

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
<b>Глава 1. Упругие волны</b>	
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).	
<b>Глава 2. Гармонические упругие волны</b>	
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).	
<b>Глава 5. Исследование магнитострикционного излучателя</b>	
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).	
<b>Глава 6. Линейные и нелинейные акустические явления</b>	
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).	
<b>Глава 7. Давление упругих волн</b>	
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).	
<b>Глава 8. Стоячая ультразвуковая волна в воздухе</b>	
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).	
<b>Глава 9. Стоячая ультразвуковая волна в жидкости</b>	
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).	
<b>Глава 10. Упругая волна в пластинке</b>	
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).	
<b>Глава 11. Интерференция и другие волновые явления</b>		
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 волн (269).	
11.4.3.	Распространение волны в волноводе (270).	
<b>Глава 12. Ультразвуковая кавитация</b>		
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).	
<b>Глава 13. Практическое применение ультразвука</b>	
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
Заключение . . . . .	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 проницательные 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 ультразвука 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 мало мощные 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.

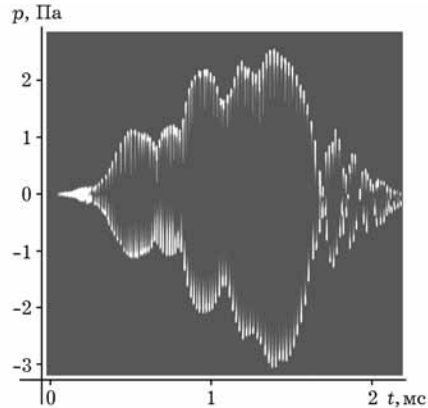


Рис. 1.1. Импульс упругой волны, испускаемой летучей мышью



*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. 1.2<sup>1)</sup>. 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

<sup>1)</sup> 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.

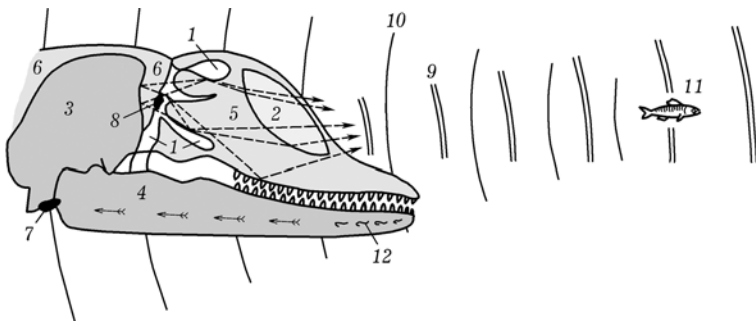


Рис. 1.2. Эхолокационный аппарат дельфина: 1 — воздушные мешки и носовой канал, производящие звуковые импульсы; 2 — жировая подушка, выполняющая функцию акустической линзы; 3 — череп, выполняющий функцию акустического отражателя; 4 — нижняя челюсть, по которой в ухо возвращается отраженная звуковая волна; 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 кГц <sup>1)</sup>.

**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-

<sup>1)</sup> 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<sup>1)</sup>. 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 ультразвуковых 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-

<sup>1)</sup> 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,

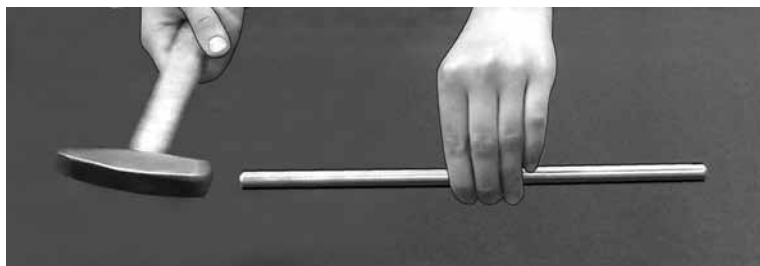


Рис. 1.4. Стальной стержень, возбуждаемый ударом, служит источником упругой волны

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),

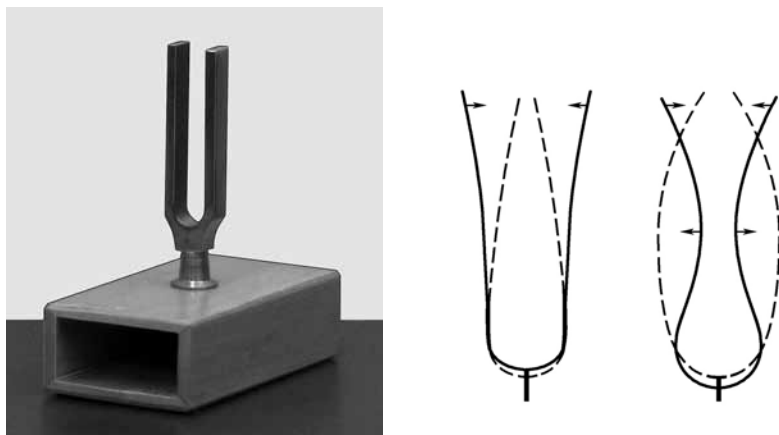


Рис. 1.5. Камертон на деревянном резонаторе; справа схематически изображены возможные колебания его ветвей

фактически представляет собой изогнутый металлический стержень, который установлен на деревянном резонаторе и при ударном возбуждении 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 тряпчочкой 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.

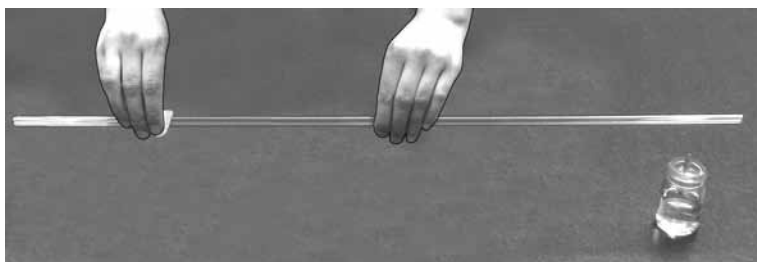


Рис. 1.6. Стеклянная трубка, возбуждаемая трением смоченной в спирте ваткой, служит источником упругой волны

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)!

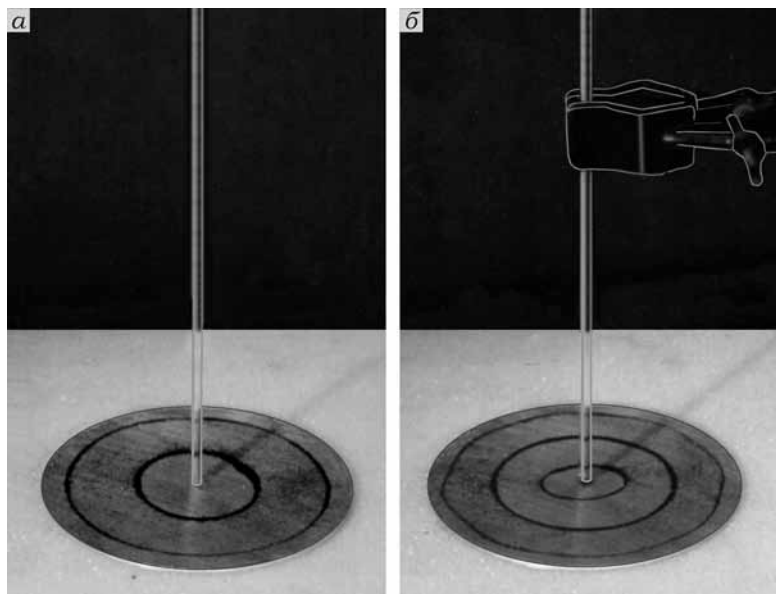


Рис. 1.7. Возбуждение упругой волны в дюралевой пластинке стеклянной трубкой, совершающей автоколебания: длина трубки 600 мм (а) и 300 мм (б)

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

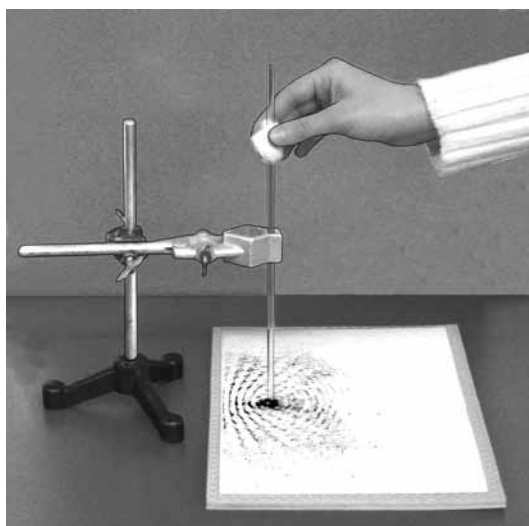


Рис. 1.8. Визуализация интерференционной картины, полученной в листе бумаги при возбуждении волны колеблющейся стеклянной трубкой

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 магнестрикционным излучателем ультразвука (см. § 10.2).

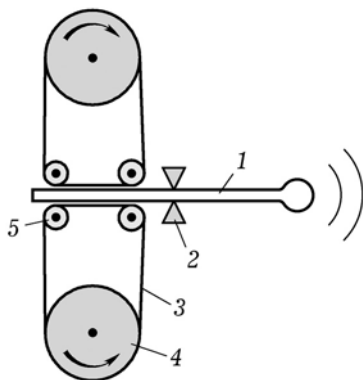


Рис. 1.9. Излучатель Гольцмана: 1 — стеклянная трубка с шаром на рабочем конце; 2 — крепеж, расположенный посередине трубки; 3 — трущиеся о трубку ремни; 4 — шкивы; 5 — прижимные валики

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

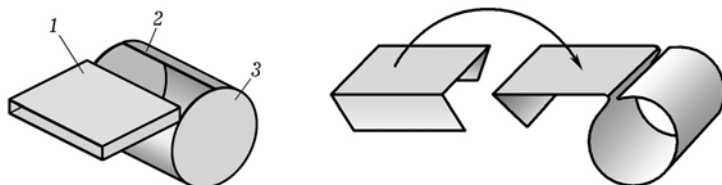


Рис. 1.10. Губной свисток: 1 — сопло; 2 — острое лезвие; 3 — резонатор. Справа показана последовательность изготовления простейшего свистка

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)

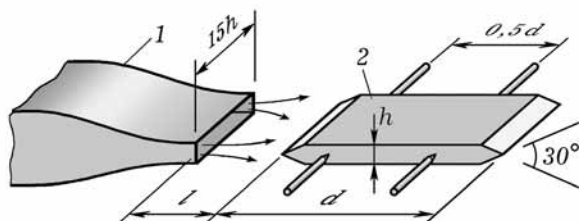


Рис. 1.11. Функциональная схема гидродинамического излучателя упругой волны: 1 — сопло; 2 — упругая пластинка

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!

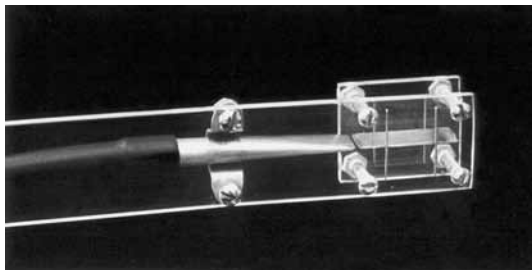


Рис. 1.12. Действующая модель гидродинамического излучателя

**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.

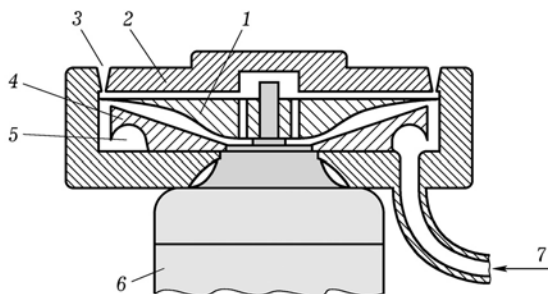


Рис. 1.13. Устройство сирены: 1 — ротор; 2 — статор; 3 — отверстия в статоре; 4 — отклоняющая пластина; 5 — воздушная камера; 6 — электромотор; 7 — сжатый воздух

Сиренами удается получать в воздухе очень мощные звуковые и ультразвуковые волны. Если сирена дает звук интенсивностью порядка  $100 \text{ Вт/см}^2$ , 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 проникнуть 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.

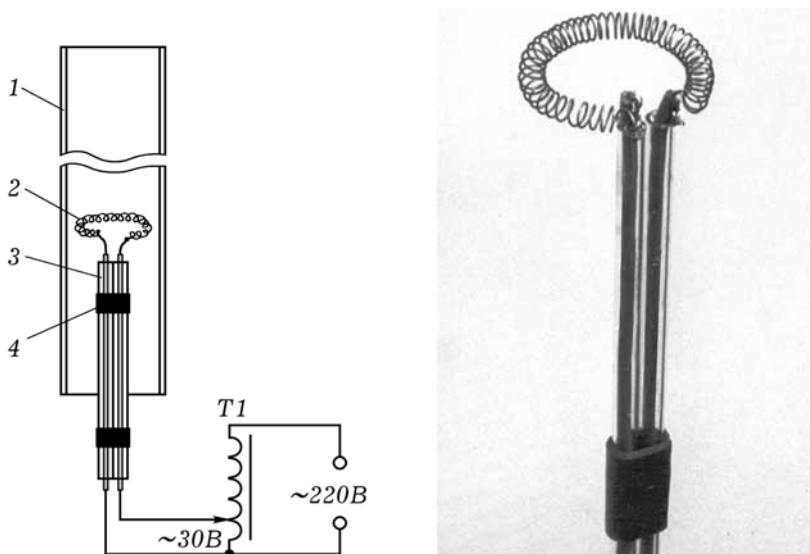


Рис. 1.14. Схематическое изображение теплового автогенератора Рийке: 1 — стеклянная труба; 2 — нихромовая спираль; 3 — стеклянные трубки; 4 — изолянта

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 изоленды. Через трубки пропустите многожильные медные провода в полихлорвиниловой изоляции; сечение их должно быть 1–2 мм<sup>2</sup> и длина не меньше одного метра. С оголенными концами проводов, выступающими из отверстий трубок примерно на 20 мм, плотно скрутите концы нихромовой спирали. Расправьте спираль так, чтобы она расположилась 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

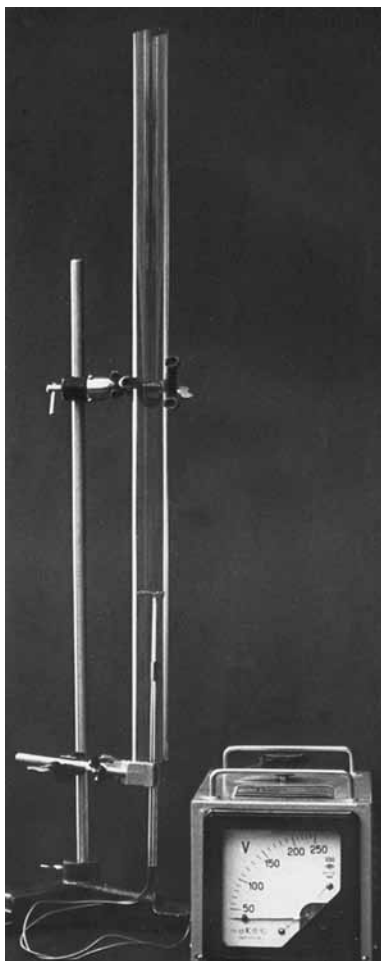


Рис. 1.16. Экспериментальная установка для исследования теплового автогенератора Рийке