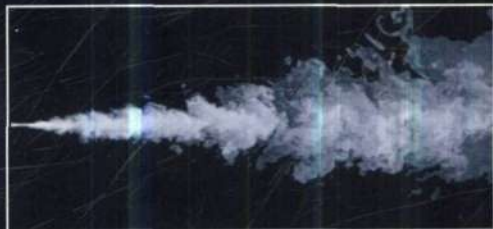
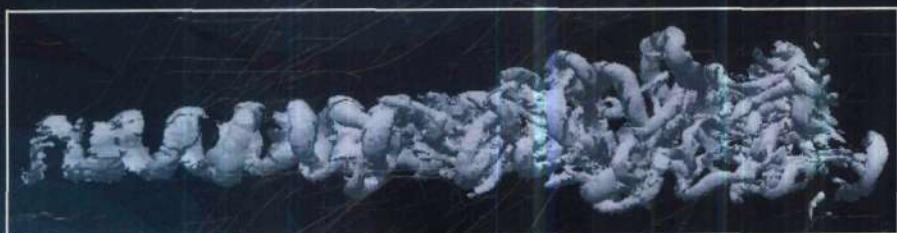


1541353

# АКУСТИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ



# АКУСТИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

*Под редакцией  
профессора В.Н. Емельянова  
и доктора физико-математических наук  
К.Н. Волкова*



**МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2021**

УДК 532.529  
ББК 22.253  
А 53



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 20-18-00021, не подлежит продаже

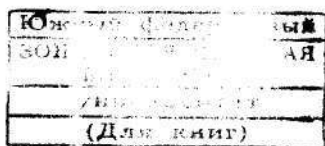
Авторский коллектив:

Волков К.Н., Емельянов В.Н., Цветков А.И.,  
Рассошенко Ю.С., Козелков А.С., Карпенко А.Г.

**Акустические взаимодействия в газовых потоках.** Под ред. В.Н. Емельянова, К.Н. Волкова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. — 592 с. — ISBN 978-5-9221-1890-3.

Интерес к разработке моделей и методов аэроакустики объясняется постоянно ужесточающимися требованиями по шуму, производимому различными промышленными устройствами. Излагаются результаты теоретических, численных и экспериментальных исследований акустических явлений в газовых потоках. Приводится обзор моделей и численных методов, лежащих в основе вычислительной акустики. Особое внимание уделяется интегральным методам расчета шума в дальнем поле и особенностям численной реализации соответствующих математических моделей. Даются рекомендации по реализации разработанных подходов и интерпретации получаемой информации, а также графической и статистической обработке результатов расчетов и экспериментов. Обсуждаются результаты комплексного численного и экспериментального исследования до- и сверхзвуковых струйных турбулентных течений, а также акустической неустойчивости рабочих процессов в установках с горением. Исследуются генерация и подавление турбулентности в газовых потоках при низко- и высокочастотном акустических воздействиях и связанное с этими воздействиями изменение шума, а также влияние частиц конденсированной фазы на акустические характеристики внутренних течений. Разработанные средства численного моделирования задач газовой динамики и акустики представляют собой инструменты решения исследовательских и инженерных задач, служат основой разработки новых методов и вычислительных алгоритмов, а также позволяют провести оценки эффективности ряда средств снижения шума струйных течений.

Книга предназначена научным работникам и специалистам в области механики жидкости и газа, акустики, экспериментальной и вычислительной газовой динамики, теплофизики и аэрокосмической техники, а также преподавателям высших учебных заведений и сотрудникам научно-исследовательских организаций, изучающим и решающим различные проблемы газовой динамики и акустики, студентам старших курсов и аспирантам соответствующих специальностей.



ISBN 978-5-9221-1890-3

© ФИЗМАТЛИТ, 2021  
© Коллектив авторов, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	9
Термины и определения . . . . .	13
Введение . . . . .	20
<b>Глава 1. Акустические поля и их характеристики . . . . .</b>	<b>26</b>
1.1. Задачи аэроакустики . . . . .	27
1.2. Шумы и их классификация . . . . .	31
1.2.1. Общие сведения и характеристики шума . . . . .	31
1.2.2. Спектральные и временные характеристики шума . . . . .	35
1.2.3. Аэродинамический шум . . . . .	39
1.3. Случайные процессы и их характеристики . . . . .	41
1.3.1. Детерминированный и случайный процессы колебаний . . . . .	41
1.3.2. Спектр случайного процесса . . . . .	43
1.3.3. Спектральная плотность . . . . .	45
1.3.4. Спектральный анализ . . . . .	50
1.4. Распространение звука и характеристики акустического поля . . . . .	55
1.4.1. Волновое уравнение . . . . .	55
1.4.2. Основные характеристики . . . . .	56
1.4.3. Частотный спектр . . . . .	60
1.5. Уравнения акустики . . . . .	63
1.6. Способы снижения шума . . . . .	66
1.7. Основные направления снижения шума силовой установки самолета . . . . .	70
1.7.1. Характеристики шума самолета на местности . . . . .	70
1.7.2. Нормирование авиационного шума . . . . .	73
1.7.3. Характеристики шума реактивного двигателя . . . . .	74
1.7.4. Проблема авиационного шума на местности . . . . .	76
1.7.5. Источники шумов . . . . .	77
1.7.6. Шум струи . . . . .	81
1.7.7. Шум вентилятора . . . . .	82
1.8. Основные направления снижения шума высокоскоростных поездов . . . . .	84
1.8.1. Характеристики шума поездов . . . . .	84
1.8.2. Нормирование железнодорожного шума . . . . .	85
1.8.3. Процессы шумообразования . . . . .	89
1.8.4. Методы снижения шума от высокоскоростных поездов . . . . .	92

<b>Глава 2. Математические модели, используемые для описания шума, и их реализация.</b>	95
2.1. Методы моделирования турбулентных течений	96
2.1.1. Основные подходы	96
2.1.2. Решение уравнений Рейнольдса	98
2.1.3. Прямое численное моделирование	100
2.1.4. Моделирование крупных вихрей	100
2.1.5. Моделирование отсоединенных вихрей	102
2.2. Уравнения газовой динамики	102
2.3. Основные методы акустики	104
2.4. Гибридные методы	108
2.5. Прямые методы	110
2.6. Модель Блохинцева и ее развитие	112
2.7. Акустическая аналогия Лайтхилла и ее развитие	113
2.7.1. Волновое уравнение	113
2.7.2. Решение волнового уравнения	117
2.7.3. Различные формы волнового уравнения	120
2.7.4. Уравнение Филлипса	122
2.7.5. Уравнение Лилли	123
2.7.6. Варианты акустической аналогии	124
2.8. Интегральные методы расчета шума в дальнем поле	126
2.8.1. Особенности реализации	126
2.8.2. Дифференциальная форма	127
2.8.3. Интегральная форма	135
2.8.4. Компактные источники	140
2.9. Двумерная формулировка интегрального подхода	142
2.9.1. Формулировка в физическом пространстве	142
2.9.2. Формулировка в волновом пространстве	144
2.10. Модели широкополосного шума	145
2.10.1. Характеристики акустического поля	145
2.10.2. Особенности формулировки	147
2.10.3. Модель Праудмана	148
2.10.4. Модель Голдштейна	150
2.10.5. Модель Керла	151
2.10.6. Источниковые члены в линеаризованных уравнениях Эйлера	152
2.10.7. Источниковые члены в уравнении Лилли	153
<b>Глава 3. Вычислительный эксперимент в аэроакустике</b>	154
3.1. Математические модели аэроакустики	155
3.2. Вычислительные алгоритмы	159
3.3. Гибридные схемы	167
3.4. Схемы DRP для дискретизации пространственных производных	170
3.4.1. Центральнo-разностные схемы DRP	171
3.4.2. Узкополосная фильтрация	176
3.4.3. Схемы DRP и фильтрация со смещенными шаблонами	180
3.5. Многошаговые схемы Рунге–Кутты	184
3.6. Программная реализация	186
3.7. Верификация и тестирование	188

3.8. Требования к вычислительным ресурсам . . . . .	191
3.9. Численная реализация в трехмерном случае . . . . .	195
3.9.1. Выбор контрольной поверхности . . . . .	195
3.9.2. Квадратурные формулы . . . . .	198
3.9.3. Интерполяция подынтегральных выражений . . . . .	201
3.10. Численная реализация в двумерном случае . . . . .	203
<b>Глава 4. Примеры расчетов акустических полей, генерируемых различными течениями.</b> . . . . .	<b>206</b>
4.1. Точечные источники . . . . .	207
4.1.1. Монополь . . . . .	207
4.1.2. Диполь . . . . .	209
4.1.3. Квадруполь . . . . .	211
4.1.4. Граница дальней волновой зоны . . . . .	213
4.2. Генерация шума компактными источниками . . . . .	214
4.2.1. Основные уравнения . . . . .	214
4.2.2. Трехмерные источники . . . . .	216
4.2.3. Двумерные источники . . . . .	223
4.2.4. Вихревые источники . . . . .	227
4.2.5. Монопольный источник в однородном потоке . . . . .	228
4.3. Распространение акустического импульса . . . . .	231
4.4. Гармонический источник звука в неограниченном однородном потоке . . . . .	242
4.5. Расчет шума при обтекании цилиндра . . . . .	248
4.5.1. Ламинарное обтекание . . . . .	248
4.5.2. Турбулентное обтекание . . . . .	254
4.6. Пульсации давления, обусловленные взаимодействием потока с препятствием . . . . .	259
4.6.1. Псевдозвуковые пульсации давления . . . . .	259
4.6.2. Сопряженные задачи . . . . .	262
4.6.3. Математическая модель . . . . .	264
4.6.4. Течение воды в канале с препятствием . . . . .	267
4.6.5. Оценка параметров течения . . . . .	269
4.6.6. Схема расчета . . . . .	269
4.6.7. Результаты расчетов . . . . .	271
<b>Глава 5. Газодинамические и акустические характеристики до- и сверхзвуковых струй</b> . . . . .	<b>276</b>
5.1. Источники шума дозвуковой струи . . . . .	277
5.2. Характеристики дозвуковых струй . . . . .	281
5.2.1. Затопленные струи . . . . .	281
5.2.2. Спутные струи . . . . .	283
5.2.3. Соосные струи . . . . .	285
5.3. Источники шума сверхзвуковой струи . . . . .	287
5.3.1. Механизмы генерации шума . . . . .	287
5.3.2. Шум смешения . . . . .	290
5.3.3. Широкополосный ударно-волновой шум . . . . .	291
5.3.4. Дискретный тон . . . . .	293
5.3.5. Методы расчета . . . . .	295
5.4. Структура сверхзвуковой струи . . . . .	297

5.5. Струя, истекающая из конического сопла . . . . .	300
5.5.1. Методы расчета . . . . .	300
5.5.2. Расчетная область и сетка . . . . .	301
5.5.3. Метод расчета . . . . .	303
5.5.4. Структура струи . . . . .	304
5.5.5. Локальные характеристики . . . . .	307
5.5.6. Коэффициенты расхода и тяги . . . . .	309
5.5.7. Генерация шума при дозвуковых скоростях . . . . .	311
5.5.8. Генерация шума при сверхзвуковых скоростях . . . . .	316
5.6. Характеристики пульсирующих струй . . . . .	319
5.7. Эффективность методов снижения шума турбулентных струй . . . . .	325
<b>Глава 6. Возбуждение колебаний газа при взаимодействии струи с полостью . . . . .</b>	<b>334</b>
6.1. Автоколебательные процессы . . . . .	335
6.2. Взаимодействие сверхзвуковой струи с цилиндрической полостью . . . . .	336
6.2.1. Взаимодействие сверхзвуковой струи с преградой . . . . .	336
6.2.2. Схема измерений . . . . .	339
6.2.3. Волновые диаграммы и предельные циклы колебаний . . . . .	340
6.2.4. Структура колебательного процесса . . . . .	349
6.3. Акустические характеристики автоколебательного процесса . . . . .	356
6.3.1. Акустика струйных излучателей звука . . . . .	356
6.3.2. Схема измерений . . . . .	357
6.3.3. Структура сверхзвуковой струи и зона акустического излучения . . . . .	359
6.3.4. Амплитуда колебаний давления . . . . .	360
6.3.5. Акустические характеристики . . . . .	362
6.4. Газоструйные стержневые излучатели с дозвуковой струей . . . . .	366
6.4.1. Дозвуковые струйные излучатели . . . . .	366
6.4.2. Волновая диаграмма и расчетные соотношения . . . . .	369
6.4.3. Дозвуковой струйный стенд . . . . .	370
6.4.4. Геометрические и режимные параметры . . . . .	373
6.4.5. Газодинамические характеристики . . . . .	374
6.4.6. Амплитудно-частотные параметры . . . . .	377
6.5. Инфразвуковые газоструйные резонансные излучатели . . . . .	380
6.5.1. Повышение эффективности . . . . .	380
6.5.2. Струйный стенд . . . . .	383
6.5.3. Геометрические и режимные параметры . . . . .	383
6.5.4. Амплитудно-частотные характеристики . . . . .	385
6.5.5. Влияние геометрических и режимных параметров на генерацию звука . . . . .	388
6.6. Области применения . . . . .	393
6.7. Струи, создаваемые газоимпульсными генераторами . . . . .	395
6.7.1. Газоимпульсная очистка . . . . .	396
6.7.2. Результаты исследований . . . . .	400
6.8. Аэроакустика промышленной аэродинамической трубы . . . . .	406
6.8.1. Аэродинамические трубы с открытой рабочей частью . . . . .	407
6.8.2. Моделирование пульсаций давления . . . . .	407

6.8.3. Методика измерения инфразвуковых пульсаций давления . . .	412
6.8.4. Демпфирование инфразвуковых пульсаций давления . . . . .	415
<b>Глава 7. Механизмы и условия возбуждения автоколебаний газа в установках с горением . . . . .</b>	<b>419</b>
7.1. Рабочие процессы и режимы работы . . . . .	420
7.2. Квазистационарный режим работы . . . . .	424
7.3. Нестационарные и неустойчивые режимы . . . . .	426
7.3.1. Качественные характеристики . . . . .	426
7.3.2. Неустойчивость рабочего процесса . . . . .	429
7.4. Характеристики волновых процессов . . . . .	431
7.4.1. Волновое уравнение . . . . .	432
7.4.2. Плоские волны . . . . .	432
7.4.3. Звуковая энергия и затухание волн . . . . .	433
7.4.4. Частотные характеристики . . . . .	434
7.4.5. Акустика цилиндрической камеры сгорания . . . . .	435
7.4.6. Процессы развития и гашения колебаний . . . . .	438
7.4.7. Учет энерговыделения . . . . .	441
7.5. Низкочастотная неустойчивость . . . . .	442
7.6. Нестационарное горение топлива . . . . .	445
7.7. Потери акустической энергии и способы подавления колебаний . . . . .	448
7.8. Лабораторные методы исследования вибрационного горения . . . . .	449
7.8.1. Т-камеры . . . . .	450
7.8.2. Камеры с вынужденными колебаниями давления . . . . .	454
7.8.3. Микроволновые камеры . . . . .	455
7.8.4. Другие типы установок . . . . .	456
<b>Глава 8. Моделирование акустической неустойчивости рабочих процессов в установках с горением . . . . .</b>	<b>457</b>
8.1. Моделирование акустических и колебательных процессов . . . . .	458
8.1.1. Источники неустойчивости . . . . .	458
8.1.2. Математическая модель распространения звука в канале . . . . .	459
8.2. Акустическое поле в канале заряда . . . . .	462
8.2.1. Основные уравнения . . . . .	462
8.2.2. Поперечные колебательные моды . . . . .	462
8.2.3. Продольные колебательные моды . . . . .	465
8.3. Линейный подход к исследованию устойчивости . . . . .	467
8.4. Нестационарное течение в канале с гармоническими возмущениями скорости . . . . .	469
8.5. Нестационарные процессы . . . . .	474
8.5.1. Основные подходы . . . . .	474
8.5.2. Нестационарное горение топлива . . . . .	476
8.5.3. Волновые процессы . . . . .	478
8.5.4. Ламинарные течения . . . . .	480
8.5.5. Ламинарно-турбулентный переход . . . . .	482
8.5.6. Турбулентные течения . . . . .	486
8.5.7. Крупномасштабные вихревые структуры . . . . .	489
8.5.8. Управление течениями . . . . .	490
8.6. Химически реагирующие течения . . . . .	492



8.7. Волновые явления в камере сгорания . . . . .	496
8.7.1. Основные допущения . . . . .	496
8.7.2. Волновое уравнение . . . . .	496
8.7.3. Модельное уравнение . . . . .	497
8.7.4. Акустический баланс . . . . .	498
8.7.5. Вычисление интегралов . . . . .	502
8.7.6. Разворот потока . . . . .	505
8.7.7. Вклад дисперсной фазы . . . . .	506
8.7.8. Устойчивость течения . . . . .	508
8.8. Моделирование крупных вихрей турбулентного течения в канале заряда . . . . .	510
8.8.1. Формулировка модели . . . . .	510
8.8.2. Параметры и сетка . . . . .	511
8.8.3. Сеточная зависимость решения . . . . .	511
8.8.4. Результаты расчетов . . . . .	514
8.9. Стохастическое моделирование движения частицы в канале . . . . .	525
8.10. Демпфирование акустических колебаний частицами конденсиро- ванной фазы . . . . .	530
8.10.1. Акустические, вихревые и энтропийные волны . . . . .	530
8.10.2. Механизмы взаимодействия . . . . .	531
8.10.3. Влияние горения частиц . . . . .	532
8.10.4. Теоретические решения . . . . .	534
8.10.5. Построение математической модели . . . . .	536
8.10.6. Вычислительная процедура . . . . .	539
8.10.7. Результаты расчетов . . . . .	540
8.10.8. Столкновения между частицами . . . . .	545
Заключение . . . . .	549
Список литературы . . . . .	553