

# 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. Центральные-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. Слутные 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