

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	10
Глава 1. УПРУГИЕ ВОЛНЫ	13
1.1. Упругие волны в природе, науке, технике, технологии, 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 стержней (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 (30). 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 (38). 1.4.5. Магнитострикционные преобразователи (39).	
Глава 2. ГАРМОНИЧЕСКИЕ УПРУГИЕ ВОЛНЫ	40
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 (59). 2.2.7. Затухание волны (59).	
2.3. Экспериментальное исследование упругой волны в воздухе	60
2.3.1. Доказательство волновой природы звука (61). 2.3.2. Осциллограмма звуковой волны (62). 2.3.3. Индикатор интенсивности звука (63). 2.3.4. Индикация фазы звуковой волны (64). 2.3.5. Экспериментальная установка (65). 2.3.6. Экспериментальное обоснование существования гармонической звуковой волны (66).	
Глава 3. МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ УПРУГОЙ ВОЛНЫ	70
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	3.2.1. Обнаружение обратного магнитострикционного эффекта (79).	3.2.2. Осциллограмма упругих колебаний стержня (80).			79
3.3. Магнитострикционный излучатель ультразвука низкой частоты	3.3.1. Промышленные магнитострикционные излучатели (81).	3.3.2. Подмагничивание вибратора магнитострикционного излучателя (83).	3.3.3. Ферритовый вибратор магнитострикционного излучателя (84).	3.3.4. Конструкция учебного излучателя (85).	81
	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 (90).	3.3.8. Подмагничивание вибратора постоянным током (91).	
Глава 4. ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН					93
4.1. Элементы электронного генератора на транзисторах	4.1.1. Колебательный контур (93).	4.1.2. Автоколебательная система (94).	4.1.3. Транзистор в качестве ключа (95).	4.1.4. Транзисторные усилители (96).	93
	4.1.5. Обратная связь (97).				
4.2. Мощный ультразвуковой генератор	4.2.1. Принципиальная схема ультразвукового генератора (99).	4.2.2. Изготовление ультразвукового генератора (100).	4.2.3. Настройка ультразвукового генератора (101).		99
4.3. Учебный ультразвуковой генератор	4.3.1. Принцип действия учебного генератора (102).	4.3.2. Конструкция ультразвукового генератора (103).	4.3.3. Технология изготовления прибора (104).	4.3.4. Настройка и проверка генератора в работе (106).	102
4.4. Получение ультразвука средней частоты	4.4.1. Частотный диапазон ультразвукового генератора (107).	4.4.2. Ультразвуковой генератор средней частоты (108).	4.4.3. Магнитострикционные излучатели ультразвука на частоту до 50 кГц (109).	4.4.4. Магнитострикционные излучатели ультразвука средней частоты (110).	107
4.5. Ультразвуковой генератор на современной элементной базе	4.5.1. Таймер в качестве задающего генератора (112).	4.5.2. Усилитель мощности на полевом транзисторе (113).	4.5.3. Ультразвуковой генератор (114).	4.5.4. Совершенствование ультразвукового генератора (115).	111

Глава 5. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННО-ГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ	117
5.1. Собственные колебания стержня	117
5.1.1. Возбуждение колебаний стержня ударом (117). 5.1.2. Стоячая волна в стержне (119). 5.1.3. Собственные частоты стержня (121).	
5.2. Резонансное возбуждение вибратора магнитострикционного излучателя	122
5.2.1. Явление резонанса (122). 5.2.2. Стоячая волна в вибраторе (123). 5.2.3. Механические напряжения в вибраторе (125). 5.2.4. Почему второй торец вибратора должен быть сухим (126).	
5.3. Упругие характеристики материала вибратора	127
5.3.1. Скорость импульса сжатия в твердом стержне (127). 5.3.2. Экспериментальное определение упругих характеристик материала вибратора (129).	
5.4. Амплитуда колебаний вибратора	130
5.4.1. Шарик, скачущий на вибраторе (131). 5.4.2. Оценка амплитуды колебаний вибратора по высоте подскока стального шарика (131). 5.4.3. Экспериментальная оценка амплитуды колебаний вибратора (134). 5.4.4. Оценка амплитуды колебаний вибратора посредством ультразвукового движителя (135). 5.4.5. Измерение амплитуды колебаний вибратора с помощью микроскопа (137). 5.4.6. Оценка амплитуды колебаний вибратора по значению усталостной прочности (140).	
5.5. Излучение упругой волны колеблющимся вибратором	143
5.5.1. Вынужденные колебания и резонанс (143). 5.5.2. Добротность колебательной системы (146). 5.5.3. Энергия колебаний вибратора (148). 5.5.4. Излучение упругой волны (149).	
Глава 6. ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ	151
6.1. Нелинейные эффекты	151
6.1.1. Линейная акустика (151). 6.1.2. Нелинейная акустика (152). 6.1.3. Нелинейное взаимодействие упругих волн (152). 6.1.4. Искажение формы ультразвуковой волны (153). 6.1.5. Нелинейное поглощение упругих волн (155).	
6.2. Абсолютное измерение интенсивности	155
6.2.1. Измерения колебательной скорости и интенсивности (156). 6.2.2. Качественное исследование диска Рэлея (157). 6.2.3. Стоячая волна в воздухе и диск Рэлея (159).	
6.3. Ориентирующее действие ультразвука	160
6.3.1. Диск Рэлея в жидкости (160). 6.3.2. Ориентация взвешенных в жидкости чешуек (160). 6.3.3. Акустический контакт (162). 6.3.4. Просветление мутной жидкости (162).	
6.4. Акустический ветер	163

6.4.1. Ультразвуковой ветер в воздухе (164).	6.4.2. Ультразвуковой ветер в жидкости (164).	6.4.3. Зависимость ультразвукового ветра от частоты (166).	6.4.4. Качественное объяснение ультразвукового ветра (166).
6.5. Силы, действующие на тела в поле упругой волны	167		
6.5.1. Притяжение предмета к вибратору излучателя (167).			
6.5.2. Взаимодействие тел в ультразвуковом поле (168).			
Глава 7. ДАВЛЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН	171		
7.1. Радиационное давление упругой волны	171		
7.1.1. Радиационное давление волны (171).		7.1.2. Элементарная теория радиационного давления (172).	7.1.3. Обнаружение радиационного давления (173).
7.2. Ультразвуковые радиометры	174		
7.2.1. Радиационное давление в газе (174).		7.2.2. Исключение влияния ультразвукового ветра (175).	7.2.3. Радиационное давление в жидкости (176).
7.2.4. Простейший радиометр (178).		7.2.5. Радиационное давление в трубке (180).	
7.3. Ультразвуковой фонтан	181		
7.3.1. Ультразвуковой фонтан (181).		7.3.2. Гигантский ультразвуковой фонтан на низкой частоте (182).	7.3.3. Отражение и прохождение волны на границе раздела сред (183).
7.3.4. Ультразвуковой фонтан на границе раздела жидкостей (185).		7.3.5. Ультразвуковой фонтан наоборот (185).	7.3.6. Ультразвуковые фонтаны на высоких частотах (186).
Глава 8. СТОЯЧАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНА В ВОЗДУХЕ	189		
8.1. Метод Кундта визуализации стоячей волны	189		
8.1.1. Опыты Кундта (189).		8.1.2. Действие ультразвука на легкий сыпучий порошок (191).	8.1.3. Визуализация стоячей ультразвуковой волны методом Кундта (192).
8.1.4. Распределение порошка в стоячей волне (194).		8.1.5. Модулированная стоячая волна в трубке Кундта (194).	
8.2. Измерение скорости звука в воздухе и в газах	196		
8.2.1. Измерение скорости ультразвука (196).		8.2.2. Исследование зависимости скорости звука от частоты (197).	8.2.3. Наблюдение влияния ультразвукового ветра (197).
8.2.4. Отражение звука от твердого плоского отражателя (198).		8.2.5. Отражение звука от открытого конца трубки Кундта (198).	
8.3. Визуализация стоячей волны в воздухе слоем жидкости . . .	200		
8.3.1. Распределение жидкости в поле стоячей волны (201).		8.3.2. Демонстрация стоячей волны, визуализированной жидкостью (201).	8.3.3. Оптический метод измерения расстояний между пучностями стоячей волны (203).
8.3.4. Перегородки из жидкости в трубке Кундта (204).			

Глава 9. СТОЯЧАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНА В ЖИДКОСТИ	207
9.1. Визуализация стоячей волны методом ориентации взвешенных в жидкости частиц	207
9.1.1. Стоячая волна в стеклянной трубке (207). 9.1.2. Особенности эксперимента (208). 9.1.3. Демонстрационный вариант эксперимента (208). 9.1.4. Измерение скорости ультразвука (210). 9.1.5. Стоячая волна в стеклянной пробирке (210).	
9.2. Визуализация стоячей волны методом коагуляции взвешенных в жидкости частиц	214
9.2.1. Визуализация стоячей волны суспензией крахмала в воде (214). 9.2.2. Области коагуляции суспензии крахмала в воде (215). 9.2.3. Визуализация стоячей волны эмульсией керосина в воде (215). 9.2.4. Зависимость коагуляции взвешенных в жидкости частиц от их плотности (217). 9.2.5. Измерение скорости звука в воде (218). 9.2.6. Акустический волновод (218).	
9.3. Ультразвуковой интерферометр	219
9.3.1. Модель ультразвукового интерферометра (219). 9.3.2. Реакция излучателя (220). 9.3.3. Схема компенсации (222). 9.3.4. Работа с ультразвуковым интерферометром (223). 9.3.5. Мостовая схема компенсации (225). 9.3.6. Зависимость скорости звука в жидкости от частоты (227).	
Глава 10. УПРУГАЯ ВОЛНА В ПЛАСТИНКЕ	228
10.1. Упругие волны в твердом теле	228
10.1.1. Виды деформаций в упругих средах (228). 10.1.2. Продольная волна в твердом теле (229). 10.1.3. Поперечная волна в твердом теле (230). 10.1.4. Поверхностные волны в твердых телах (231). 10.1.5. Упругая волна в твердой пластинке (231). 10.1.6. Изгибная волна в твердой пластинке (232).	
10.2. Фигуры Хладни	233
10.2.1. Хладниевы фигуры на круглой изотропной пластинке (233). 10.2.2. Хладниевы фигуры на анизотропной круглой пластинке (235). 10.2.3. Фигуры Хладни на пластинках произвольной формы (236).	
10.3. Дисперсия изгибных волн	237
10.3.1. Явление дисперсии изгибных волн (237). 10.3.2. Экспериментальное исследование дисперсии изгибных волн (237).	
10.4. Поверхности равных фаз изгибных волн	239
10.4.1. Волны на бумаге (239). 10.4.2. Цикл научного познания (240). 10.4.3. Учебная физическая теория (242). 10.4.4. Учебный физический эксперимент (247).	
10.5. Стоячая волна в стеклянном сосуде	249
10.5.1. Стоячая волна в стеклянном стакане (250). 10.5.2. Стоячая волна в стенках стеклянной колбы (250).	

Глава 11. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДРУГИЕ ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ	252
11.1. Интерференция изгибных волн	253
11.1.1. Интерференция волн от двух реальных источников (254).	
11.1.2. Интерференция круговых волн (255).	
11.1.3. Экспериментальное обоснование теории интерференции круговых волн (258).	
11.1.4. Интерференция при отражении от прямого края листа (259).	
11.1.5. Количественное подтверждение теории (260).	
11.2. Интерференция при отражении волны от круглого края пластинки	263
11.2.1. Интерференция при отражении от выпуклого и вогнутого краев листа (263).	
11.3. Фокусировка волны	266
11.3.1. Получение действительного изображения в круглом крае (266).	
11.3.2. Отражение от эллиптической поверхности (268).	
11.3.3. Отражение от параболической поверхности (271).	
11.4. Некоторые волновые явления	272
11.4.1. Преломление изгибной волны (273).	
11.4.2. Рассеяние волны (274).	
11.4.3. Распространение волны в волноводе (275).	
Глава 12. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КАВИТАЦИЯ	276
12.1. Физическая сущность ультразвуковой кавитации	276
12.1.1. Получение кавитационной полости (276).	
12.1.2. Гидродинамический удар (277).	
12.1.3. Наблюдение ультразвуковой кавитации (278).	
12.1.4. Разрушающее действие ультразвуковой кавитации (280).	
12.1.5. Причина ультразвуковой кавитации (281).	
12.2. Звукокапиллярный эффект	282
12.2.1. Аномальное поднятие жидкости в капилляре (282).	
12.2.2. Экспериментальное исследование звукокапиллярного эффекта (283).	
12.2.3. Элементарная теория звукокапиллярного эффекта (284).	
12.2.4. Экспериментальная проверка следствий теоретической модели (285).	
12.3. Явление сонолюминесценции	287
12.3.1. Обнаружение сонолюминесценции (288).	
12.3.2. Способы наблюдения сонолюминесценции (288).	
12.3.3. Зависимость сонолюминесценции глицерина от температуры (289).	
Глава 13. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА	291
13.1. Максимальная интенсивность ультразвука от ферритового вибратора	291
13.1.1. Предельная интенсивность ультразвука (291).	
13.1.2. Ультразвуковой концентратор (293).	
13.2. Ультразвуковое диспергирование	294

13.2.1. Образование аэрозолей (294).	13.2.2. Причина ультразвукового распыления жидкостей (296).	13.2.3. Образование горючей смеси (297).	13.2.4. Использование ультразвука для получения эмульсий (298).	13.2.5. Образование суспензий (300).
13.3. Ультразвуковая коагуляция	301			
13.3.1. Ультразвуковая коагуляция гидрозолей (301).	13.3.2. Ультразвуковая дегазация (303).			
13.4. Ультразвуковая очистка	305			
13.4.1. Использование ультразвука для очистки (305).	13.4.2. Экспериментальное исследование ультразвуковой очистки (306).			
13.5. Использование ультразвука в электрохимии	308			
13.5.1. Воздействие ультразвука на электролиз (308).	13.5.2. Дегазация электролита (309).	13.5.3. Электролитическое осаждение металла (309).		
13.6. Ультразвуковая пайка	312			
13.6.1. Залуживание и пайка алюминия (312).	13.6.2. Залуживание стекла и керамики (314).			
13.7. Обработка твердых и хрупких материалов	314			
13.7.1. Ультразвуковой сверлильный станок (315).	13.7.2. Модель ультразвукового сверлильного станка (316).	13.7.3. Ультразвуковое сверление стекла (319).		
13.8. Ультразвуковая сварка	320			
13.8.1. Ультразвуковой сварочный станок (320).	13.8.2. Экспериментальное исследование ультразвуковой сварки (321).			
13.9. Использование ультразвука в металлургии	323			
13.9.1. Влияние ультразвука на кристаллизацию (323).	13.9.2. Исследование кристаллизации под действием ультразвука (324).			
13.10. Применение ультразвука в медицине	325			
Заключение	326			
Приложение	327			
Литература	334			