

УНИВЕРСИТЕТЫ РОССИИ

А. Ф. Зацепин

# АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Под редакцией В. Е. Щербинина



Уральский  
федеральный  
университет

Юрайт  
издательство  
biblio-online.ru



**А. Ф. Зацепин**

# **АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВУЗОВ**

Под редакцией члена-корреспондента РАН, профессора,  
доктора технических наук **В. Е. Щербинина**

*Рекомендовано методическим советом УрФУ для студентов,  
обучающихся по направлению подготовки «Приборостроение»*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)**

**Москва ■ Юрайт ■ 2017  
Екатеринбург ■ Издательство Уральского университета**

УДК 620.179.16(075.8)

ББК 34.204.013.2я73

3-38

**Автор:**

**Зацепин Анатолий Федорович** — кандидат технических наук, доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества Физико-технологического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина.

**Редактор:**

**Щербинин Виталий Евгеньевич** — профессор, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Лаборатории дефектоскопии Института физики металлов Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург).

**Рецензенты:**

Уральский государственный лесотехнический университет (заведующий кафедрой физики — профессор, доктор физико-математических наук *М. П. Кащенко*);

*Аккерман Г. Л.* — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой пути и железнодорожного строительства строительного факультета Уральского государственного университета путей сообщения;

*Ринкевич А. Б.* — доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН (Институт физики металлов Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург)).

**Зацепин, А. Ф.**

3-38 Акустические измерения : учеб. пособие для вузов / А. Ф. Зацепин ; под ред. В. Е. Щербинина. — М. : Издательство Юрайт, 2017 ; Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. — 209 с. — Серия : Университеты России.

ISBN 978-5-534-02903-1 (Издательство Юрайт)

ISBN 978-5-7996-1818-6 (Изд-во Урал. ун-та)

Серия «Университеты России» позволит высшим учебным заведениям нашей страны использовать в образовательном процессе учебники и учебные пособия по различным дисциплинам, подготовленные преподавателями лучших университетов России и впервые опубликованные в издательствах университетов. Все представленные в этой серии учебники прошли экспертную оценку учебно-методического отдела издательства и публикуются в оригинальной редакции.

В учебном пособии излагаются теоретические и практические основы важнейших методов акустического контроля. Рассмотрены физические принципы генерации и приема ультразвука, методы расчета акустических полей, метрологические аспекты ультразвуковой дефектоскопии. Особое внимание уделено анализу волновых явлений в акустическом контроле, а также устройству и технологии применения современных типов УЗ-дефектоскопов. В приложении приведены термины и определения акустического контроля.

*Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Приборостроение» и всех, кто интересуется методикой акустических измерений.*

УДК 620.179.16(075.8)

ББК 34.204.013.2я73



*Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».*

ISBN 978-5-534-02903-1

(Издательство Юрайт)

ISBN 978-5-7996-1818-6

(Изд-во Урал. ун-та)

© Зацепин А. Ф., 2016

© Уральский федеральный университет,  
2016

© ООО «Издательство Юрайт», 2017

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ.....	5
1.1. Классификационная система .....	5
1.2. Методы прохождения.....	8
1.2.1. Амплитудный теневой метод .....	8
1.2.2. Временной теневой метод .....	10
1.2.3. Велосиметрический метод.....	11
1.3. Методы отражения .....	12
1.3.1. Эхометод .....	12
1.3.2. Эхозеркальный метод .....	13
1.3.3. Дельта-метод .....	15
1.3.4. Реверберационный метод.....	16
1.4. Импедансный метод.....	17
1.5. Метод свободных колебаний .....	18
1.6. Резонансный метод .....	20
1.7. Комбинированные методы .....	21
1.7.1. Зеркально-теневой метод .....	21
1.7.2. Эхотеневой метод.....	22
1.7.3. Эхосквозной метод .....	23
1.8. Пассивные методы АК.....	25
1.8.1. Акустико-эмиссионный метод.....	25
1.8.2. Вибро- и шумодиагностика.....	27
1.9. Способы осуществления акустического контакта.....	27

1.10. Преимущества и недостатки АК.....	29
Контрольные вопросы.....	31
<b>2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ.....</b>	<b>32</b>
2.1. Колебания и волны .....	32
2.2. Волновой фронт. Плоские, сферические и цилиндрические волны .....	37
2.3. Упругие характеристики среды .....	40
2.4. Фазовая и групповая скорости. Дисперсия скорости.....	45
2.5. Энергетические характеристики упругих волн.....	48
2.6. Акустические свойства сред.....	51
2.6.1. Скорость звука .....	51
2.6.2. Акустический импеданс .....	52
2.6.3. Затухание УЗК .....	53
Контрольные вопросы.....	58
<b>3. УПРУГИЕ ВОЛНЫ В ОГРАНИЧЕННЫХ СРЕДАХ.....</b>	<b>59</b>
3.1. Поверхностная волна Рэлея.....	59
3.2. Головные волны .....	62
3.3. Нормальные волны .....	64
3.3.1. Волны Лэмба .....	64
3.3.2. Волны в стержнях (волны Порхгаммера) .....	70
Контрольные вопросы.....	73
<b>4. ПРОХОЖДЕНИЕ ВОЛН ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ СРЕД.....</b>	<b>74</b>
4.1. Коэффициенты отражения и прохождения.....	74
4.2. Обобщенный закон Снеллиуса.....	77
4.3. Критические углы .....	79
4.4. Прохождение волн через границу раздела сред .....	81
4.4.1. Прохождение акустической волны через границу жидкость — жидкость .....	81
4.4.2. Энергетические соотношения на границе жидкость — жидкость и твердое тело — твердое тело.....	84
4.5. Угловая зависимость коэффициентов прозрачности .....	85
4.6. Отражение акустической волны от свободной поверхности твердого тела .....	87
4.7. Явление незеркального отражения .....	89

4.8. Отражение от двугранного угла .....	92
4.9. Прохождение волн через тонкий слой на границе раздела двух сред .....	93
4.10. Влияние толщины слоя на прохождение акустических волн .....	97
Контрольные вопросы .....	99
<b>5. ИЗЛУЧАТЕЛИ И ПРИЕМНИКИ УЛЬТРАЗВУКА .....</b>	<b>101</b>
5.1. Пьезоэлектрический эффект .....	102
5.2. Пьезоэлектрические материалы и их свойства .....	106
5.3. Классификация пьезопреобразователей .....	108
5.4. Конструкция преобразователей .....	109
5.5. Обозначение пьезопреобразователей .....	118
5.6. Передаточная функция преобразователя .....	119
5.7. Эквивалентные схемы пьезоизлучателей и приемников .....	121
5.8. Рациональный выбор параметров преобразователя .....	124
5.9. Бесконтактные способы излучения и приема акустических волн .....	130
Контрольные вопросы .....	139
<b>6. АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ .....</b>	<b>140</b>
6.1. Поле преобразователя произвольной формы .....	141
6.2. Поле дискового преобразователя .....	143
6.3. Диаграмма направленности .....	146
6.4. Поле кольцеобразного преобразователя .....	149
6.5. Поле прямоугольного преобразователя .....	149
6.6. Поле преобразователя с акустической задержкой .....	152
Контрольные вопросы .....	157
<b>7. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ .....</b>	<b>159</b>
7.1. Модели дефектов .....	160
7.2. Расчет акустического тракта для случая прямого преобразователя .....	161
7.3. Расчет акустического тракта для случая наклонного преобразователя .....	164
7.4. Стандартные образцы (СО) .....	167

---

7.5. Эквивалентный размер дефекта .....	171
7.6. АРД-диаграмма .....	172
Контрольные вопросы.....	174
<b>8. АППАРАТУРА И ТЕХНОЛОГИЯ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ .....</b>	<b>176</b>
8.1. Ультразвуковой дефектоскоп .....	176
8.2. Шумы и помехи при ультразвуковом контроле .....	186
8.3. Причины возникновения и способы подавления ложных сигналов .....	188
8.4. Процедура контроля.....	194
Контрольные вопросы.....	195
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>196</b>
<b>РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>198</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ (СПРАВОЧНОЕ) .....</b>	<b>199</b>