратора, как правило, выбирают равной половине длины волны ультразвука в материале, из которого изготовлен концентратор. В этом случае концентратор, точно так же, как и вибратор магнитострикционного излучателя, возбуждается

на резонансной частоте, что тоже приводит к росту амплитуды ультразвуковых колебаний.

Длина ферритового вибратора, возбуждаемого на основной частоте, также равна половине длины ультразвуковой волны. Поскольку длина волны ультразвука пропорциональна скорости его распространения (частота ультразвуковых колебаний в вибраторе и концентраторе одинакова), то

$$\frac{l_{\text{ф}}}{l_{\text{к}}} = \frac{c_{\text{ф}}}{c_{\text{к}}}, \quad \text{или} \quad l_{\text{к}} = \frac{c_{\text{к}}}{c_{\text{ф}}} \cdot l_{\text{ф}} \quad (13.9)$$

где $l_{\text{ф}}$ и $l_{\text{к}}$ — длины вибратора и концентратора, а $c_{\text{ф}}$ и $c_{\text{к}}$ — скорости звука в феррите и материале концентратора. Пользуясь этой формулой, можно по длине ферритового вибратора вычислить длину соответствующего концентратора.

13.2. Ультразвуковое диспергирование

Рассмотрим применение ультразвука для создания *аэрозолей* и *гидрозолей* — мелкодисперсных взвесей жидкостей в газах, твердых тел и жидкостей в жидкостях. Ультразвуковое диспергирование широко используется в самых различных областях деятельности человека.

13.2.1. Образование аэрозолей. При лечении некоторых заболеваний врачи применяют *метод ингаляции*: больной вдыхает аэрозоль (взвесь мельчайших капелек в воздухе) соответствующих лекарственных веществ. Чем меньше диаметр капелек аэрозоля, тем более эффективно лечение, так как мелкие капли легче доходят до самых глубин внутренних дыхательных органов. Получить механическим способом аэрозоль достаточно высокого качества довольно трудно. На помощь здесь приходит ультразвук.

Для образования аэрозоля, состоящего из мельчайших практически одинаковых по размерам капелек, обычно используют ультразвук высокой частоты, который возбуждается в веществе с помощью пьезоэлектрических излучателей. Надлежащим образом сфокусированный на поверхности жидкости ультразвуковой пучок дает фонтан. Фонтанирование сопровождается интенсивным образованием тумана, который является ничем иным, как требуемым аэрозолем. В промышленных ультразвуковых установках полученный аэрозоль с помощью специальных фильтров отделяют от значительно более крупных капель лекарственной жидкости, из которых и состоит сам ультразвуковой фонтан.

Чтобы убедиться в возможности использования ультразвука для распыления жидкостей, поставьте следующий опыт. На верх-

ний торец вибратора магнитострикционного излучателя низкой частоты, стоящего вертикально на столе, пипеткой или стеклянной трубкой нанесите каплю воды. Включите ультразвуковой генератор и настройте его в резонанс с вибратором. Вы увидите, что при этом капля распыляется, и над вибратором на мгновение появляется своеобразное облачко, состоящее из мельчайших капелек воды.

Для усиления эффекта следует увеличить рабочую поверхность излучателя. С этой целью к торцу вибратора можно приклеить тонкий металлический диск диаметром 20–40 мм (рис. 13.2).

Распыление жидкости можно использовать для демонстрации распространения ультразвуковых колебаний по металлическому волноводу или концентратору (рис. 13.3).



Рис. 13.2. Распыление жидкости с поверхности приклеенного к торцу вибратора диска

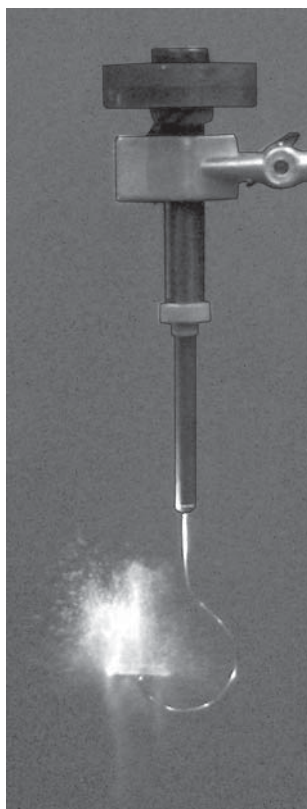


Рис. 13.3. Распыление жидкости с припаянной к медному концентратору пластинки

Длительное распыление жидкости в виде капельного факела нетрудно получить в установке, применявшейся для исследования ультразвукового фонтана: достаточно уровень жидкости в сосуде снизить до величины, при которой смоченный

жидкостью торец вибратора оказывается несколько выше него (рис. 13.4).

13.2.2. Причина ультразвукового распыления жидкостей. На торец вибратора магнитострикционного излучателя поместите каплю воды. Подайте на генератор небольшое напряжение питания и, внимательно глядя на каплю, медленно настройте генератор в резонанс с вибратором. Вы увидите, что вблизи резонанса поверхность капли внезапно мутнеет и на ней появляются мелкие морщинки (рис. 13.5). Это *стоячие капиллярные волны*. По мере увеличения интенсивности ультразвука капиллярные волны нарастают по амплитуде, затем капля распыляется.

Детальное исследование явления показывает, что при увеличении интенсивности ультразвука капиллярные волны, первоначально имевшие синусоидальную форму, становятся остроконечными и с их вершин срываются мельчайшие капельки примерно одинакового размера, которые и образуют аэрозоль.

Любопытно отметить, что впервые это явление в звуковом диапазоне наблюдал и объяснил великий М. Фарадей.

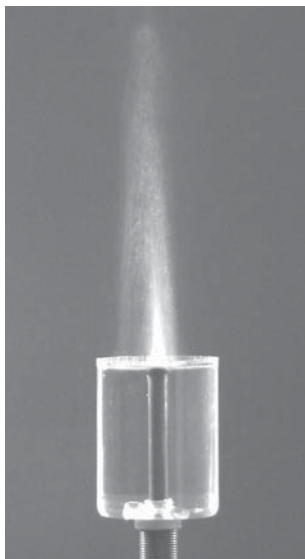


Рис. 13.4. Распыление воды ультразвуком: торец вибратора находится вровень или чуть выше поверхности воды



Рис. 13.5. Капиллярные волны на поверхности капли воды, лежащей на торце вибратора

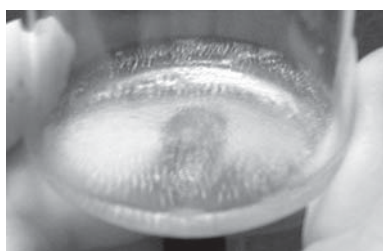


Рис. 13.6. Капиллярные волны на поверхности ацетона в химическом стакане

Заметим также, что возбуждаемые ультразвуком капиллярные волны удобно наблюдать на поверхности ацетона, налитого в тонкостенный химический стакан (рис. 13.6).

13.2.3. Образование горючей смеси. Аэрозоль, получаемый с помощью ультразвука, может быть использован для создания высококачественной горючей смеси в различных двигателях. Чтобы подтвердить это положение экспериментом, нужно на торец вибратора вертикально расположенного магнитострикционного излучателя нанести каплю керосина. Если поднести к ней горящую спичку, то керосин загорится слабым пламенем



Рис. 13.7. Образование горючей смеси

или не загорится вообще. Теперь горящую спичку расположите несколько выше сбоку капли керосина и включите ультразвук — керосин распыляется, и над вибратором на мгновение появляется огненный факел (рис. 13.7). В опыте происходит практически полное сгорание керосина, что свидетельствует о довольно высоком качестве получившейся горючей смеси.

При постановке описанного эксперимента нужно строго соблюдать правила техники безопасности. Кроме того, необходимо

иметь в виду, что наносить керосин на торец вибратора следует очень аккуратно, чтобы горячее не потекло вниз по вибратору. Если это случилось, то получить ультразвук такой интенсивности, которая достаточна для распыления жидкости, вряд ли удастся. Тогда нужно достать ферритовый вибратор из каркаса обмотки возбуждения, насухо вытереть его сухой тряпочкой и вновь повторить опыт.

13.2.4. Использование ультразвука для получения эмульсий. В пробирку налейте воду, поверх нее керосин и закройте пробирку пробкой. Несколько раз сильно встряхните пробирку, взбалтывая ее содержимое. Слой керосина при этом исчезает, разбиваясь на капли различного размера, плавающие внутри воды. Такая взвесь одной из двух несмешивающихся жидкостей в другой называется *эмульсией*.

Эмульсии широко применяются в различного рода производственных процессах. Так, например, эмульсии минеральных масел в воде применяются при обработке металлов для смазки и охлаждения режущего инструмента; эмульсии используются в фармацевтической промышленности для приготовления лекарственных составов; жировые эмульсии полезны в мясной, хлебопекарной, кондитерской промышленности и т. д.

Приготовленная в пробирке встряхиванием эмульсия керосина в воде малоустойчива: спустя небольшое время после прекращения механического воздействия образовавшаяся при этом взвесь капелек керосина в воде претерпевает изменения. Капли керосина всплывают вверх и несмешивающиеся жидкости вновь оказываются разделенными резкой границей.

Для получения высокодисперсных устойчивых эмульсий применяют ультразвук. Облучение ультразвуком позволяет получить взвесь весьма мелких капелек одной из несмешивающихся жидкостей в другой, причем все капельки оказываются примерно одного и того же размера. Поэтому приготовленная с помощью ультразвука эмульсия очень устойчива и может сохраняться длительное время.

Чтобы убедиться в этом, в сосуд с водой и керосином опустите ферритовый вибратор магнитострикционного излучателя так, чтобы его конец находился вблизи границы раздела этих несмешивающихся жидкостей. Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором излучателя. При этом возникает белое облачко эмульсии керосина в воде, быстро растущее и распространяющееся от торца работающего вибратора (рис. 13.8). Если поднять вибратор от границы раздела жидкостей, то происходит интенсивное образование эмульсии воды в керосине.

Проделанные опыты непосредственно показывают, что процесс ультразвукового эмульгирования наиболее эффективен то-

гда, когда громче кавитационный шум, создаваемый работающим в жидкости излучателем. Отсюда следует, что причина образования эмульсий в ультразвуковой кавитации. Образующиеся под

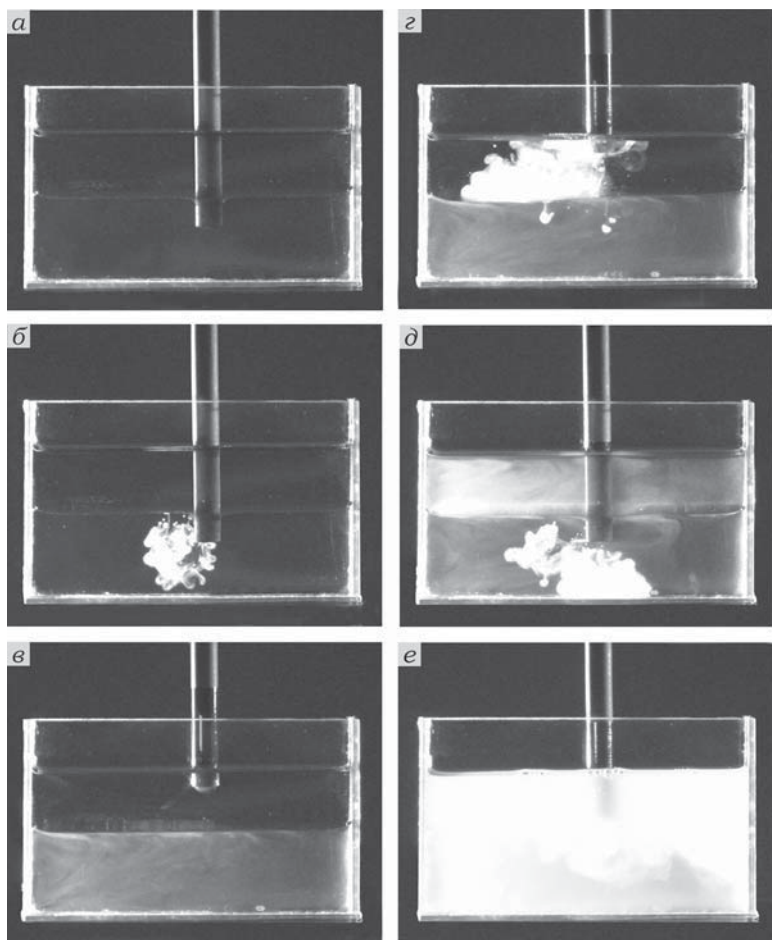


Рис. 13.8. Образование эмульсии под действием ультразвука: *a* — неработающий излучатель с капелькой керосина на торце погружен в воду; *б* — после включения ультразвука капелька керосина распыляется в воде; *в* — неработающий излучатель с капелькой воды на торце находится в керосине; *г* — возникновение эмульсии воды в керосине; *д, е* — дальнейшее образование эмульсии керосина в воде и воды в керосине

действием интенсивного ультразвука кавитационные пузырьки, схлопываясь, развивают большие местные давления, что приводит к дроблению жидкости на мельчайшие капельки. Радиационное давление и ультразвуковой ветер способствуют равномер-

ному перемешиванию этих капелек одной жидкости в другой; в результате получается высокодисперсная устойчивая эмульсия.

Впрочем, возможен и иной физический механизм образования эмульсий, подобный тому, который ответствен за образование аэрозолей. Наблюдения показывают, что при погружении неработающего вибратора сквозь керосин в воду на его торце остается капля керосина, которая при включении ультразвука распыляется в воде, образуя эмульсию. Напротив, при поднятии вибратора из воды в керосин на его торце остается капля воды, которая при включении ультразвука распыляется в керосине. Распыление этих капель может быть вызвано не только кавитацией, но и ростом на их поверхностях капиллярных волн.

13.2.5. Образование суспензий. Кавитация, сопровождающая распространение мощной ультразвуковой волны в жидкости, может быть использована не только для получения эмульсий несмешивающихся жидкостей, но и для дробления твердого вещества. Сверхтонкое измельчение вещества приводит к образованию взвеси мелких твердых частиц в жидкости; такая взвесь называется *суспензией*.

Образование суспензии под действием ультразвука вы можете наблюдать, поставив следующий опыт. На дно пробирки или блюдечка поместите кусочек нафталина и залейте его водой. Расположите магнитострикционный излучатель так, чтобы его вибратор почти касался нафталина. При работе излучателя вы заметите появление белого облачка взвеси мельчайших частиц нафталина в воде. Это и есть суспензия нафталина. Опыт можно поставить и с кусочком парафина, но в этом случае придется использовать воду, подогретую примерно до 40 °С.

На рис. 13.9 показан процесс образования суспензии мела в воде под воздействием ультразвука низкой частоты.

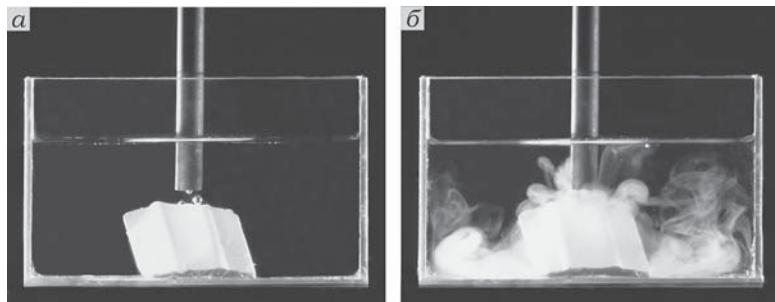


Рис. 13.9. Образование суспензии под действием ультразвука: *а* — неработающий излучатель находится в воде вблизи кусочка мела; *б* — после включения ультразвука происходит интенсивное измельчение мела

Получаемые с помощью ультразвука суспензии так же, как и эмульсии, часто применяются в различных отраслях народного хозяйства. Например, крашение тканей требует, чтобы частицы красителя были как можно более мелкими и одинаковыми по величине. В этом случае качество окраски тканей получается наиболее высоким, а цвета — яркими и насыщенными. Ультразвук позволяет изготовить высокодисперсную суспензию красителя, которая так необходима для производственного крашения тканей. Сверхтонкое дробление с помощью ультразвука также нашло применение для приготовления порошков абразивов, металлов, керамики и других материалов.

Чтобы убедиться, что ультразвук ускоряет процесс растворения краски в растворителе, сделайте такой несложный опыт. В блюдечко с холодной водой бросьте твердый кусочек акварельной краски. Растворение при этом идет довольно медленно. Если же вы опустите в воду торец вибратора работающего излучателя, то увидите, как процесс растворения и перемешивания акварельной краски в воде значительно ускорится.

13.3. Ультразвуковая коагуляция

Ультразвук не только вызывает образование аэрозолей, эмульсий и суспензий, то есть не только дробит жидкое и твердое вещество на мельчайшие частицы, но и при определенных условиях способствует противоположному процессу образования из мелких частиц вещества более крупных. Этот процесс носит название *коагуляции*.

13.3.1. Ультразвуковая коагуляция гидрозолей. Ультразвуковая коагуляция с успехом применяется для очистки жидкостей и газов. Дым, туман, пыль, сопутствующие различным производственным процессам, загрязняют окружающую среду. Кроме того, вместе с производственными отходами в атмосферу зачастую выбрасываются ценные продукты. Различные фильтры (механические, электростатические и т. д.) не улавливают слишком мелкие частицы. Облучение ультразвуком или звуком ведет к укрупнению частиц аэрозоля, которые в дальнейшем могут быть удалены из выбрасываемого в атмосферу газа обычными фильтрами.

Рекомендованные в книге магнитострикционные излучатели ультразвука, к сожалению, не позволяют наблюдать коагуляцию аэрозолей. Но зато, пользуясь ими, можно экспериментально исследовать коагуляцию гидрозолей.

В пробирке с ацетоном взболтайте небольшое количество алюминиевой краски («серебрянки»). Добавьте в пробирку

немного воды и вновь взболтайте содержимое пробирки. Если теперь поставить пробирку вертикально, то можно заметить, как к поверхности жидкости поднимаются мелкие частицы алюминиевой краски. Быстро опустите в жидкость вибратор магнитострикционного излучателя и включите ультразвук. Вы увидите, что сразу, как только в жидкости появляется ультразвуковая волна, медленно всплывающие частицы алюминиевой краски укрупняются и быстро всплывают вверх. Жидкость в пробирке становится почти прозрачной.

Наблюдать коагуляцию гидрозолей можно и в опытах со стоячей ультразвуковой волной в жидкости. Повторите, например, те опыты, где используется помещенная на торец вибратора магнитострикционного излучателя пробирка с суспензией алюминиевой краски в ацетоне. Вы заметите, как частицы краски собираются в плотные образования, расположенные в пучностях смещений стоячей волны (см. рис. 9.4). Попробуйте использовать в этих опытах магнитострикционный излучатель средней частоты (п. 9.2.1). Обратите внимание на то, что в жидкости с процессом коагуляции конкурирует диспергирование, вызванное кавитацией.

Интересные эффекты коагуляции наблюдаются при возбуждении стоячей ультразвуковой волны средней частоты в суспензии крахмала в воде. В этих опытах нужно применять суспензию с достаточно высокой концентрацией крахмала. Наберите в трубку с внутренним диаметром 5–6 мм суспензию крахмала в воде и поместите ее на торец вибратора магнитострикционного излучателя средней частоты (см. п. 5.5.2). При настройке генератора в резонанс с вибратором вы увидите, что в пучностях смещений стоячей волны образуются плотные сгустки крахмала, которые, спустя небольшое время возрастают настолько, что не могут удержаться в пучностях и оседают вниз. При этом жидкость быстро становится прозрачной.

Наконец, коагуляцию можно наблюдать и на низкой ультразвуковой частоте. Налейте в чашку Петри суспензию крахмала в воде и включите ультразвук. Вы обнаружите, что крахмал на дне чашки собирается в комочки, а дно в некоторых участках очищается от крахмала. На рис. 13.10 представлен результат этого опыта, полученный исключительно за счет облучения суспензии ультразвуком при совершенно неподвижном вибраторе излучателя.

Подобрав оптимальное положение вибратора магнитострикционного излучателя, можно добиться установления в налитой в чашку Петри жидкости стоячей ультразвуковой волны. В этом случае крахмал коагулирует в ее пучностях (см. рис. 9.6), подобно тому, как это имело место в опытах по возбуждению стоячей

волны в стеклянных трубках (см. п. 9.2.2). Получающаяся картина очень напоминает фигуры Хладни на упругих пластинках (рис. 13.11).

Физической причиной коагуляции, как вы уже догадались, является наличие сил гидродинамического взаимодействия между частицами, находящимися в поле ультразвуковой волны (см. п. 6.5.2). Кроме того, важную роль в коагуляции играют вынужденные волной колебания частиц, радиационное давление и акустический ветер. Перечисленные факторы приводят



Рис. 13.10. При распространении ультразвука в суспензии крахмала в воде происходит коагуляция — мельчайшие частички крахмала объединяются в относительно крупные комочки

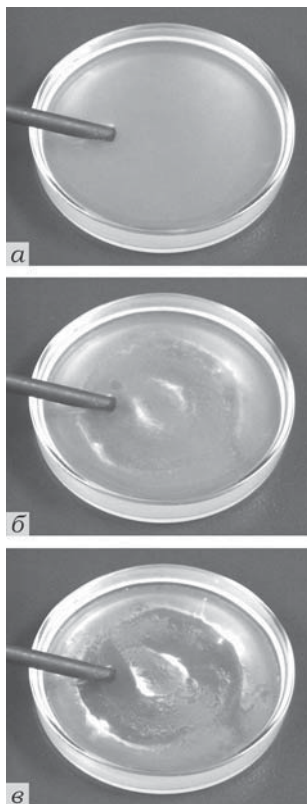


Рис. 13.11. Благодаря коагуляции крахмала визуализируется распределение интенсивности ультразвука в жидкости: а — ультразвук выключен; б-в — ультразвук включен

к быстрому сближению и укрупнению взвешенных в газе или жидкости мелких твердых частиц, жидких капелек, газовых пузырьков. Однако полная физическая теория ультразвуковой коагуляции до сих пор отсутствует, предложенные гипотезы недостаточно обоснованы экспериментом.

13.3.2. Ультразвуковая дегазация. При варке оптического стекла важно избежать появления в расплаве газовых пузырьков. Наличие даже незначительного количества таких пузырьков

в линзах, призмах, световодах и других элементах оптических приборов приводит к резкому снижению качества изображения, потерям энергии света. Для удаления газовых пузырьков из расплавов, растворов и вообще жидкостей также используют ультразвук.

Между пузырьками газа, находящимися в ультразвуковом поле, — как между твердыми и жидкими частицами в опытах со стоячей волной в воздухе и жидкости — возникают силы взаимного притяжения. Под действием этих сил пузырьки сближаются и, сливаясь, увеличиваются в размерах. Благодаря наличию в жидкости ультразвукового ветра, радиационного давления и выталкивающей силы, относительно крупные газовые пузырьки всплывают на поверхность жидкости и исчезают. Это, разумеется, весьма схематическое описание сущности процессов, происходящих при ультразвуковой дегазации. Но даже из него видно, что дегазация является частным случаем ультразвуковой коагуляции.

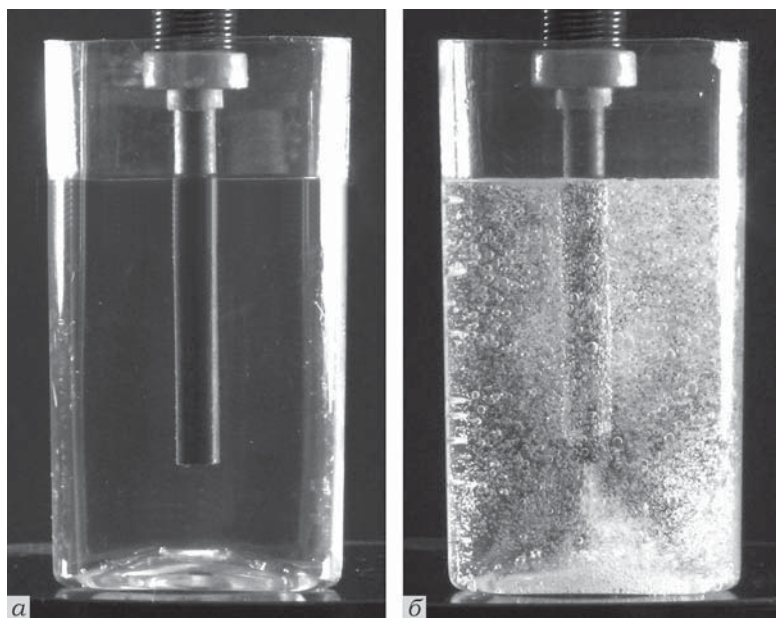


Рис. 13.12. Дегазация газированной воды: *а* — ультразвук выключен; *б* — ультразвук включен

Дегазирующее действие ультразвука несложно проверить на нескольких простых опытах.

В пробирку или стакан налейте водопроводную воду. Включите ультразвуковой генератор и погрузите в воду ферритовый

вибратор магнитострикционного излучателя. При этом образующиеся на стенках пробирки и возле вибратора пузырьки воздуха всплывают наверх.

Если заменить воду керосином (или газированной водой), то дегазация видна более отчетливо: непосредственно у торца вибратора растут многочисленные газовые пузырьки, которые затем всплывают на поверхность (рис. 13.12). Образование пузырьков, хотя и более медленное, происходит по всему объему жидкости. Можно проследить, как небольшой, еле различимый глазом, газовый пузырек (зародыш) постепенно растет, колеблется, сливается с другими пузырьками и, наконец, достигнув определенного размера, уходит на поверхность.

Опыт можно поставить также и с глицерином, насыщенным воздухом путем встряхивания в пробирке.

Дегазацию не нужно путать с ультразвуковой кавитацией. Это два различных явления. Признаки, отличающие кавитацию от дегазации, рассмотрены выше.

13.4. Ультразвуковая очистка

Ультразвуковые волны, вызывая эмульгирование, диспергирование, коагуляцию, являются эффективным средством очистки предметов от различного рода загрязнений. Они совершенно незаменимы там, где другие методы очистки пасуют.

13.4.1. Использование ультразвука для очистки. В часовой промышленности необходима тщательная очистка большого количества мелких деталей сложной конфигурации, например, шестеренок, подшипников, пружинок и т. п. Малейшее загрязнение этих деталей может привести к снижению точности хода или даже к выходу из строя часов. Столь же высокие требования к чистоте деталей предъявляются и в электронной промышленности.

Ручная механическая чистка мелких деталей сложной формы очень трудоемка и, главное, не гарантирует требуемую степень чистоты. Поэтому, как только была обнаружена возможность использования ультразвука для очистки деталей, без промедления постарались реализовать ее в промышленности. В настоящее время очистка деталей ультразвуком получила всеобщее признание и широко распространена.

Производственные испытания показали, что ультразвуковая очистка экономически выгодна не только при работе с мелкими деталями, но и при обработке довольно крупных объектов. Так ультразвук используется при очистке паровых котлов от накипи, труб и трубопроводов, проката и полосовой стали от ржавчины, для очистки оптических деталей, стеклянной тары в пищевом и

фармацевтическом производстве, печатных плат и многого другого.

Скорость ультразвуковой очистки и ее качество зависят от целого комплекса факторов. Вы, конечно, догадались, что важнейшей физической причиной очистки является уже неплохо изученное вами явление кавитации. Очистка происходит благодаря повреждению, разрушению и отслаиванию слоя загрязнений от деталей под действием ударных волн, развивающихся при захлопывании кавитационных пузырьков. Следовательно, скорость очистки ультразвуком определяется в первую очередь интенсивностью кавитационного процесса. Изучение этого явления позволило установить, что наиболее благоприятными для ультразвуковой очистки являются частоты порядка 20–50 кГц.

Ультразвуковая очистка более эффективна, если жидкость, в которую помещена обрабатываемая деталь, является одновременно растворителем загрязнения детали. В этом случае ультразвук не только удаляет слой грязи с поверхности детали, но и способствует ее быстрому растворению, что, естественно, ускоряет очистку.

Очистка ультразвуком применяется и для удалений заусениц с деталей, изготовленных штамповкой или иным недостаточно «чистым» способом. Для этого детали с заусеницами погружают в ванну, в которой находится суспензия абразива в воде. Мелкие частицы абразива, ударяясь под действием ультразвуковой волны о поверхность детали, значительно ускоряют процесс кавитационного разрушения. Интенсивность ультразвука можно подобрать такой, что разрушения поверхности детали под ударами частичек абразива будут практически не ощутимы, а гораздо менее прочные заусеницы окажутся полностью удаленными.

13.4.2. Экспериментальное исследование ультразвуковой очистки. Сравнительно маломощный учебный ультразвуковой генератор не позволяет поставить опыт по удалению заусенцев с металлических деталей. Зато с его помощью вы легко можете убедиться в практической пригодности ультразвука для очистки сложных деталей от различного рода загрязнений. Мы надеемся, что вы сумеете проявить самостоятельность и попробуете разные способы очистки ультразвуком от самых различных загрязнений, и поэтому опишем лишь два опыта, иллюстрирующие ультразвуковую очистку.

Получите ультразвуковой фонтанчик в керосине, пользуясь для этого любым из освоенных вами способов введения ультразвука в жидкость. Медную проволоку диаметром 0,2–0,4 мм произвольно скрутите так, чтобы получился запутанный моток размером примерно 5 мм. Загрязнив этот моток проволоки, на-

пример, пластилином, опустите его в керосиновый ультразвуковой фонтанчик (рис. 13.13). Вы заметите, как спустя несколько секунд после погружения проволоки в фонтанчик, до этого прозрачный керосин приобретает белесоватый цвет, и проволока начинает очищаться от пластилина. Вскоре запутанный моток проволоки окажется полностью очищенным.

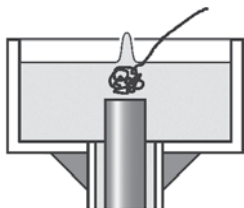


Рис. 13.13. Схема опыта по наблюдению ультразвуковой очистки

На рис. 13.14 приведены фотографии еще одного варианта опыта по ультразвуковой очистке. Металлическая деталь сложной формы или моток проволоки загрязнены пластилином или солидолом. Ферритовый вибратор магнитострикционного излучателя за середину закреплен в дне прозрачного пластикового сосуда. В сосуд налита вода, а поверх нее — керосин так, что конец вибратора находится в керосине. Очищаемая деталь расположена в керосине вблизи торца вибратора.

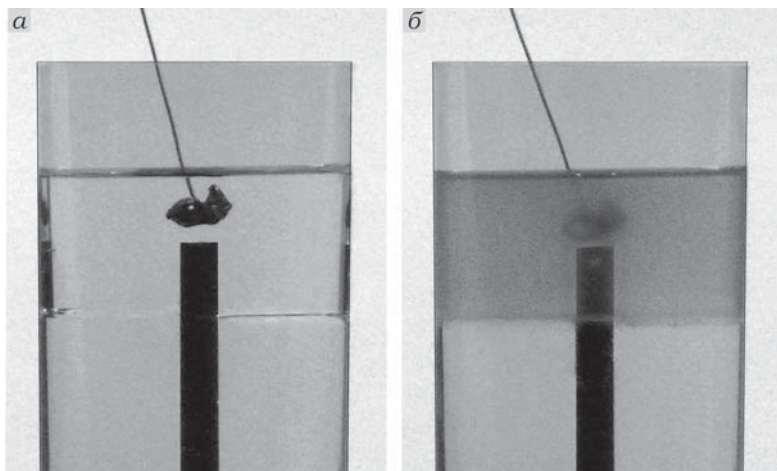


Рис. 13.14. Медная проволочка, покрытая пластилином, постепенно очищается от него под действием ультразвука, при этом образуется суспензия пластилина в керосине, который налит поверх воды: а — ультразвук выключен; б — ультразвук включен

Очистку мелких деталей можно произвести и в ультразвуковой ванне — легкой баночке, тем или иным способом прикрепленной к торцу ферритового вибратора. Расположите магнитострикционный излучатель вертикально на столе, налейте в баночку немного керосина и опустите в нее различные детали — болтики,

шестеренки, шайбочки, гайки, — загрязненные, например, солидом. Выключите генератор и настройте его в резонанс с излучателем. После непродолжительного «озвучивания» находящиеся в ванне детали будут полностью очищены.

13.5. Использование ультразвука в электрохимии

Ультразвук значительно интенсифицирует процессы электрохимического осаждения металлов. Эти процессы играют важную роль в технике и различных технологиях, обеспечивая нанесение металлических покрытий на изделия произвольной формы.

13.5.1. Воздействие ультразвука на электролиз. Согласно закону Фарадея количество выделившегося на катоде вещества пропорционально силе тока и времени прохождения его через электролит. Казалось бы, если при электролизе нужно за определенный промежуток времени увеличить осаждение металла на изделие, достаточно увеличить силу тока. Однако опыт показывает, что с увеличением плотности тока, начиная с некоторого значения, интенсивность осаждения металла резко падает. Это объясняется тем, что при электролизе концентрация ионов в электролите становится неравномерной, причем вблизи катода она уменьшается. Кроме того, на катоде выделяется водород что приводит к так называемой поляризации катода (он покрывается мельчайшими пузырьками газа). Наличие посторонних примесей на катоде ухудшает качество покрытия, делает его пористым и непрочным.

Введение ультразвука в электролитическую ванну вызывает акустические течения, дегазацию, кавитацию, очистку катода и звукокапиллярный эффект. Такое комплексное воздействие приводит к тому, что за счет интенсивного перемешивания электролита в прикатодном слое происходит выравнивание концентрации ионов, рост и вытеснение из электролита газовых пузырьков. Очистка катода и проникновение электролита в мельчайшие его капилляры ведет к росту активной поверхности катода почти в три раза.

В результате интенсивность процесса электроосаждения металла резко возрастает, а допустимые плотности тока для большинства электролитов увеличиваются в 5–10 раз, достигая 8–10 А/дм². Под действием ультразвука за то же время электролиза возрастает толщина покрытия, повышается его плотность, увеличиваются твердость и адгезия к подложке, улучшается структура покрытия, которое становится мелкозернистым и блестящим.

Ультразвуковые электролитические ванны применяются в машиностроении для блестящего никелирования, хромирования, меднения, цинкования, кадмирования, серебрения, золочения. Существенно, что оптимальным является ультразвук частотой 16–44 кГц и интенсивностью 3–5 Вт/см². Но именно такой ультразвук и дают ваши учебные магнитострикционные излучатели. К слову сказать, в ультразвуковых электрохимических процессах предпочитают использовать магнитострикционные излучатели с ферритовыми вибраторами, обмотка возбуждения которых выполнена проводом с химически стойкой изоляцией. Это позволяет располагать излучатели непосредственно в электролите, обеспечивая оптимальное нанесение покрытий на детали любой конфигурации.

13.5.2. Дегазация электролита. Как уже говорилось, при гальванизации электроды нередко покрываются слоем пузырьков газа, препятствующим соприкосновению с ними электролита, что приводит к замедлению процесса гальванизации. Для ускорения этого процесса применяют ультразвук, очищающий электролит и электроды от избытка газа.

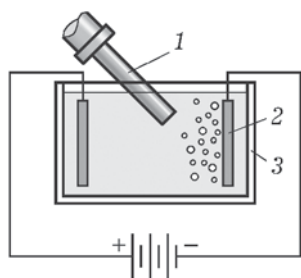


Рис. 13.15. Схема опыта по дегазации электролита под действием ультразвука: 1 — вибратор магнитострикционного излучателя; 2 — катод; 3 — кювета с электролитом

те ультразвук. Вслед за этим начнется интенсивный процесс дегазации электролита (рис. 13.15).

13.5.3. Электролитическое осаждение металла. Опыт по воздействию ультразвука на процесс электролитического осаждения металла можно провести в стакане с раствором медного купороса, угольным и медным электродами. Мы, однако, рекомендуем сделать демонстрационный прибор, например, подобный показанному на рис. 13.16.

Начните с изготовления прозрачной кюветы размером 70 × 90 × 160 мм из оргстекла толщиной 4 мм. Затем из листо-

вой меди толщиной около 1 мм вырежьте пластину размером 70×100 мм и закрепите ее на держателе из оргстекла. На таком же держателе закрепите плоский или цилиндрический угольный электрод. Размеры его несущественны, к примеру, мы использовали графитовую пластину размером $8 \times 30 \times 100$ мм, но можно взять и графитовый стержень от батарейки. На медном и угольном электродах установите клеммы. Наконец, изготовьте держатель для магнитострикционного излучателя.

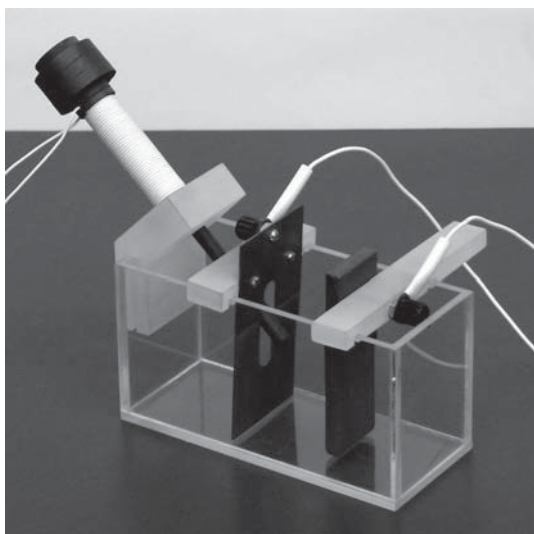


Рис. 13.16. Прибор для изучения электролитического осаждения меди под действием ультразвука

Поместите все элементы прибора в кювету и внимательно посмотрите, что сделано неудачно. В первую очередь вы обнаружите, что вибратор не попадает в пространство между электродами. Значит, его нужно ввести сбоку или, лучше, сделать в медном электроде специальную прорезь для вибратора. Возможно, вам не понравится, что держатели элементов прибора ненадежны. Тогда нужно продумать способ крепления их на стенках кюветы: он должен быть простым, обеспечивать неподвижность электродов и излучателя, а также позволять быстро удалять их из кюветы. В конструкции, фотография которой приведена на рис. 13.16, все это учтено, поэтому, рассмотрев фотографию, вы легче сможете разработать собственный прибор.

Фотография демонстрационной установки приведена на рис. 13.17. Для получения постоянного тока можно использовать любой подходящий источник, дающий напряжение до 10 В (например, две последовательно соединенные батарейки кар-

манного фонаря), но лучше применить регулируемый источник питания, обеспечивающий получение тока до 3 А. Если источник

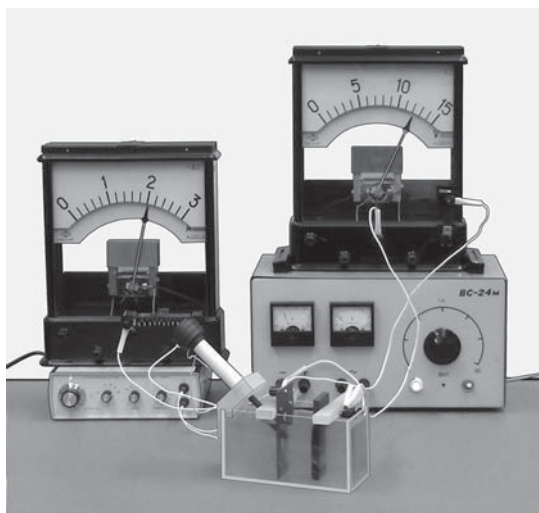


Рис. 13.17. Экспериментальная установка для изучения электролитического осаждения меди под действием ультразвука

не содержит цифровых или стрелочных индикаторов тока и напряжения, то последовательно с электролитической ванной следует включить амперметр, а параллельно выходу источника — вольтметр. Перед проведением эксперимента нужно приготовить электролит, в качестве которого следует использовать водный раствор медного купороса, который вполне доступен. Чтобы получить 3%-ный раствор, в 485 г воды растворите 15 г медного купороса, 6%-ный раствор — в 470 г воды растворите 30 г медного купороса. Приготовленные растворы отфильтруйте.

Электролит залейте в кювету, угольный электрод подключите к отрицательному, а медный — к положительному полюсу источника питания и установите напряжение 10 В. Через 3–5 минут выключите питание и достаньте угольный электрод из электролита. Вы обнаружите, что слой меди, покрывающий этот электрод, очень рыхлый и легко снимается даже пальцем. Отсюда следует, что при больших плотностях тока металлическое покрытие при электролизе получается малопрочным.

Через прорезь в медном электроде введите в электролит ферритовый вибратор магнитострикционного излучателя, а сам излучатель установите в специальном кронштейне, расположенном на стенке кюветы. Угольный электрод очистите от медного налета и погрузите в электролит на расстоянии 10–30 мм от

торца ферритового вибратора. Настройте генератор в резонанс с вибратором по максимальной громкости кавитационного шума. Затем на электроды подайте то же самое постоянное напряжение 10 В и через то же самое время 3–5 минут, что и раньше, отключите его. Достав угольный электрод, вы обнаружите, что в этом случае слой меди, покрывающий его, оказывается настолько плотным и прочным, что его с трудом можно снять даже ножом. Таким образом, опыт показывает, что облучение ультразвуком позволяет в электролитическом процессе получать качественные металлические покрытия при значительных плотностях тока и, следовательно, за меньшее время.

Детально исследуйте явления, о которых здесь идет речь. Демонстрационный опыт показывает только суть процесса, а его особенности можно узнать лишь в систематических экспериментах. Попробуйте использовать растворы медного купороса различных концентраций, определите максимальные плотности тока, при которых получаются достаточно качественные покрытия медью при облучении и без облучения ультразвуком, попробуйте покрыть медью неметаллический предмет и т. д. Конечно, если проблема вас заинтересовала, следует поэкспериментировать и с другими электролитами.

13.6. Ультразвуковая пайка

Кавитационные пузырьки, способствующие очистке от загрязнений и коррозии, могут также удалять с поверхностей деталей весьма стойкие пленки окислов. Поэтому ультразвук широко используют в промышленности при лужении материалов, залудить и спаять которые обычными способами не удастся. Различные по конструкции ванны для ультразвукового лужения, ультразвуковые паяльники и другие аналогичные им устройства позволили существенно повысить эффективность многих технологических процессов.

13.6.1. Залуживание и пайка алюминия. Алюминий и его сплавы практически не поддаются пайке с обычными флюсами: как только поверхность алюминия окажется очищенной, на воздухе она сразу же покрывается тонкой, но весьма прочной, пленкой окиси, препятствующей соприкосновению расплавленного припоя с чистым металлом. Ультразвуковые колебания, подводимые к алюминиевой поверхности в момент пайки, разрушают пленку окисла алюминия и дают возможность попасть расплавленному припою на чистый металл. При этом алюминий залуживается. К залуженной области детали можно уже обычными методами припаять другую деталь.

На рис. 13.18 приведена функциональная схема выпускаемых отечественной промышленностью ультразвуковых паяльников.

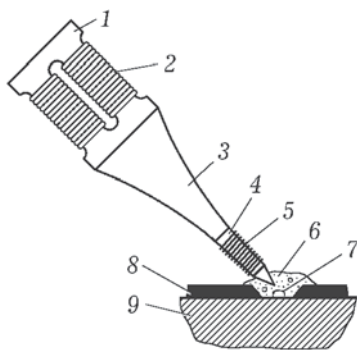


Рис. 13.18. Промышленный ультразвуковой паяльник: 1 — вибратор магнитострикционного излучателя, набранный из никелевых пластин; 2 — обмотка возбуждения; 3 — концентратор; 4 — жало паяльника; 5 — электрический нагреватель; 6 — флюс; 7 — припой; 8 — оксидная пленка; 9 — алюминиевая деталь

Электрические колебания высокой частоты, создаваемые электронным генератором, подаются на обмотку возбуждения магнитострикционного излучателя. К торцу вибратора (который изготавливается из никелевых пластин) прикреплен концентратор, а к нему — нагревательный элемент, заканчивающийся жалом. Ультразвуковые колебания, передающиеся через концентратор к жалу паяльника, вызывают появление в расплавленном припое кавитационных пузырьков. Под действием кавитации (и вообще всей совокупности явлений, сопровождающих мощный ультразвук в жидкости) разрушается окисная пленка, обнажая чистый металл, и в результате происходит залуживание алюминия.

Чтобы подтвердить возможность использования ультразвука для залуживания, сделайте такой опыт. Набрав на жало паяльника каплю припоя, прикоснитесь жалом к поверхности алюминиевой пластинки. Как следует прогрейте паяльником алюминий. Вы видите, что припой не смачивает металл. Попробуйте воспользоваться обычными флюсами, например, канифолью или паяльной кислотой. Если под флюсом вы не будете передвигать жало паяльника, царапая поверхность алюминия и удаляя оксидную пленку, то по-прежнему залуживание происходить не будет.

Теперь прижмите к произвольному месту пластинки торец вибратора магнитострикционного излучателя и настройте генератор в резонанс с вибратором. Вы заметите, как капля припоя быстро расплавляется по определенным участкам алюминиевой пластинки: алюминий залужен. Перемещая по поверхности алюминия жало паяльника с припоем и вибратор излучателя, можно залудить всю пластинку.

13.6.2. Залуживание стекла и керамики. Ультразвук позволяет покрыть полудой не только алюминий, но и стекло, фарфор, керамику и другие материалы, о возможности лужения которых никто и не подозревал.

На электроплитке в металлической баночке расплавьте припой (рис. 13.19). В качестве флюса используйте буру, кристаллики которой насыпьте на поверхность припоя. В расплав погрузите конец ферритового вибратора магнитострикционного излучателя и подождите до тех пор, пока он не прогреется до температуры плавления припоя. Включите генератор и настройте его в резонанс с вибратором (о качестве настройки можно судить по громкости кавитационного шума). Спустя несколько минут, выключите установку и достаньте вибратор из каркаса обмотки возбуждения излучателя. Вы заметите, что конец ферритового стержня (керамика!) оказался покрытым тонким слоем полуды. К этому слою можно уже припаять медную проволоку (пользоваться флюсом при этом не следует).

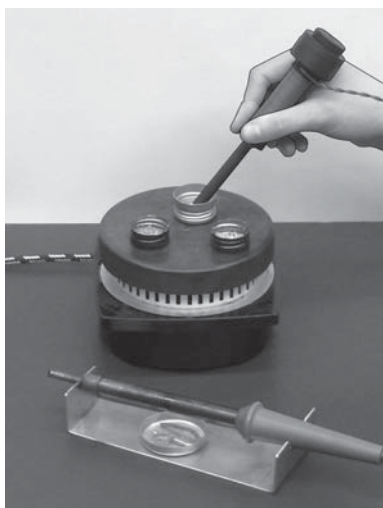


Рис. 13.19. Лужение феррита: в металлической емкости на электроплитке расплавлен припой, торец вибратора опущен в расплав; при включенном ультразвуке происходит облуживание феррита



Рис. 13.20. Спай феррита с медью, полученный при использовании ультразвука, выдерживает нагрузку в несколько килограммов

Спай в этом опыте получается не особо прочным: он выдерживает нагрузку всего до нескольких килограммов (рис. 13.20). Но важно то, что вами принципиально доказана возможность лужения феррита! Без ультразвука этого сделать нельзя.

Нагрузите спай до такой степени, чтобы произошел его обрыв. На отделившемся кусочке припоя вы заметите тонкий слой

феррита. Это свидетельствует о том, что под действием ультразвука расплавленный припой проникает внутрь феррита.

13.7. Обработка твердых и хрупких материалов

Одним из важнейших практических применений ультразвука является использование его для обработки твердых и хрупких материалов. Стекло, керамика, алмаз, феррит — все это такие материалы, обработка которых обычными методами чрезвычайно затруднена. Ультразвук же позволяет, например, сверлить в этих труднообрабатываемых материалах отверстия любой формы.

13.7.1. Ультразвуковой сверлильный станок. На рис. 13.21 изображена схема основного элемента ультразвукового сверлильного станка. Переменный ток частотой 18–30 кГц, вырабатываемый электронным генератором, проходит через обмотку возбуждения магнитострикционного излучателя. К вибратору

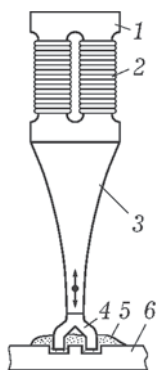


Рис. 13.21. Промышленный ультразвуковой сверлильный станок: 1 — вибратор магнитострикционного излучателя, набранный из никелевых пластин; 2 — обмотка возбуждения; 3 — концентратор; 4 — инструмент из мягкой стали; 5 — суспензия абразива в воде; 6 — обрабатываемая деталь

прикреплен концентратор, необходимый для увеличения амплитуды колебаний. Концентратор обычно изготавливают из дешевого мягкого материала (например, низкосортной стали). К торцу концентратора крепится рабочий инструмент, по форме конца которого будет сверлиться отверстие в детали. Между рабочей поверхностью инструмента и обрабатываемой деталью вводится абразив, смешанный с водой — абразивная суспензия.

Внешне промышленный ультразвуковой станок напоминает обычный сверлильный, но, разумеется, рабочее движение инструмента в нем не вращательное, а колебательное. Во время работы инструмент колеблется с высокой частотой, и в детали образуется полость, копирующая форму конца инструмента.

Физическая сущность процесса обработки была не сразу правильно понята. Полагали, что основную роль здесь

играет ультразвуковая кавитация. Однако специальные исследования, проведенные с помощью высокоскоростной киносъемки, показали, что обработка материала происходит следующим образом. Частицы абразива, соприкоснувшиеся с концом колеб-

лющегося инструмента, получают от него значительные ускорения и ударяются о поверхность детали. В результате подобного единичного удара происходит выкалывание небольшой части обрабатываемого материала. Поскольку одновременно работающих частиц абразива очень много, и удары их о поверхность детали происходят с большой частотой (20000–30000 раз в секунду!), скорость обработки материала достаточно велика. Даже описанная ниже маломощная модель ультразвукового сверлильного станка позволяет просверлить в стекле толщиной 2 мм сквозное отверстие площадью 2–4 мм² не более, чем за 3–5 минут.

При работе ультразвукового сверлильного станка происходит не только обработка нужной детали, но и срабатывание инструмента. Для уменьшения этого нежелательного эффекта инструмент делают из мягкого вязкого материала (мягкой стали, меди и т. п.), при ударе о который частицы абразива «вязнут» и производят значительно меньше разрушений, чем при ударе о твердый материал. Из сказанного становится ясно, почему ультразвуковая обработка целесообразна лишь для твердых и хрупких материалов, в меньшей степени — для твердых металлических сплавов, и совершенно не применяется для сверления или резания вязких материалов.

13.7.2. Модель ультразвукового сверлильного станка.

Одна из возможных конструкций самодельной модели ультразвукового сверлильного станка изображена на рис. 13.22. Обмотка возбуждения магнитострикционного излучателя расположена на выгнутой из полоски винипласта стойке. К концу ферритового вибратора с помощью специальной насадки прикреплен концентратор. Чтобы при возбуждении ультразвука конец концентратора, одновременно являющийся в этой модели инструментом, не перемещался по обрабатываемой стеклянной пластинке, концентратор пропущен через отверстие в вырезанном из жести или алюминия фиксаторе. Основание прибора может быть изготовлено из любого подходящего материала. В обсуждаемой модели подмагничивание вибратора осуществляется постоянным или переменным током промышленной частоты, проходящим либо непосредственно по обмотке возбуждения, либо по специальной обмотке подмагничивания (см. п. 3.3.8). Но это отнюдь не обязательно, поскольку такие же результаты дает подмагничивание вибратора постоянными магнитами.

Наиболее ответственной частью работы при изготовлении модели является крепление концентратора к концу ферритового стержня. К торцу концентратора — медной проволоки диаметром 1,5–2,0 мм — припаяйте круглый жестяной диск диаметром 8 мм

и приклейте этот диск вместе с концентратором к ферритовому вибратору, пользуясь подходящим клеем (например, моментальным универсальным сверхпрочным клеем «Секунда»). Мы использовали также силикатный клей с размешанной в нем до густоты сметаны молотой слюдой.

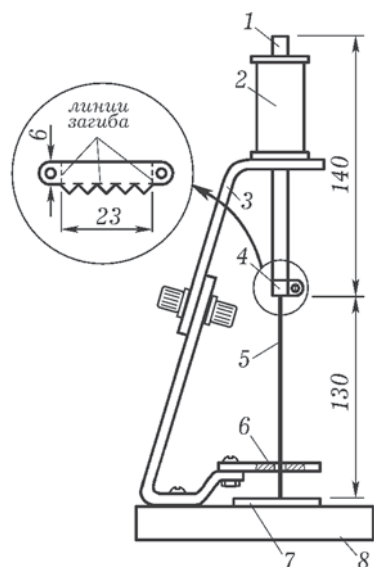


Рис. 13.22. Конструкция модели сверлильного станка: 1 — ферритовый вибратор; 2 — обмотка возбуждения магнитоstrictionного излучателя и подмагничивающая вибратор катушка; 3 — стойка из винипласта или оргстекла; 4 — крепление медного концентратора или инструмента; 5 — концентратор, заканчивающийся инструментом; 6 — фиксатор; 7 — стеклянная пластинка; 8 — основание

Возможно также крепление концентратора с помощью жестяной обоймы и болта с гайкой на 3 мм (рис. 13.22). К зажатой на конце ферритового вибратора обойме припаивают медный концентратор (следует остерегаться избытка припоя). Можно также припаять концентратор к колечку, образованному несколькими витками медной проволоки, плотно намотанной на конец вибратора (рис. 13.23).

Несмотря на то, что при таких способах крепления часть мощности неизбежно теряется, ультразвуковой сверлильный станок работает вполне удовлетворительно.

Впрочем, мы предпочитаем клеевое соединение торца вибратора с концентратором или инструментом. Наиболее удобна следующая технология. На ровную деревянную поверхность кладут листок слюды, на нем паяльником расплавляют припой

так, чтобы получилась большая круглая капля диаметром примерно 8 мм. К капле на мгновение прикасаются кусочком канифоли — под воздействием флюса поверхность капли припоя становится ровной и блестящей. В центр капли до поверхности слюды вставляют предварительно облуженный и прогретый конец медного или железного инструмента. Убирают паяльник и дают капле затвердеть. После полного остывания припоя плоскую поверхность капли обрабатывают на ровной мелкой шкурке так, чтобы исчезли каверны, образовавшиеся при кристаллизации припоя. Конец ферритового вибратора и каплю припоя с инструментом обезжиривают, промыв в воде с хозяйственным мылом, и насухо вытирают чистой сухой тряпочкой. На торец

ферритового вибратора наносят тонкий слой клея «Секунда», плотно прижимают к нему плоской поверхностью каплю припоя с инструментом и через 20–30 с прочное соединение готово!

Выше уже отмечалось (п. 13.1.2), что на длине концентратора должна укладываться половина длины ультразвуковой волны, распространяющейся в материале концентратора. Но вибратор возбуждается на основной частоте, поэтому на его длине укладывается тоже половина длины волны ультразвука, но уже в материале вибратора.

В качестве материала концентратора естественно выбрать медь. Скорости распространения ультразвука в феррите и меди соответственно равны $c_{\text{ф}} = 5760 \text{ м/с}$ и $c_{\text{к}} = 4700 \text{ м/с}$. Следовательно, оптимальная длина концентратора из медной проволоки должна составлять

$$l_{\text{к}} = \frac{c_{\text{к}}}{c_{\text{ф}}} l_{\text{ф}} \approx 0,8 l_{\text{ф}}. \quad (13.10)$$

Таким образом, если вы хотите использовать излучатель с ферритовым вибратором длиной, например 160 мм, то длина медного концентратора должна быть примерно равна 130 мм. В этом случае колебания инструмента — конца концентратора — будут иметь наибольшую амплитуду.

Однако такой длинный концентратор не очень-то удобен в работе. К тому же получить от него все то, что обещает теория, с вашими приборами не так-то просто. Вспомнив Фауста: «Сера теория, мой друг, а древо жизни вечно зеленеет», сделаем медный концентратор покороче, длиной всего 1–2 см. При этом ультразвуковой сверлильный станок будет выглядеть гораздо изящнее, а производительность его вряд ли слишком уменьшится.

Концентратор должен заканчиваться инструментом. В обсуждаемой модели инструментом является конец самого концентратора. Расплющивая или опиливая его, придайте инструменту любую нужную форму: треугольную, квадратную, в виде лопаточки и т. д. Надфилем обработайте инструмент так, чтобы его торец стал плоским. Теперь осталось только собрать ультразвуковой сверлильный станок и приступить к его испытаниям.

Чтобы уж полностью закончить описание модели ультразвукового сверлильного станка, заметим, что можно попробовать вместо ступенчатого медного концентратора изготовить

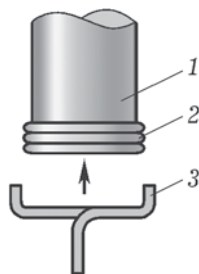


Рис. 13.23. Способ крепления концентратора к вибратору: 1 — ферритовый вибратор; 2 — плотно намотанные на конец вибратора витки облуженной медной проволоки; 3 — конец медного концентратора

«экспоненциальный» концентратор из оргстекла. Размеры такого концентратора определите самостоятельно, пользуясь формулой (13.10), исходя из условия, что скорость звука в оргстекле примерно равна 2700 м/с. Подобный концентратор в виде конуса нетрудно изготовить из оргстекла даже вручную. Концентратор приклейте к ферритовому вибратору клеем «Секунда» или любым другим, предназначенным для склейки пластмасс и керамики. Конец концентратора обработайте так, чтобы он имел форму требуемого отверстия.

13.7.3. Ультразвуковое сверление стекла. Испытайте модель ультразвукового сверлильного станка. Чтобы просверлить отверстие в стекле, на поверхность стеклянной пластинки рядом с инструментом нанесите каплю воды и добавьте в нее немного абразива (абразивный порошок при необходимости может быть получен размачиванием шкурки, имеющей зерно подходящей крупности). Настройте генератор в резонанс с вибратором. При этом возле конца инструмента появляется небольшой водяной бурун, возникает характерный хруст разламываемого стекла, и прозрачная абразивная суспензия через несколько секунд окрашивается в грязновато-серый цвет. Это свидетельствует о том, что обработка стекла началась.

Вначале инструмент, колеблясь, будет несколько перемещаться по поверхности стекла. Чтобы предотвратить это перемещение, концентратор следует пропустить через отверстие специального фиксатора (см. рис. 13.22), или слегка придерживать рукой. После того, как в стекле появится небольшое углубление, можно, не опасаясь дальнейших смещений инструмента, отпустить концентратор, и подать ультразвук максимальной мощности. По громкости хруста, сопровождающего ультразвуковое сверление, вы вскоре научитесь определять, насколько успешно идет обработка стекла.

Вибратор магнитострикционного излучателя должен быть расположен в каркасе обмотки возбуждения совершенно свободно. При этом оказывать дополнительное давление на инструмент помимо того, которое обусловлено силой тяжести, обычно не следует.

По мере срабатывания нужно добавлять свежие порции абразива до тех пор, пока прошивка отверстия в стекле не закончится. При работе станка следите за тем, чтобы вода вблизи инструмента была в избытке.

Модель ультразвукового сверлильного станка позволяет поставить немало опытов. Постарайтесь объяснить все те явления, которые вы сумеете обнаружить при исследовании процесса ультразвуковой обработки твердых и хрупких материалов.

Разумеется, можно собрать и более простую модель станка, чем та, которая описана выше. На рис. 13.24 приведена фотогра-

фия такой упрощенной модели. Вы видите, что в ней использован обычный магнитострикционный излучатель с подмагничиванием вибратора постоянными магнитами. Чтобы магнитное поле

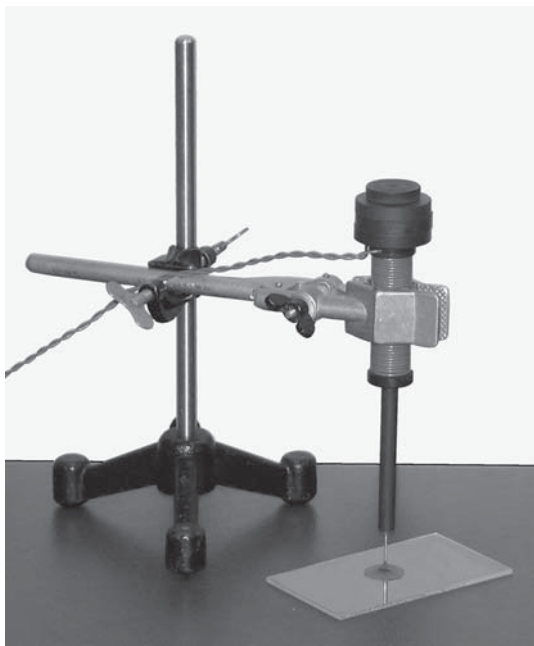


Рис. 13.24. Внешний вид экспериментальной установки для исследования ультразвукового сверления стекла

не препятствовало опусканию вибратора с инструментом вниз по мере обработки отверстия, вибратор в обмотке возбуждения заранее опущен настолько, чтобы сила притяжения магнитов оказалась меньше силы тяжести. Примитивность этой модели кажущаяся. С ее помощью мы, например, делали отверстия нужной формы в стекле толщиной до 7 мм, сверлили детали из керамики и фарфора, и даже изготавливали пьезоэлектрические вибраторы из цирконат-тананата свинца для настоящего заводского производства!

13.8. Ультразвуковая сварка

Многие материалы, которые с большим трудом поддаются сварке обычными (тепловыми) методами, можно сварить, пользуясь ультразвуком. Это еще одно практическое применение ультразвуковых колебаний, имеющее важное значение для современного производства.

13.8.1. Ультразвуковой сварочный станок. Схема рабочей части промышленного ультразвукового станка для сварки изображена на рис. 13.25. На конце посаженного на вибратор концентратора расположен выступ, который с определенным усилием прижимается к свариваемым деталям. Этот выступ пере-

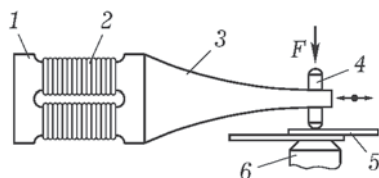


Рис. 13.25. Конструкция промышленного ультразвукового сварочного станка: 1 — вибратор магнитоstrictionного излучателя; 2 — обмотка возбуждения; 3 — концентратор; 4 — рабочий выступ; 5 — свариваемые детали; 6 — опора

дает ультразвуковые колебания к месту сварки так, что участок верхней детали под выступом колеблется в плоскости соприкосновения относительно нижней детали. При этом под действием постоянной силы давления и переменной силы, обусловленной ультразвуковыми колебаниями, материал верхней детали внедряется (как бы втирается) в материал нижней. В результате происходит прочное соединение деталей.

Проведенные исследования показали, что в области соединения под действием ультразвуковых колебаний материал переходит в своеобразное «полужидкое» состояние. При этом происходит перемешивание материалов двух деталей. Детали в момент пропускания ультразвука легко повернуть друг относительно друга. По выключении ультразвука быстро происходит обратный переход материалов в твердое состояние, и никакой поворот деталей уже невозможен — произошла их сварка.

Несмотря на то, что детально теория ультразвуковой сварки еще далеко не разработана, сам процесс широко используется в промышленности. Объясняется это тем, что ультразвуковая сварка обладает существенным преимуществом перед термической. С помощью ультразвука можно приварить очень тонкую деталь к массивной. Тепловая сварка таких деталей трудноосуществима: невозможно одновременно прогреть до одинаковой температуры массивную и небольшую по массе деталь.

При сварке ультразвуком нет надобности заботиться о чистоте поверхностей деталей: в процессе сварки происходит их самоочистка. Ультразвуковая сварка приводит лишь к незначительному нагреву деталей в месте их соприкосновения, поэтому такая сварка (ее часто называют «холодной») выгодна во многих технологических процессах. Ультразвук позволяет приваривать металл к кристаллу. Этот эффект получил применение в радиоэлектронной промышленности при изготовлении полупроводниковых приборов (например, одной из важнейших операций при изготовлении транзисторов является соединение кристаллического

полупроводника с металлическими выводами). В настоящее время разработана даже безниточная швейная машина, в которой ультразвук используется для сварки одежды из капрона, нейлона и других термопластических тканей. Любопытно отметить, что в медицине при лечении переломов ультразвук применяют для сварки костей.

13.8.2. Экспериментальное исследование ультразвуковой сварки. В том, что ультразвуком можно сваривать, сравнительно нетрудно убедиться на опыте. Вырежьте две пластинки из тонкого (толщиной не более 0,5 мм) целлулоида или оргстекла. Наложив их друг на друга, пальцем прижмите к верхней пластинке конец ферритового вибратора, как это показано на рис. 13.26. При возбуждении в вибраторе ультразвуковых колебаний максимальной интенсивности, которую способен обеспечить транзисторный генератор, вы заметите, что целлулоид размягчается (оплавляется) в небольшой области под вибратором между пластинками. В этот момент верхнюю пластинку, несмотря на довольно значительное прижимающее усилие, нетрудно повернуть относительно нижней. Как только вы выключите ультразвук, произойдет «схватывание деталей», и такой поворот сделать будет уже невозможно. Прижимая вибратор к различным точкам верхней пластинки, произведите точечную сварку разных деталей из целлулоида.

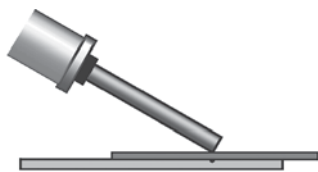


Рис. 13.26. Схема опыта по ультразвуковой сварке

Конечно, пользуясь описанными в книге генераторами и излучателями ультразвука, осуществить прочную сварку не представляется возможным. Прodelанный вами опыт показывает лишь то, что ультразвуковые колебания могут быть практически использованы для сварки.

Следует отметить, что описанный опыт не всегда получается одинаково хорошо: ставя этот эксперимент, вы работаете на предельных возможностях ваших приборов. Поэтому очень важно для успешной постановки опыта подобрать толщину и материал свариваемых пластинок, а также оптимальную величину давления на конец вибратора.

Попытайтесь с помощью ультразвука приварить к алюминиевой пластинке тонкую алюминиевую фольгу. Подскажем, что давление на вибратор в этом случае должно быть значительно меньше, чем в опыте с пластинками из целлулоида.

Попробуйте сварить ультразвуком толстые полиэтиленовые пленки. Для этого можно использовать магнитострикционный излучатель низкой частоты к ферритовому вибратору которого

приклеен медный инструмент диаметром 1,0–1,5 мм и длиной примерно 20 мм. Пленки положите одна поверх другой на ровную поверхность гетинаксовой пластины. Сверху на полиэтиленовые пленки наложите тонкую термостойкую целлофановую пленку.

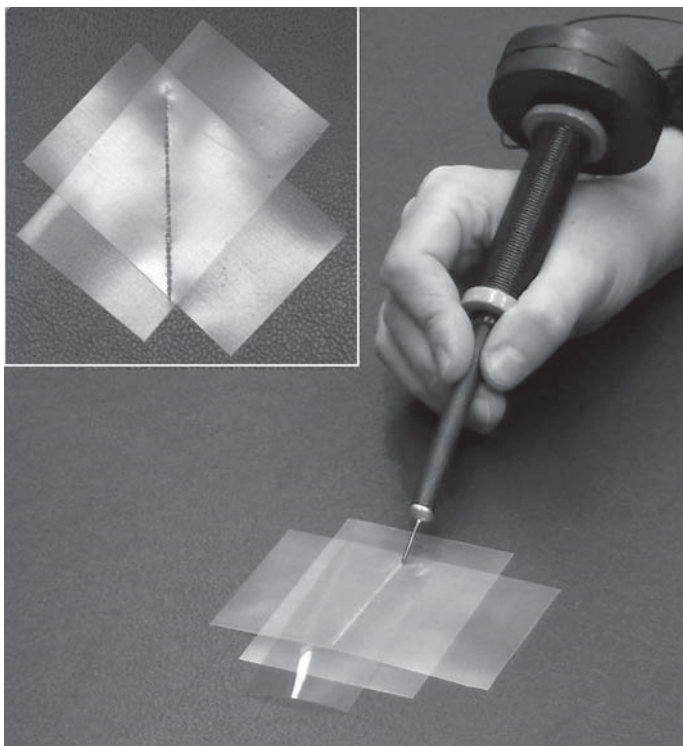


Рис. 13.27. Ультразвуковая сварка полиэтиленовых пленок. Снизу показано, как нужно держать магнитострикционный излучатель. Сверху приведена фотография получающегося сварного шва

Прикоснувшись к ней концом медного инструмента, настройте генератор в резонанс с вибратором. Вы заметите, как под инструментом оплавляется полиэтилен. Медленно проведите медным инструментом по целлофановой пленке так, чтобы получилась сплошная линия сварки полиэтиленовых образцов (рис. 13.27).

13.9. Использование ультразвука в металлургии

Основной задачей металлургической промышленности является получение металлов и сплавов с заранее заданными физическими свойствами. И в этой важнейшей отрасли современной технологии ультразвук нашел достойное применение.

13.9.1. Влияние ультразвука на кристаллизацию. Если в расплавленный металл ввести ультразвуковую волну, то в результате после отвердевания размер кристалликов становится меньше, чем при кристаллизации металла в обычных условиях. Механические свойства металла, обработанного ультразвуком при кристаллизации, значительно выше свойств «неозвученного» металла. Дело в том, что мелкокристаллическая структура более прочна и тверда, чем крупнокристаллическая.

Влияние ультразвука на процессы кристаллизации пытаются объяснить, с одной стороны, действием кавитации, а с другой — возрастанием количества центров кристаллизации. Хотя физическая сущность этого влияния понята еще не до конца, эффект воздействия ультразвука на кристаллизацию уже нашел практическое применение в металлургии. Например, с целью увеличения прочности чугуна в расплав вводят ультразвуковую волну. Ультразвук используется для получения сплава бронзы с графитом, который обладает удивительными свойствами: он отличается твердостью, как бронза, и мягкостью, как графит. Из такого сплава изготавливают подшипники, не требующие смазки. Интересно отметить, что в некоторых случаях ультразвуковые колебания не только не уменьшают кристаллическую структуру металла, но и, напротив, способствуют росту монокристаллов.

13.9.2. Исследование кристаллизации под действием ультразвука. Наблюдать влияние ультразвука на кристаллизацию можно в таком опыте. В двух пробирках одновременно расплавьте небольшое количество гипосульфита. Одну пробирку (контрольную) с расплавом поставьте остывать в обычных условиях, а другую — поместите на торец вибратора магнитострикционного излучателя. Чтобы улучшить акустический контакт между торцом и пробиркой, на вибратор следует предварительно нанести каплю масла. Включите ультразвук. Вы заметите, что в той пробирке, в которую вводились ультразвуковые колебания, кристаллики получились более мелкими.

Придумайте и осуществите другие варианты этого опыта. Здесь есть большой простор для вашего творчества. Например, можно попытаться «озвучивать» расплав гипосульфита не в пробирке, а на стеклянной пластинке. Можно попробовать изучить воздействие ультразвука на кристаллизацию других расплавов и т. д.

Для первых опытов мы рекомендуем в качестве исследуемого вещества использовать мочевины, которая свободно продается, как удобрение. Растворяя мочевины в горячей воде, получите насыщенный раствор. Залейте этот раствор в одинаковые плоские стеклянные баночки так, чтобы в них получились слои толщиной

не более 2 мм. В одну из баночек погрузите конец ферритового вибратора и включите ультразвук. Подождите, когда в баночках завершится процесс кристаллизации. Сравнив получившиеся образцы, вы обнаружите, что в озвученной баночке кристаллы получились гораздо более мелкими.

Проще всего опыты по кристаллизации под действием ультразвука осуществлять с каплями насыщенного раствора (рис. 13.28). Следует иметь в виду, что кристаллизация — это

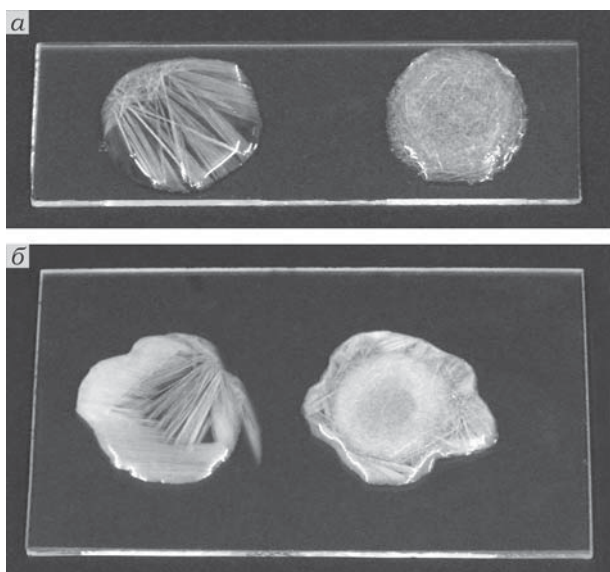


Рис. 13.28. Кристаллизация мочевины в водном растворе, нанесенном на стеклянную пластинку: слева капли, не облученные, справа — облученные ультразвуком: а–б — результаты двух опытов при различных концентрациях мочевины

довольно тонкий физический процесс, на ход которого влияют многие факторы. Поэтому для получения нужного и, главное, убедительного эффекта придется потрудиться.

13.10. Применение ультразвука в медицине

В медицине маломощный ультразвук высокой частоты широко используется для целей диагностики (см. п. 1.1.4). Облучение ультразвуком низкой частоты приводит к гибели различные микроорганизмы. Это свойство ультразвуковых волн позволяет осуществлять стерилизацию, дезинфекцию, пастеризацию и т. д. Например, известны ультразвуковые ванны, предназначенные для обработки рук медиков перед операцией.

Но, как и в ряде других уже известных вам случаев, ультразвук может не только губить живое, но и оказывать противоположное — лечашее — действие. Поэтому в медицине ультразвук помимо стерилизации используется для лечения различных заболеваний. Ультразвук применяется в нейрохирургии. Сделаны попытки использовать ультразвуковые волны для лечения злокачественных опухолей, ангин, органов пищеварения.

В губительном действии ультразвука на более или менее сложные живые организмы нетрудно убедиться в простых опытах. Если в вашем распоряжении имеется микроскоп (хотя бы и самодельный), то рассмотрите в него каплю настоя из сена или сухих листьев: она прямо-таки кишит инфузориями. Теперь облучите эту каплю ультразвуком и вновь рассмотрите ее в микроскоп. Вы обнаружите, что ультразвук уничтожил все живое в капле. Мы предоставляем вам возможность самостоятельно продумать оптимальные условия опыта. Ясно, что облучать ультразвуком каплю сенного настоя, находящуюся между предметным и покровным стеклышками, вряд ли нужно.

Заключение

Вот и закончилась эта книга. Вы познакомились с упругими волнами, научились получать звук и ультразвук, исследовали некоторые физические свойства и возможности практического применения упругих волн. Но это ли главное? Пожалуй, нет.

Неизмеримо важнее, что самостоятельное выполнение опытов позволило вам ощутить себя настоящим физиком-экспериментатором. Бесспорно, вы почувствовали, что такая деятельность заметно отличается от того, чем занимаются в школе на уроках физики или при выполнении лабораторных работ физического практикума. Когда вы сами беретесь за исследование физического явления, никто не может вам гарантировать получения ожидаемого результата, но зато вы можете получить и совершенно неожиданный результат.

Экспериментатору мало в совершенстве владеть методикой и техникой физического эксперимента. Очень важно ясное понимание сути физических явлений, их теоретической трактовки. Физика, как наука, представляет собой сплав эксперимента и теории. Нельзя надеяться стать хорошим экспериментатором, если пренебрегать изучением физической теории. Даже в этой книге, целиком посвященной экспериментальным исследованиям упругих волн, теории уделено значительное внимание.

Список литературы

1. Агафонова (Мамаева) Е. С. Формирование обобщенных понятий волнового движения на основе учебного эксперимента: Дис. ... канд. пед. наук. — М., 1994. — 255 с.
2. Агранат Б. А. Дубровин М. Н., Хавский Н. Н. и др. Основы физики и техники ультразвука. — М.: Высш. шк., 1987. — 352 с.
3. Баркгаузен Г. Введение в учение о колебаниях с приложением к механическим и электрическим колебаниям. — М.; Л.: ОНТИ-Энергоиздат, 1934. — 116 с.
4. Баулин И. За барьером слышимости. — М.: Знание, 1971. — 176 с.
5. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. — М.: ИЛ, 1957. — 727 с.
6. Блинова Л. П., Колесников А. Е., Ланганс Л. Б. Акустические измерения. — М.: Изд-во стандартов, 1971. — 272 с.
7. Борисов Ю. Я., Макаров Л. О. Ультразвук в технике настоящего и будущего. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 88 с.
8. Бронников Н. Л. Измерение скорости звука импульсным методом // Физика в школе. — 1964. — № 3. — С. 66–67.
9. Бронников Н. Л. Изучение ультразвука на внеклассных занятиях // Физика в школе. — 1962. — № 3. — С. 83–85.
10. Брэгг У. Мир света. Мир звука. — М.: Наука, 1967. — 336 с.
11. Вечко Ю. И. Мир ультразвуков. — Л.: Знание, 1963. — 52 с.
12. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. — М.: Наука, 1966. — 168 с.
13. Геннинг А. Р. Демонстрация некоторых практических применений ультразвука // Физика в школе. — 1968. — № 5. — С. 70–73.
14. Геннинг А. Р. Определение скорости ультразвука // Физика в школе. — 1971. — № 3. — С. 70–72.
15. Горелик Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. — М.: Физматлит, 1959. — 572 с.
16. Грегуш П. Звуковидение / Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 232 с.
17. Жук Л. А. Как увидеть звук // Учебная физика. — 1997. — № 3. — С. 15–18.
18. Журавлев А. И., Акопян В. Б. Ультразвуковое свечение. — М.: Наука, 1977. — с. 136.
19. Исакович М. А. Общая акустика. — М.: Наука, 1973. — 496 с.

20. Кайно Г. Акустические волны: устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов / Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 656 с.
21. Клюкин И.И. Удивительный мир звука. — Л. : Судостроение, 1986. — 168 с.
22. Кок У. Звуковые и световые волны. — М.: Мир, 1966. — 160 с.
23. Кок У. Видимый звук. — М.: Мир, 1974. — 120 с.
24. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. — М.: Изд-во стандартов, 1970. — 238 с.
25. Красильников В.А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. — М.: Физматгиз, 1960. — 560 с.
26. Колупаев В. Ф. Совершенствование учебного эксперимента по упругим волнам в общем курсе физики пединститута: Дис. канд. пед. наук. — Глазов, 1988. — 256 с.
27. Краснюк В.И. Ультразвуковая установка // Физика в школе. — 1960. — № 5. — С. 74.
28. Кудрявцев Б.Б. Неслышимые звуки. — М.: Мол. гвардия, 1957. — 160 с.
29. Кудрявцев Б.Б. Простые опыты с ультразвуками: пособ. для учителя. — М.: Учпедгиз, 1954. — 116 с.
30. Ляшнев Л.М. Звук. — М.: Знание, 1961. — 40 с.
31. Майер В.В. Кумулятивный эффект в простых опытах. — М.: Наука, 1989. — 192 с.
32. Майер В.В. Простые опыты с ультразвуком. — М.: Наука, 1978. — 161 с.
33. Майер Р.В. Методика учебного фундаментального эксперимента по волновой физике: Дис. ...канд. пед. наук. — М., 1995. — 258 с.
34. Малов Н.Н. Основы теории колебаний: пособ. для учителей. — М.: Просвещение, 1971. — 198 с.
35. Маркосова Н.М. Изучение ультразвука в курсе физики средней школы. — М.: Просвещение, 1982. — 96 с.
36. Мельников А.С. Демонстрационные опыты по акустике с применением электроакустического оборудования: автореф. Дис. ...канд. пед. наук. — М., 1964. — 15 с.
37. Мясников Л.Л. Неслышимый звук. — Л. : Судостроение, 1967. — 140 с.
38. Перкальскис Б.Ш. Волновые явления и демонстрации по курсу физики. — Томск : Томск. ун-т, 1984. — 280 с.
39. Поль Р.В. Механика, акустика и учение о теплоте. — М.: Наука, 1971. — 479 с.
40. Применение ультразвука в медицине: физические основы / Под ред. К. Хилла; пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 568 с.
41. Путилин А.С., Ланда Л.И. К изучению ультразвуков в школе // Физика в школе. — 1960. — № 1. — С. 96–98.
42. Расторгуев Б.П. Окно в мир звука. — М.: Знание, 1978. — 144 с.
43. Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. — М.: Связь, 1973. — 272 с.

44. *Рыдник В. И.* О современной акустике: для внеклас. чтения. VIII-X кл. — М.: Просвещение, 1979. — 80 с.
45. *Сапожков М. А.* Электроакустика. — М.: Связь, 1978. — 272 с.
46. *Смагин А. С.* Определение интенсивности и мощности излучения ультразвука // Физика в школе. — 1976. — № 3. — С. 65–67.
47. *Соломкин В. И.* Использование ультразвука при изучении молекулярной физики в школе: автореф. дис. ...канд. пед. наук. — М., 1969. — 19 с.
48. *Соломкин В. И.* Измерение скорости ультразвука // Физический эксперимент в школе: пособ. для учителей. Вып. 5. — М.: Просвещение, 1975. — С. 155–159.
49. *Соломкин В. И.* Опыты по ультразвуку с магнитострикционными излучателями // Физика в школе. — 1963. — № 1. — С. 45–49.
50. *Стретт Дж. В. (Лорд Рэлей)* Теория звука. Т. 2. — М.: Гостехиздат, 1955. — 476 с.
51. *Сыркин Л. Н.* Пьезомагнитная керамика. — Л.: Энергия, 1972. — 160 с.
52. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. *И. П. Голямина*. — М.: Сов. энциклопедия, 1979. — 400 с.
53. Ультразвуковые преобразователи / Под ред. *Е. Кикучи*; пер. с англ.; под ред. *И. П. Голяминой*. — М.: Мир, 1972. — 424 с.
54. *Фридман В. М.* Ультразвук. — М.: Знание, 1960. — 48 с.
55. *Хорбенко И. Г.* В мире неслышимых звуков. — М.: Машиностроение, 1971. — 248 с.
56. *Хорбенко И. Г.* Звук. Ультразвук. Инфразвук. — М.: Знание, 1986. — 192 с.
57. *Храмов Ю. А.* Физики: Биографический справочник. — М.: Наука, 1983. — 400 с.
58. *Чедд Г.* Звук. — М.: Мир, 1975. — 206 с.
59. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. В 4-х т. Т. 4. — М.: Наука, 1967. — 600 с.

Научное издание

МАЙЕР Валерий Вильгельмович
ВАРАКСИНА Екатерина Ивановна

ФИЗИКА УПРУГИХ ВОЛН
УЧЕБНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
(БИБЛИОТЕКА УЧИТЕЛЯ И ШКОЛЬНИКА)

Редактор *Д.А. Миртова*
Оригинал-макет: *В.В. Затекин*
Оформление переплета: *А.Ю. Алехина*

Подписано в печать 19.01.07. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,5. Уч.-изд. л. 22,35. Тираж 1500 экз.
Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
<http://www.fml.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ППП «Типография «Наука»
121099, г. Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 978-5-9221-0800-3



9 785922 108003