

**Е.П.Валуева
В.Г.Свиридов**



**ВВЕДЕНИЕ
В МЕХАНИКУ ЖИДКОСТИ**



Е.П.Валуева, В.Г.Свиридов

ВВЕДЕНИЕ В МЕХАНИКУ ЖИДКОСТИ

Допущено Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов вузов,
обучающихся по направлениям подготовки
“Ядерная энергетика и теплофизика”
и “Теплоэнергетика и теплотехника”

Третье издание, переработанное и дополненное



Москва

Издательский дом МЭИ

2022

УДК 532(075.8)
ББК 22.253я73
В 158

Рецензенты: доктор техн. наук, проф. В.В. Рыбаков
[кафедра теории воздушно-реактивных двигателей МАИ (НИУ)];
академик РАН А.И. Леонтьев

Валуева Е.П.

В 158 Введение в механику жидкости : учебное пособие для вузов .
Е.П. Валуева, В.Г. Свиридов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.
Издательский дом МЭИ, 2022. 227 с. : ил.

ISBN 978-5-383-01566-7

В учебном пособии изложены основы механики жидкости: кинематики, гидростатики и динамики. Представлены важные для практики задачи течения идеальной и вязкой жидкости. Достаточно подробно рассматриваются вопросы турбулентных течений.

Предыдущее, 2-е издание вышло в Издательском доме МЭИ в 2007 г.

Книга рассчитана на студентов и аспирантов теплофизических и теплоэнергетических специальностей, а также на специалистов, работающих в области технической гидромеханики и конвективного теплообмена.

УДК 532(075.8)
ББК 22.253я7.

ISBN 978-5-383-01566-7

© Валуева Е.П., Свиридов В.Г., 2022.
© АО «Издательский дом МЭИ», 2022.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Введение.....	10
В.1. Место механики жидкости и газа в науке о движении материальных тел	10
В.2. Предмет механики жидкости и газа	12
В.3. Метод механики жидкости и газа. Основные особенности феноменологического метода	14
В.4. Классификация моделей жидкости в механике жидкости и газа.....	16
В.4.1. Модели сжимаемой и несжимаемой жидкости	16
В.4.2. Модели идеальной и вязкой жидкости.....	17
<i>Глава первая. КИНЕМАТИКА ЖИДКОСТИ</i>	18
1.1. Способы описания движения среды. Методы Лагранжа и Эйлера	18
1.1.1. Метод Лагранжа.....	18
1.1.2. Метод Эйлера	19
1.1.3. Траектории частиц и линии тока	20
1.1.4. Струи и трубки тока	23
1.2. Поступательное, вращательное и деформационное движение жидкой частицы.....	24
1.2.1. Виды движения жидких частиц.....	24
1.2.2. Вращательное движение	26
1.2.3. Деформационное движение. Первая теорема Гельмгольца.....	28
1.3. Кинематика вихревого и безвихревого течений.....	29
1.3.1. Определения вихревого и безвихревого движений	29
1.3.2. Вихревое движение. Вихревые линии и трубки. Вторая теорема Гельмгольца	30
1.3.3. Безвихревое (потенциальное) движение. Потенциал скорости	32
1.4. Субстанциональная (полная) производная.....	34
<i>Глава вторая. УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ</i>	37
2.1. Уравнение неразрывности	37
2.2. Уравнение движения	39
2.2.1. Силы, действующие в жидкости	39
2.2.2. Уравнение движения в напряжениях	40
<i>Глава третья. ГИДРОСТАТИКА</i>	43
3.1. Предмет гидростатики. Абсолютное и относительное равновесие.....	43
3.2. Закон Паскаля	45

3.3.	Абсолютное равновесие жидкости.....	46
3.3.1.	Условия абсолютного равновесия	46
3.3.2.	Абсолютное равновесие в поле силы тяжести	48
3.3.3.	Закон Архимеда. Давление жидкости на замкнутую твердую поверхность.....	49
3.3.4.	Устойчивое и неустойчивое абсолютное равновесие в поле силы тяжести.....	50
3.4.	Относительное равновесие. Условия относительного равновесия	51
<i>Глава четвертая. ДИНАМИКА ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ</i>		53
4.1.	Особенности идеальной жидкости.....	53
4.2.	Уравнения динамики идеальной жидкости	54
4.2.1.	Система уравнений движения в форме Эйлера.....	54
4.2.2.	Условия однозначности в задачах течения идеальной жидкости .	56
4.3.	Уравнения движения в форме Громеки—Лэмба	58
4.4.	Стационарное течение идеальной несжимаемой жидкости в поле силы тяжести. Теорема Бернулли.....	59
4.5.	Примеры практического использования теоремы Бернулли.....	60
4.5.1.	Анализ течений жидкостей	60
4.5.2.	Расходомер типа «труба Вентури»	61
4.5.3.	Трубка Пито — прибор для измерения скорости потока.....	64
4.6.	Движение идеальной сжимаемой жидкости.....	65
4.6.1.	Обобщенная теорема Бернулли	65
4.6.2.	Критерий сжимаемости.....	66
<i>Глава пятая. ПЛОСКОЕ СТАЦИОНАРНОЕ БЕЗВИХРЕВОЕ ДВИЖЕНИЕ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ</i>		69
5.1.	Определение и особенности плоского движения.....	69
5.2.	Метод суперпозиции	72
5.2.1.	Сущность метода	72
5.2.2.	Потенциалы и функции тока для некоторых простых потоков.....	72
5.2.3.	Плоский диполь — пример суперпозиции	76
5.3.	Поперечное обтекание круглого цилиндра поступательным потоком....	77
5.3.1.	Наложение поступательного потока на плоский диполь.....	77
5.3.2.	Распределение скорости по поверхности цилиндра	80
5.3.3.	Распределение давления по поверхности цилиндра.....	80
5.3.4.	Парадокс Даламбера.....	82
5.4.	Поперечное обтекание с циркуляцией.....	83
5.4.1.	Обтекание круглого цилиндра	83
5.4.2.	Обтекание крылового профиля. Подъемная сила крыла. Постулат Чаплыгина— Жуковского	87
<i>Глава шестая. ДИНАМИКА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ</i>		89
6.1.	Особенности описания движения вязкой жидкости	89
6.2.	Обобщенный закон Ньютона	89
6.3.	Уравнения Навье—Стокса	92

6.3.1.	Уравнения динамики вязкой сжимаемой жидкости с переменными свойствами	92
6.3.2.	Уравнения динамики вязкой несжимаемой жидкости с постоянными свойствами	94
6.4.	Подобие течений вязкой несжимаемой жидкости	96
6.4.1.	Сущность теории подобия	96
6.4.2.	Безразмерная форма уравнений динамики вязкой несжимаемой жидкости с постоянными свойствами.....	97
6.4.3.	Условия подобия	101
6.5.	Гидравлическое сопротивление при течении вязкой жидкости	102
<i>Глава седьмая. ЛАМИНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ПОСТОЯННЫМИ СВОЙСТВАМИ</i>		
7.1.	Течение Куэтта.....	105
7.2.	Ламинарное стационарное течение в круглой трубе	107
7.2.1.	Понятие гидродинамической стабилизации.....	107
7.2.2.	Стабилизированное течение в круглой трубе.....	109
7.2.3.	Течение на начальном гидродинамическом участке.....	112
7.2.4.	Коэффициент гидравлического сопротивления при ламинарном течении жидкости в трубе	115
7.3.	Ламинарный пограничный слой.....	117
7.3.1.	Понятие пограничного слоя.....	117
7.3.2.	Уравнения пограничного слоя	118
7.3.3.	Продольное обтекание тонкой полубесконечной пластины (задача Блазиуса)	122
7.3.4.	Пограничный слой при наличии продольного градиента давления. Отрыв пограничного слоя.....	127
<i>Глава восьмая. ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ПОСТОЯННЫМИ СВОЙСТВАМИ</i>		
8.1.	Определение турбулентности	132
8.2.	Потеря устойчивости и переход от ламинарного течения к турбулентному	136
8.2.1.	Переход от ламинарного течения к турбулентному в трубах.....	136
8.2.2.	Переход в пограничном слое на плоской пластине.....	142
8.3.	Элементы теории устойчивости	145
8.3.1.	Энергетический метод.....	145
8.3.2.	Метод малых возмущений	147
8.4.	Уравнения Рейнольдса — осредненные уравнения турбулентного движения	149
8.4.1.	Статистический подход к описанию турбулентных течений	149
8.4.2.	Уравнения динамики для осредненных величин	154
8.4.3.	<i>Турбулентная вязкость. Гипотеза Прандтля о длине пути перемешивания</i>	156
8.5.	Стационарное гидродинамически стабилизированное турбулентное течение в круглой трубе жидкости с постоянными свойствами	160
8.5.1.	Касательные напряжения в потоке	160

8.5.2	Профиль осредненной скорости.....	162
8.5.3.	Практические расчеты профиля скорости и коэффициента сопротивления	166
8.5.4.	Коэффициент гидравлического сопротивления	171
8.6.	Важнейшие статистические характеристики турбулентности.....	174
8.6.1.	Математическое ожидание.....	174
8.6.2.	Дисперсия и интенсивность турбулентных пульсаций.....	175
8.6.3.	Корреляционные функции пульсаций.....	176
8.6.4.	Энергетический спектр стационарного случайного процесса.....	179
8.6.5.	Тензор пространственных корреляций турбулентного поля скорости.....	180
8.7.	Анализ турбулентных течений методами энергетического баланса	181
8.7.1.	Баланс полной энергии турбулентности	181
8.7.2.	Баланс энергии осредненного движения	185
8.7.3.	Баланс энергии пульсационного движения	186
<i>Глава девятая. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ.....</i>		<i>192</i>
9.1.	Моделирование напряжений Рейнольдса.....	192
9.1.1.	Концепция турбулентной вязкости	192
9.1.2.	Уравнения динамики напряжений Рейнольдса.....	198
9.2.	Прямое численное моделирование	200
9.3.	Моделирование крупных вихрей	205
9.4.	Гибридные методы	207
<i>Приложение. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕНЗОРНОЙ АЛГЕБРЫ.....</i>		<i>211</i>
П.1.	Скаляры, векторы, тензоры.....	211
П.2.	Обобщение понятия тензор	214
П.3.	Некоторые свойства тензоров второго ранга.....	216
П.4.	Операции с векторами в тензорной алгебре.....	220
П.5.	Векторные тождества в тензорной алгебре	222
Список литературы.....		224