
А.Е.Зарянкин

МЕХАНИКА
НЕСЖИМАЕМЫХ
И СЖИМАЕМЫХ
ЖИДКОСТЕЙ

Учебник для вузов



Издательский дом МЭИ

А.Е.Зарянкин

Механика несжимаемых и сжимаемых жидкостей

Учебник для вузов

*Допущено УМО вузов России по образованию
в области энергетики и электротехники
в качестве учебника для студентов,
обучающихся по направлениям подготовки
"Энергетическое машиностроение"
и "Теплоэнергетика и теплотехника"*

3-е издание, стереотипное

Москва
Издательский дом МЭИ
2022

УДК 532.5 (075.8)
ББК 22.253.3я73
З-365

Рецензенты:

доктор техн. наук, проф. **Б.А. Габараев** (ОАО «НИКИЭТ»);
доктор техн. наук, проф. **А.И. Трофимов** (НАТЭ НИЯТ МИФИ);
зав кафедрой «Тепловые электрические станции»,
доктор техн. наук **Е.В. Барочкин**
(Ивановский государственный энергетический университет);
зав. кафедрой «Тепловые двигатели и теплофизика»,
канд. техн. наук **А.А. Жинов**
(Калужский филиал МГТУ им. Баумана)

Зарянкин А.Е.

З-365 **Механика несжимаемых и сжимаемых жидкостей: учебник для вузов / А.Е. Зарянкин.** — 3-е изд., стер. — М.: Издательский дом МЭИ, 2022. — 590 с.: ил.

ISBN 978-5-383-01539-1

Книга является учебником по одноименному курсу, читаемому для студентов, обучающихся по энергомашиностроительным и теплотехническим специальностям технических университетов, и в максимальной степени соответствует учебной программе указанного курса.

Содержит основные сведения по течению идеальных несжимаемых и сжимаемых жидкостей, несжимаемой вязкой жидкости, потенциальным, вихревым и сверхзвуковым течениям. Большое внимание уделяется вопросам пограничного слоя, турбулентности, течению в трубах, соплах и непрофилированных отверстиях, течению рабочих сред в диффузорах и решетках профилей турбомашин, а также рассматриваются некоторые прикладные задачи, включая задачи о течении двухфазных и двухкомпонентных сред.

Учебник предназначен для студентов энергомашиностроительных и теплотехнических специальностей энергетических и политехнических университетов и может быть полезен для инженерных и научных работников исследовательских лабораторий и конструкторских бюро энергомашиностроительных заводов.

Предыдущее издание учебника выпущено в 2019 году.

УДК 532.5 (075.8)
ББК 22.253.3я73

ISBN 978-5-383-01539-1

© Зарянкин А.Е., 2022
© АО «Издательский дом МЭИ», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	8
Введение	9
Глава 1. Основные понятия и определения механики несжимаемых и сжимаемых жидкостей	17
1.1. Предмет механики несжимаемых и сжимаемых жидкостей и свойства текущих сред	17
1.2. Классификация сил, действующих в жидкости, и их определение	19
1.2.1. Напряжения поверхностных сил	19
1.2.2. Напряжения массовых сил	22
1.3. Параметры потока жидкой среды	23
1.4. Некоторые термодинамические соотношения для газовых сред	25
1.5. Скорость звука	29
1.6. Классификация движений жидкости	31
1.7. Вязкость в жидких средах	32
Вопросы для самоконтроля	36
Глава 2. Элементы кинематики жидкости	37
2.1. Методы изучения движения жидкости	37
2.2. Деформация жидких элементов и вращательное движение в жидкости	40
2.3. Скорость относительной объемной деформации жидкого элемента	45
2.4. Линия тока и вихревая линия	46
2.5. Трубка тока и вихревая трубка	49
2.6. Циркуляция скорости	50
Вопросы для самоконтроля	51
Глава 3. Основные уравнения механики несжимаемых и сжимаемых жидкостей	52
3.1. Уравнение неразрывности	52
3.2. Уравнения движения идеальной жидкости	55
3.3. Интегралы уравнений движения идеальной жидкости	59
3.4. Уравнение сохранения энергии	63
Вопросы для самоконтроля	68
Глава 4. Элементы гидростатики	70
4.1. Основные уравнения гидростатики	70
4.2. Равновесие жидкости в сообщающихся сосудах	71
4.3. Относительное равновесие жидкости	73
4.4. Силы давления жидкости на твердые стенки	76
4.5. Равновесие сжимаемой жидкости (газа)	79
Вопросы для самоконтроля	81
Глава 5. Одномерное движение жидкости	83
5.1. Основные уравнения одномерных течений	83
5.1.1. Уравнение неразрывности	83
5.1.2. Уравнение сохранения количества движения	84
5.1.3. Уравнение сохранения энергии	85
5.2. Максимальная и критическая скорости в газовых и паровых потоках	88
5.3. Безразмерные скорости потока M и λ	90

5.4. Связь безразмерных параметров потока с безразмерными скоростями M и λ	92
5.5. Распределение параметров потока и скоростей вдоль канала произвольной формы при различных внешних воздействиях	94
5.6. Удельный расход и приведенный удельный расход жидкости	103
5.7. Газодинамические функции одномерного газового потока	106
5.8. Способы приведения плоских и трехмерных потоков к одномерной схеме течения	110
Вопросы для самоконтроля	117
Глава 6. Плоские дозвуковые течения идеальной жидкости	118
6.1. Потенциальные течения жидкости	118
6.2. Примеры простейших потенциальных течений	124
6.2.1. Плоскопараллельное течение	124
6.2.2. Течение внутри прямого угла	126
6.2.3. Течение вдоль двух бесконечных пересекающихся плоскостей	127
6.2.4. Источник и сток	128
6.2.5. Циркуляционное течение	130
6.2.6. Диполь	132
6.3. Примеры сложения потенциальных течений	133
6.3.1. Вихреисточник и вихресток	133
6.3.2. Обтекание потенциальным потоком идеальной жидкости криволинейного полутела	134
6.3.3. Поперечное обтекание круглого цилиндра плоскопараллельным потоком	136
6.3.4. Поперечное обтекание круглого цилиндра плоскопараллельным потоком при наличии циркуляционного течения	141
6.4. Теорема Н.Е. Жуковского о подъемной силе	143
6.5. Потенциальное течение идеальной сжимаемой жидкости	147
6.6. Линеаризованное уравнение для потенциала скорости сжимаемой жидкости	149
Вопросы для самоконтроля	154
Глава 7. Вихревые течения жидкостей	156
7.1. Некоторые общие понятия о вихревых течениях	156
7.2. Основные теоремы вихревого течения идеальной жидкости	158
7.2.1. Теорема Стокса	158
7.2.2. Теорема Томсона	160
7.2.3. Теоремы Гельмгольца о вихревом движении	161
7.3. Особенности течения жидкости внутри вихревой трубки и за ее пределами	163
7.4. Скорости, индуцируемые элементами вихревых трубок, произвольно расположенными в пространстве	169
7.5. Расчет течения идеальной жидкости в плоском диффузоре при наличии в его проточной части плоского вихря	173
Вопросы для самоконтроля	180
Глава 8. Плоские сверхзвуковые течения	181
8.1. Особенности сверхзвуковых течений	181
8.2. Линии возмущения и характеристики в сверхзвуковом потоке	182
8.3. Уравнение характеристик в плоскости годографа скорости	186
8.4. Диаграмма характеристик	190
8.5. Расчет центрированных волн разрежения	193

8.6. Отражение, пересечение и гашение волн разрежения.....	196
8.7. Профилированное сопло Лавала.....	200
8.8. Возникновение скачков уплотнения в сверхзвуковом потоке.....	201
8.9. Основные соотношения для расчета параметров потока и скоростей при переходе через плоские косые скачки уплотнения.....	202
8.10. Ударная поляра и диаграмма ударных поляр.....	205
8.11. Отражение и пересечение скачков уплотнения.....	210
8.12. Потери энергии в скачках уплотнения.....	214
8.13. Номограмма для расчета скачков уплотнения.....	217
8.14. Тепловые скачки.....	219
Вопросы для самоконтроля.....	226
Глава 9. Истечение сжимаемой жидкости (газообразных и паровых сред) из сопл и непрофилированных отверстий.....	228
9.1. Истечение сред из суживающихся сопл.....	228
9.2. Переменные режимы истечения из суживающихся сопл. Сетка расходов.....	233
9.3. Примеры использования сетки расходов для расчета переменных режимов суживающихся сопл.....	236
9.4. Истечение из расширяющихся сопл и их диаграмма режимов.....	237
9.5. Истечение из отверстий и щелей с острой кромкой.....	244
9.6. Лабиринтовые уплотнения и их расчет.....	249
Вопросы для самоконтроля.....	252
Глава 10. Основы физического моделирования.....	254
10.1. Значение и задачи физического моделирования.....	254
10.2. Размерные и безразмерные величины.....	255
10.3. П-теорема.....	258
10.4. Примеры практического использования П-теоремы.....	261
10.4.1. Уравнение расхода жидкости через поперечное сечение канала.....	261
10.4.2. Расчет гидравлического сопротивления в трубах произвольного поперечного сечения.....	262
10.4.3. Сопротивление тела, движущегося в жидкости.....	265
10.4.4. Форма свободной поверхности жидкости, находящейся во вращающемся цилиндрическом сосуде.....	267
10.5. Критерии подобия и моделирование течений жидкости.....	269
10.6. Частичное моделирование течений.....	271
Вопросы для самоконтроля.....	274
Глава 11. Движение вязкой жидкости.....	276
11.1. Уравнение движения вязкой жидкости (уравнение Навье—Стокса).....	276
11.2. Примеры точных решений уравнений Навье—Стокса.....	285
11.2.1. Движение жидкости между двумя бесконечными параллельными плоскостями.....	287
11.2.2. Течение Куэтта.....	288
11.2.3. Движение жидкости в трубах.....	289
11.2.4. Движение жидкости между соосными цилиндрами.....	293
11.2.5. Течение смазки под колодкой подшипника скольжения.....	294
Вопросы для самоконтроля.....	299
Глава 12. Пограничный слой.....	300
12.1. Основные понятия о пограничном слое.....	300
12.2. Интегральные толщины пограничного слоя.....	301
12.2.1. Толщина вытеснения.....	302

12.2.2. Толщина потери импульса	304
12.2.3. Толщина потери энергии	306
12.3. Уравнение Прандтля для пограничного слоя	308
12.4. Уравнение Кармана для пограничного слоя	312
12.5. Переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный	317
12.6. Основные характеристики турбулентных течений	326
12.7. Уравнения движения для турбулентных течений (уравнения Рейнольдса)....	332
12.8. Логарифмический профиль скорости	338
12.9. Расчет пограничного слоя при безградиентном течении	343
12.9.1. Расчет ламинарного пограничного слоя.....	344
12.9.2. Расчет турбулентного пограничного слоя.....	347
12.10. Расчет пограничного слоя в общем случае	351
12.11. Отрыв пограничного слоя	357
12.12. Сопротивление тел, обтекаемых вязкой жидкостью.....	371
Вопросы для самоконтроля.....	375
Глава 13. Движение жидкости в трубах и трубопроводах	376
13.1. Движение несжимаемой жидкости в трубах и коэффициент сопротивления труб.....	376
13.2. Движение сжимаемой жидкости в трубах с трением.....	385
13.3. Местные сопротивления	394
13.3.1. Поворотные колена	394
13.3.2. Внезапное расширение потока	399
13.3.3. Внезапное сужение потока	402
13.3.4. Слияние и разделение потоков	404
13.4. Элементы расчета сложных трубопроводов.....	406
Вопросы для самоконтроля.....	409
Глава 14. Движение жидкости в диффузорах	410
14.1. Классификация диффузоров и их геометрические параметры	410
14.2. Процесс торможения потока в диффузорах в h, s -диаграмме и их аэродинамические характеристики	413
14.3. Экспериментальная и расчетная оценки аэродинамических характеристик диффузоров.....	416
14.4. Полуэмпирический метод расчета диффузоров	426
14.5. Влияние режимных параметров на характеристики диффузоров.....	430
14.5.1. Влияние числа Рейнольдса	430
14.5.2. Влияние безразмерных входных скоростей $\lambda_1(M_1)$ на аэродинамические характеристики диффузоров.....	432
14.6. Влияние геометрических параметров на характеристики диффузоров	435
14.6.1. Влияние угла раскрытия α	435
14.6.2. Влияние угла раскрытия плоских диффузоров на статические и динамические нагрузки, действующие на их стенки.....	438
14.6.3. Влияние степени расширения диффузоров.....	441
14.7. Методы повышения эффективности диффузорных каналов.....	443
14.8. Некоторые примеры практического использования диффузоров в турбомашинах	454
14.8.1. Конические диффузорные седла в регулирующих клапанах паровых турбин	454
14.8.2. Диффузоры в выхлопных патрубках паровых и газовых турбин.....	465
Вопросы для самоконтроля.....	474
Глава 15. Решетки профилей для ступеней паровых и газовых турбин.....	475
15.1. Ступень турбины и преобразование энергии в этой ступени	475

15.2. Определение усилий, действующих на рабочие лопатки турбинной ступени и ее мощность	478
15.3. Коэффициент полезного действия турбинной ступени	483
15.4. Связь коэффициентов потерь энергии в сопловых и рабочих решетках профилей с коэффициентами скорости φ и ψ	486
15.5. Классификация решеток профилей, используемых в турбинных ступенях ...	488
15.6. Потери на трение и коэффициент потерь на трение в решетках профилей турбинной ступени.....	492
15.7. Кромочные потери энергии	494
15.8. Концевые потери энергии в турбинных решетках профилей	502
15.8.1. Физическая картина течения в решетках профилей конечной длины	502
15.8.2. Полуэмпирический метод расчета концевых потерь энергии	505
15.9. Влияние геометрических и режимных параметров на коэффициенты потерь в турбинных решетках профилей	511
15.9.1. Влияние относительного шага \bar{t} решетки профилей на коэффициент профильных потерь энергии.....	511
15.9.2. Влияние относительной длины решетки профилей на коэффициент потерь энергии.....	514
15.9.3. Влияние угла установки профиля β_y в решетке на коэффициент профильных потерь энергии.....	517
15.9.4. Влияние режимных параметров на характеристики турбинных решеток профилей	518
15.10. Некоторые способы снижения профильных и концевых потерь энергии в решетках профилей	528
15.10.1. Пути снижения профильных потерь энергии	528
15.10.2. Пути снижения концевых потерь энергии	531
Вопросы для самоконтроля.....	536
Глава 16. Элементы двухфазных и двухкомпонентных течений	537
16.1. Основные понятия и определения.....	537
16.2. Двухфазное течение пара при фазовом равновесии	540
16.3. Течение смеси жидкости с газовыми пузырьками	544
16.4. Скорость звука в жидкости, содержащей пузырьки газа	549
16.5. Скачки конденсации	550
16.6. Разгон капель влаги в одномерном потоке.....	555
16.7. Течение насыщенного и влажного пара в соплах паровых турбин	557
16.8. Влияние начальной влажности пара на характер течения в конических диффузорах (расширяющихся соплах)	562
Вопросы для самоконтроля.....	570
Приложение	571
Список литературы.....	589