

О.Ф. ШЛЁНСКИЙ,
С.И. АНТОНОВ,
К.В. ХИЩЕНКО

АКУСТИКА И ТЕРМОДИНАМИКА НЕРАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ

2-е издание, дополненное и исправленное

Москва
Инновационное машиностроение
2022

УДК 536.46+662.42

ББК 24.54:35.63

Ш 68

Рецензенты: В. М. Аристов, доктор физ.-мат. наук,
проф. РХТУ им. Д.И. Менделеева
Т. Б. Крит, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник
МГУ им. М.В. Ломоносова

Шлёнский О.Ф., Антонов С.И., Хищенко К.В.

Ш 68 Акустика и термодинамика неравновесных состояний. 2-е изд., доп. и испр. — М.: Инновационное машиностроение, 2022. — 128 с., ил.

ISBN 978-5-907523-05-0

Предложена новая модель распространения звука высоких частот и ударных волн впервые с учетом массовых сил, анизотропии свойств газа, приобретаемой при возбуждении генератором, и релаксационных процессов перехода к равновесному состоянию.

В настоящее издание внесены коррективы и дополнения в теорию звуковых волн для повышения качества проектирования акустических объектов, устройств и инструментов, точности моделирования гиперзвуковых и детонационных процессов.

Для научных работников и инженеров, специализирующихся в области физики звука.

УДК 536.46, 662.42

ББК 24.54:35.63

© О.Ф. Шлёнский, С.И. Антонов, К.В. Хищенко, 2022
ISBN 978-5-907523-05-0 © ООО «Издательство «Инновационное
машиностроение», 2022

Содержание

Предисловие ко второму изданию	3
Предисловие к первому изданию	4
ГЛАВА 1. Кратковременное (ударное) деформирование газа	6
1.1. Начальные сведения	6
1.2. Модуль продольной упругости кратковременно (ударно) сжатого газа	7
1.3. Термодинамическое описание одномерного кратковременно (ударно) деформированного газа	8
ГЛАВА 2. Основные сведения о стоячей и бегущей волне	9
2.1. Основные определения и терминология	9
2.2. «Парадокс» обнуления энергии звуковой волны в нулевых точках колебаний массовой скорости и давления	10
2.3. Пример осциллографирования звуковых колебаний	11
ГЛАВА 3. Изменение свойств газа при быстром (ударном) нагружении	13
3.1. Анизотропия плотности газа	13
3.2. Компоненты тензора напряжений	18
3.3. Распределение молекул газа по скоростям. Анизотропия температурного поля	19
ГЛАВА 4. Эстафетный механизм передачи начального импульса и энергии со скоростью звуковой волны	22
ГЛАВА 5. Генерация звука в невозмущенной среде набегающей волной	25
5.1. Взаимосвязь переноса энергии и количества движения в бегущей волне	25
5.2. Внедрение бегущей звуковой волны в неподвижную среду	25
ГЛАВА 6. Генерация бегущей звуковой волны мембраной	27
6.1. Характеристика напряженного состояния среды вблизи мембраны генератора звука на удалении от стенок корпуса	27
6.2. Особенности непрерывной генерации звуковых волн	28
6.3. Формирование начального импульса I_1 и скорости u_1 генераторами звука	29
6.4. Другие неполные волновые уравнения	32
ГЛАВА 7. Дифференциальные уравнения стоячей волны	35
7.1. Однородное неполное уравнение стоячей волны	35
7.2. Отсутствие переноса энергии и «интенсивности» стоячей волны	37
7.3. Вырождение однородного волнового дифференциального уравнения при переходе к сопутствующей системе координат	38
7.4. Анализ решения уравнения стоячей волны	40
7.5. Единое волновое уравнение колебаний перемещений, давления, скорости и плотности	40
7.6. Расширение области существования волновых колебаний со скоростью c	41
ГЛАВА 8. Определение интенсивности и громкости звуковой волны	43
8.1. Основные сведения	43
8.2. Усиление громкости звука с помощью раструба патефона	45
8.3. Усиление громкости звука раструбами духовых музыкальных инструментов и певцами	46

8.4. Разнообразие форм переходов изотропного газа в анизотропное состояние и обратно.....	48
Основной вывод.....	49
ГЛАВА 9. Расчет характеристик бегущей звуковой волны	50
9.1. Пример расчета характеристик на основе закона Гука	50
9.2. Результаты обработки фонограммы звуковой волны	53
9.3. Изменение температурного поля при движении волн	54
ГЛАВА 10. Стадии осевого и объёмного сжатия газа	55
10.1. Возникновение анизотропии плотности при «мгновенном» сжатии газа ..	55
10.2. Связь перемещений с волновыми колебаниями давления, частотная зависимость коэффициента ϵ	58
10.3. Кратковременная анизотропия твердых, жидких и газообразных сред, вызываемая прохождением упругих волн	59
Основной вывод.....	60
ГЛАВА 11. Уравнения бегущей волны	61
11.1. Уравнение бегущей звуковой волны по Эйлеру	61
11.2. Уравнение высокочастотной бегущей волны	62
11.3. Уравнение волны звука с учетом приобретенной анизотропии газа.....	63
11.4. Воздействие звуковой волны на препятствие	72
ГЛАВА 12. Разнообразие способов генерации звука	73
12.1. Генерация звуковой волны голоса и духовых музыкальных инструментов	73
12.2. Генерация звуковой волны крыльями мелких насекомых	75
12.3. Возбуждение звука воздушным потоком	77
ГЛАВА 13. Основные сведения о моделировании плоской ударной волны	78
13.1. Исходные соотношения	78
13.2. Сопоставление моделей ударной и звуковой волн	83
13.3. Пример генерации ударной волны	87
13.4. Воздействие ударной волны на энергоемкие материалы. Инициирование горения энергоемких материалов	89
13.5. Возникновение поперечных растягивающих образцов напряжений под действием ударной волны	91
13.6. Упрощенная модель ударной волны	94
13.7. Волновые функции $f(t)$ и $f_r(r)$	97
ГЛАВА 14. Моделирование термоядерных детонационных волн	98
14.1. Система основных уравнений.....	98
14.2. Уравнения состояния для моделей детонационных волн.....	100
Заключение	102
Приложения.....	103
П1. Энергия образования фронта ударной волны.....	103
П2. Интенсивность звуковой волны. Подробности	104
П3. Теплоемкость, вязкость, самодиффузия и показатель адиабаты при быстром нагружении газа.....	105
П4. Определение начальной скорости u_i бегущей звуковой волны по увеличению громкости звука движением среды	106

П5. Определение времени релаксации τ_r по опытным данным	107
П6. Корректировка критерия подобия с учетом перехода сплошной среды в анизотропное состояние	110
П7. Уравнения состояния одно- и двумерно- деформированного газа	111
П8. Использование эффекта анизотропного состояния среды летучими мышами, в ультразвуковой дефектоскопии, диагностике, стоматологии и других разделах медицины	112
П9. Изменение температурного поля и свойств сред при внезапном волновом воздействии	113
П10. Описание расширения области математически абстрактной стоячей волны функцией $f(x - ct)$	114
П11. Сохранение громкости звука голоса в разговоре	115
П12. Опытное, практическое подтверждение возникновения кратковременного состояния анизотропии воздуха	116
П13. Анизотропия твердой среды при одноосном нагружении	119
П14. Реологическая модель одноосного и объемного деформирования газа ...	120
П15. Определение времени релаксации газа по перекрытию экраном высокочастотной составляющей компоненты поличастотного звука	120
П16. Температурное поле высокочастотных волн	121
П17. КПД цикла Карно и уравнения Бойля—Мариотта с анизотропным газом	122
П18. Предельные pV -диаграммы газа	123
Список литературы	124