

Н.Н. Широков, Э.Н. Вознесенский

**Введение в механику
жидкости и газа**

Учебное пособие для вузов

Москва 2007

УДК 532 (075.8)
ББК 22.253.3я.73
Ш64

Рецензенты:

Кафедра аэродинамики летательных аппаратов Московского авиационного
института (государственного технического университета)
Доктор физико-математических наук, профессор *С.Г. Черкасов*

Широков Н.Н., Вознесенский Э.Н.

Ш 64 Введение в механику жидкости и газа. – М.: 2007. – 324 с.
ISBN 5-7417-0184-1

В сжатом виде представлены основы механики жидкости и газа, являющейся исходной, фундаментальной составляющей современной научно-образовательной программы подготовки специалистов аэрокосмического профиля. Книга написана по материалам оригинального курса лекций, который при систематическом его совершенствовании в течение ряда лет читался в МФТИ на факультете аэрофизики и космических исследований студентам второго года обучения.

В пособии используется относительно несложный математический аппарат, что позволяет в ходе изложения уделять больше внимания физическим аспектам. В пособие помещены все классические разделы, составляющие гидрогазодинамический цикл механики сплошных сред: гидростатика, кинематика, динамика несжимаемой и сжимаемой идеальной жидкости, ударно-волновые процессы в газах, течения с подводом тепла, основы теории подобия и анализа размерностей, течения вязкой ньютоновской жидкости. При этом многие из них содержат серьёзные обобщения известных положений, а также новые, более эффективные подходы к рассмотрению и анализу описываемых физических явлений и процессов, не встречающиеся в учебной литературе по данной тематике.

Пособие подготовлено в соответствии с инновационной образовательной программой «Наукоёмкие технологии и экономика инноваций» (раздел «Разработка и изготовление методического обеспечения по циклам общепрофессиональных и специальных дисциплин»).

Рекомендуется на стадии бакалаврской подготовки студентов вузов и факультетов аэрокосмического направления, где механика жидкости и газа относится к профилирующим предметам, а также для вузов, в которых эта дисциплина является общеобразовательной.

УДК 532 (075.8)
ББК 22.253.3я.73

ISBN 5-74117-0184-1

© Широков Н.Н., Вознесенский Э.Н., 2007
© Московский физико-технический институт
(государственный университет), 2007

Оглавление

Предисловие.....	6
Глава 1. Гидростатика.....	8
§ 1.1. Исходные понятия и соотношения.....	8
§ 1.2. Основное уравнение гидростатики.....	11
§ 1.3. Равновесие тяжелой несжимаемой жидкости. Сообщающиеся сосуды.....	13
§ 1.4. Равновесие весомого газа. Барометрическая формула.....	15
§ 1.5. Равновесие при наличии негравитационных сил ...	17
§ 1.6. Давление жидкости на плоские и криволинейные стенки.....	20
§ 1.7. Закон Архимеда. Плавание тел.....	25
Глава 2. Элементы кинематики жидкости. Уравнения движения идеальной жидкости.....	28
§ 2.1. Модели жидкости.....	28
§ 2.2. Основные элементы движения жидкости.....	30
§ 2.3. Уравнение неразрывности.....	34
§ 2.4. Уравнения движения идеальной жидкости.....	36
§ 2.5. Вихрь вектора скорости. Потенциал вектора скорости.....	42
§ 2.6. Уравнения Эйлера в форме Громеки–Лэмба.....	46
§ 2.7. Интеграл Коши–Лагранжа и интеграл Бернулли для стационарного течения.....	47
Список литературы.....	51
Глава 3. Безвихревые течения идеальной несжимаемой жидкости.....	52
§ 3.1. Безвихревое течение жидкости. Потенциал скорости.....	52
§ 3.2. Комплексный потенциал и комплексная скорость.....	55
§ 3.3. Некоторые простейшие потенциальные потоки.....	61
§ 3.4. Поперечное обтекание круглого цилиндра без циркуляции.....	68
§ 3.5. Циркуляционное обтекание цилиндра.....	72
Список литературы.....	78

Глава 4. Начала газовой динамики	79
Введение.....	79
§ 4.1. Уравнения одномерного стационарного течения...	81
§ 4.2. Изменение энтропии в адиабатическом газовом потоке. Механическая форма уравнения энергии.....	86
§ 4.3. Скорость звука.....	89
§ 4.4. Числа M и λ . Безразмерная форма уравнения энергии. Газодинамические функции τ , ε , π	91
§ 4.5. Разгон потока. Функция q	96
§ 4.6. Формулы расхода. Функция y	102
§ 4.7. Сила реакции жидкости. Функция $z(\lambda)$	104
§ 4.8. Определение тяги реактивного двигателя	107
Список литературы	108
Глава 5. Ударные волны (скачки уплотнения)	109
Введение.....	109
§ 5.1. Прямые скачки уплотнения.....	111
§ 5.2. Косые скачки уплотнения.....	121
§ 5.3. Системы скачков уплотнения	137
Список литературы	144
Глава 6. Волны разрежения. Взаимодействие волн сжатия и разрежения	145
Введение.....	145
§ 6.1. Истечение сжимаемых и несжимаемых жидкостей через отверстия.....	151
§ 6.2. Течение Прандтля–Майера.....	157
§ 6.3. Одномерные неустановившиеся течения газа. Ударная труба	170
§ 6.4. Взаимодействие волн разрежения и сжатия	182
Список литературы	190
Глава 7. Течение жидкости с подводом тепла	191
Введение.....	191
§ 7.1. Основные закономерности стационарного течения жидкости с теплоподводом	192
§ 7.2. Теплоподвод в ударных волнах	203
§ 7.3. Детонационные волны	209

§ 7.4. Скачки конденсации.....	213
§ 7.5. Теплопередача	216
Список литературы	221
Глава 8. О подобии и анализе размерностей.....	222
Введение.....	222
§ 8.1. Постановка задачи.....	227
§ 8.2. Обобщенные (безразмерные) переменные.....	229
§ 8.3. Подобие	241
§ 8.4. Анализ размерностей	244
Список литературы	255
Глава 9. Течения вязкой жидкости	256
Введение.....	256
§ 9.1. Течение в трубах.....	258
§ 9.2. Закон трения Стокса.....	272
§ 9.3. Уравнения Навье–Стокса	281
§ 9.4. Ламинарный пограничный слой в несжимаемой жидкости	289
§ 9.5. Краткие сведения о турбулентности и турбулентных течениях	304
§ 9.6. Особенности течения вязкой сжимаемой жидкости	311
§ 9.7. Осреднение параметров неравномерного потока	316
Список литературы	320
Основные обозначения	321

Предисловие

Курс «Введение в механику сплошных сред», три четверти объема которого составляет «Введение в механику жидкости и газа», уже в течение нескольких лет преподается в МФТИ на факультете аэрофизики и космических исследований (ФАКИ) студентам 2-го года обучения. Все это время курс развивался, модернизировался и совершенствовался. Был подготовлен и выпущен цикл учебно-методических пособий по всем основным темам гидрогазодинамической составляющей курса. По завершении этой работы закономерно встал вопрос о сведении изданных тематических выпусков в отдельную книгу, результатом чего и является настоящее учебное пособие. Оно не претендует на полноту (о чем уже говорит само название), но содержит основные классические разделы курса гидромеханики. Это – гидростатика, кинематика, динамика несжимаемой и сжимаемой идеальной жидкости, включая адиабатические течения идеального газа с ударными волнами и волнами расширения, течения с подводом тепла, теория подобия и анализ размерностей, течения вязкой ньютоновской жидкости. Во многих разделах пособия продемонстрированы новые, более эффективные подходы к рассмотрению и анализу описываемых физических явлений и процессов, а также приведены серьезные обобщения некоторых известных положений, не встречающиеся в учебной литературе.

Авторы стремились дать в меру строгое, но адаптированное к уровню математической подготовки студентов 2-го курса МФТИ изложение материала. Здесь следует заметить, что общая педагогическая вузовская практика предусматривает введение подобной дисциплины не ранее 3-го курса.

Основная задача и направленность данного пособия, по мнению авторов, – это формирование у студентов базовых знаний в области механики жидкости и газа и подготовка их тем самым к восприятию более сложных в теоретическом отношении дисциплин, занимающихся изучением движения

таких сред. Мы надеемся также, что книга окажется полезной читателям, просто желающим приобрести необходимый минимум компетентности в вопросах гидро-аэромеханики.

В подготовке пособия на разных этапах, в разной форме и в разное время принимали участие сотрудники ФАКИ Н.В. Короткова, В.Я. Миронова, а также студенты ФАКИ С.В. Булдаков, Д.А. Юрьев, С.А. Дегтярёв, А.А. Пономарёв, за что мы им глубоко признательны.

Особую благодарность авторы выражают студентам первого года магистратуры ФАКИ Дегтяреву Сергею и Пономареву Александру, отважно взявшим на себя в полном объеме нелегкий и специфический для них труд компьютерной верстки учебного пособия и доведения его до “товарного” вида. В ходе работы у них, хотя и нечасто, но вполне естественно, возникали вопросы, когда требовалось взаимное согласование тех или иных технических деталей оформления пособия. Но, что для нас, пожалуй, более ценно и важно, по их инициативе неоднократно происходили совместные полезные содержательные обсуждения по существу излагаемого материала, разумеется, с последующим учетом выработанных сообща изменений и уточнений в тексте пособия. Несомненно, опыт и навыки, приобретенные С. Дегтяревым и А. Пономаревым за время подготовки пособия (при этом они прекрасно учатся и успешно участвуют в серьезных научных исследованиях), не раз пригодятся им в дальнейшем при работе над собственными публикациями.