

А. Ю. ГОЛУБЕВ  
Е. Б. КУДАШЕВ  
Л. Р. ЯБЛОНИК

**ТУРБУЛЕНТНЫЕ  
ПУЛЬСАЦИИ  
ДАВЛЕНИЯ  
В АКУСТИКЕ  
И АЭРОГИДРОДИНАМИКЕ**



Институт космических исследований Российской академии наук  
Центральный аэрогидродинамический институт  
имени профессора Н. Е. Жуковского  
Научно-производственное объединение по исследованию  
и проектированию энергетического оборудования  
имени И. И. Ползунова

А. Ю. ГОЛУБЕВ  
Е. Б. КУДАШЕВ  
Л. Р. ЯБЛОНИК

# **ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В АКУСТИКЕ И АЭРОГИДРОДИНАМИКЕ**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2019

УДК 534.21: 532.517.4  
ББК 30.13  
Г 62



*Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований по проекту 18-12-00026,  
не подлежит продаже*

Голубев А.Ю., Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р. **Турбулентные пульсации давления в акустике и аэрогидродинамике.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. — 424 с. + 6 с. цв. вкл. — ISBN 978-5-9221-1827-9.

Рассмотрены основные методические вопросы проведения измерений турбулентных пристеночных пульсаций давления, в том числе в условиях вибрационных, акустических и тепловых помех. Представлены результаты экспериментальных исследований пространственно-временной структуры различных неоднородных полей пульсаций давления и их моделирования. Особое место уделено вопросам генерации шума под воздействием пульсаций давления и эффективности решений, относящихся к подавлению шума в различных технических устройствах.

Книга будет одинаково интересна научным сотрудникам, разрабатывающим измерительные средства, экспериментальные установки и методы подавления аэрогидродинамических шумов, проектировщикам, изучающим особенности пульсационных воздействий на обтекаемую поверхность летательных аппаратов, аспирантам и студентам старших курсов, изучающим турбулентные источники шума.

ISBN 978-5-9221-1827-9

© ФИЗМАТЛИТ, 2019  
© А.Ю. Голубев, Е.Б. Кудашев,  
Л.Р. Яблоник, 2019

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	6
----------------	---

## **I. Постановка задачи определения пространственно-временной структуры пульсаций давления. Методические вопросы измерений**

<b>Глава 1. Общие сведения об основных статистических характеристиках пульсаций давления и методике проведения измерений</b> .....	<b>13</b>
1.1. Основные статистические характеристики пульсаций давления .....	13
1.2. Применение теории подобия .....	16
1.3. Представление структуры поля пристеночных пульсаций давления в виде частотно-волнового спектра .....	19
1.4. Экспериментальные установки. Общие сведения о методике проведения измерений .....	23
<b>Глава 2. Методические вопросы измерения пульсаций давления</b> .....	<b>34</b>
2.1. Выбор приемников пульсаций давления .....	34
2.2. Разрешающая способность приемника пульсаций давления .....	50
2.2.1. Проблема разрешающей способности приемника пульсаций давления .....	52
2.2.2. Избирательные свойства изгибного пьезоэлектрического приемника турбулентных давлений .....	56
2.2.3. Оценки влияния геометрических размеров приемника на измерение частотных спектров турбулентных давлений .....	60
2.3. Оценка влияния внешних помех (вибрационная помеха, акустические шумы, температурная помеха) .....	65
2.3.1. Подавление вибрационной помехи .....	65
2.3.2. Выделение спектральных компонент турбулентных пульсаций на фоне акустических шумов .....	73
2.3.3. Учет температурной помехи при исследовании турбулентных давлений .....	77
2.4. Оценка искажений при отклонении позиции датчика (выступление, углубление) .....	83
2.5. Роль защитной сетки приемника пульсаций давления .....	91
2.6. Пульсации давления на поверхности всплывающего устройства .....	100
<b>Глава 3. Волновые свойства полей пульсаций давления. Оценка возможностей волновой фильтрации</b> .....	<b>109</b>
3.1. Возможности волновой фильтрации полей пристеночных турбулентных давлений с помощью единичного приемника .....	112

3.2. Пространственные спектроанализаторы пристеночных пульсаций давления . . . . .	116
3.3. Частотно-волновой спектральный анализ пульсаций давления фазированной акустической решеткой . . . . .	122
3.4. Волновая фильтрация с помощью колеблющихся резонансных конструкций . . . . .	125
<b>Глава 4. Характеристический функционал и функциональные модели . . . . .</b>	<b>147</b>
4.1. Роль характеристического функционала турбулентных пульсаций давления в задачах контроля аэрогидродинамических шумов . . . . .	147
4.2. Основные свойства и модели характеристических функционалов турбулентных полей . . . . .	152
4.3. К вопросу экспериментальной оценки характеристического функционала пристеночных турбулентных давлений . . . . .	156
 <b>II. Поля аэродинамических пульсаций давления и их моделирование</b> 	
Предисловие к части II . . . . .	167
<b>Глава 5. Однородное поле пульсаций давления . . . . .</b>	<b>171</b>
5.1. Частотные спектры пристеночных пульсаций давления . . . . .	171
5.2. Пространственно-временные корреляционные характеристики. Взаимные спектры . . . . .	177
5.3. Частотно-волновой спектр однородного поля . . . . .	185
<b>Глава 6. Неоднородные поля пульсаций давления в окрестности конфигурации «прямой уступ — обратный уступ» . . . . .</b>	<b>188</b>
6.1. Пульсации давления при обтекании выступов . . . . .	189
6.2. Глобальная корреляция . . . . .	205
6.3. Расчетная модель полей пульсаций давления конфигурации «прямой уступ — обратный уступ» . . . . .	218
6.4. Пульсации давления на поверхности выступа . . . . .	226
6.5. Изменение угла наклона стенок и угла скоса потока . . . . .	231
6.6. Влияние относительного расположения зон рециркуляции . . . . .	237
<b>Глава 7. Другие неоднородные поля пульсаций давления . . . . .</b>	<b>246</b>
7.1. Трансформация полей пульсаций давления при градиенте статического давления . . . . .	246
7.2. Влияние локальной сверхзвуковой зоны . . . . .	260
7.3. Трехмерные поля пульсаций давления на обтекаемых моделях . . . . .	264
7.4. Особенности структуры полей пульсаций давления в окрестности плохообтекаемых тел (цилиндров) . . . . .	276
7.4.1. Пульсации давления под горизонтальными цилиндрами . . . . .	276
7.4.2. Пульсации давления в окрестности консольных цилиндров . . . . .	282
7.5. Пульсации давления при струйном обтекании поверхности . . . . .	289

### III. Генерация аэрогидродинамических шумов в технике

Глава 8. Аэроакустическое взаимодействие. Генерация шума в полости между дверью пассажирского самолета и фюзеляжем . . .	299
Глава 9. Прогноз шума в салоне современного пассажирского самолета. . . . .	317
9.1. Постановка задачи колебаний упругой тонкостенной конструкции фюзеляжа под действием случайной нагрузки. . . . .	318
9.2. Определение форм и частот собственных колебаний . . . . .	322
9.3. Оценка уровней шума в салоне самолета на режиме крейсерского полета . . . . .	326
Глава 10. Шумообразование в энергетических клапанах . . . . .	334
Глава 11. Возбуждение аэроакустических автоколебаний в каналах с трубчатыми теплообменниками. . . . .	345
11.1. Акустико-аэродинамические взаимодействия и пульсации давления в каналах с трубчатыми элементами . . . . .	345
11.2. Условия возникновения аэроакустических автоколебаний . . . . .	352
Глава 12. Генерация шума в ступенчатом дросселирующем устройстве . . . . .	358
12.1. Генерация шума в ступенчатом дросселирующем устройстве. . . . .	358
12.2. Снижение шума ступенчатого дросселирования . . . . .	366
Глава 13. Особенности звукоизолирующих свойств элементов энергоустановок. . . . .	372
Список литературы . . . . .	388