
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
ТЕПЛОТЕХНИКИ
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ
ЭКСПЕРИМЕНТ**

СПРАВОЧНИК



Книга вторая

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ТЕПЛОТЕХНИКИ
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ
ЭКСПЕРИМЕНТ**

СПРАВОЧНИК

Под общей редакцией
А.В. КЛИМЕНКО и В.М. ЗОРИНА



Издательский дом МЭИ
Москва
2022

УДК 621.1. (083)

ББК 31.3я21

Т 338

Рецензенты: Л.И. Зайчик (разд. 1), А.Д. Козлов (разд. 2), Г.А. Дрейцер (разд. 3), Н.Н. Шипков (разд. 4), М.С. Васюков и Э.В. Голиков (разд. 5), С.А. Ковалев (разд. 6), Д.Н. Каган (разд. 7), В.И. Ковалев (разд. 8), С.П. Малышенко (разд. 9)

Авторы: А.А. Александров, Б.С. Белосельский, А.Г. Вайнштейн, Ю.А. Выскубенко, Л.Г. Генин, В.П. Горбатов, К.А. Гордин, Б.Т. Емцев, Г.М. Иванова, В.А. Ипполитов, Б.И. Казанджан, А.В. Клименко, Н.В. Коровин, Н.Д. Кузнецов, Д.А. Лабунцов, В.Н. Леньшин, В.М. Масленников, В.В. Махров, В.И. Мика, В.И. Мирошниченко, В.С. Охотин, В.С. Протопопов, В.Г. Свиридов, А.П. Севастьянов, Н.Н. Семашко, Ю.Б. Смирнов, Р.И. Созиев, С.Т. Суржиков, В.В. Сычев, Г.Ф. Филаретов, Э.Э. Шпильрайн, А.П. Шурыгин, Г.Д. Юшина, В.В. Ягов

Т 338 **Теплоэнергетика и теплотехника** : Справочная серия: В 4 кн. / под общ. ред. чл.-кор. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. — 5-е изд., стереот. — М.: Издательский дом МЭИ, 2022.

ISBN 978-5-383-01544-5

Кн. 2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник. — 562 с.; ил.

ISBN 978-5-383-01546-9

Предлагаемый справочник — пятое издание книги 2 справочной серии «Теплоэнергетика и теплотехника» — содержит сведения по механике жидкости и газа и тепло- и массообмену в различных системах, процессам горения топлив. Описаны современные средства теплотехнических измерений и автоматизации экспериментов, методы экспериментального исследования процессов тепло- и массообмена, теплофизических свойств веществ. Представлены современные нетрадиционные способы преобразования энергии.

Предыдущее издание справочника вышло в Издательском доме МЭИ в 2007 году.

Для инженеров-теплотехников и теплоэнергетиков, работающих на электростанциях и промышленных предприятиях различных отраслей хозяйства страны, а также для научных работников и студентов вузов соответствующих специальностей.

УДК 621.1. (083)

ББК 31.3я21

ISBN 978-5-383-01546-9 (кн. 2)

© Авторы, 2022

ISBN 978-5-383-01544-5

© АО «Издательский дом МЭИ», 2022

СОДЕРЖАНИЕ КНИГ СПРАВОЧНОЙ СЕРИИ «ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА»

КНИГА ПЕРВАЯ

Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы

- Раздел 1. Энергетика и электрификация
- Раздел 2. Единицы физических величин
- Раздел 3. Основные правила оформления конструкторской документации
- Раздел 4. Основные сведения по математике
- Раздел 5. Численные методы, алгоритмы и программные средства для инженерных расчетов
- Раздел 6. Основные сведения по физике
- Раздел 7. Физико-химические свойства и технологии растворов
- Раздел 8. Конструкционные материалы теплотехники
- Раздел 9. Расчет на прочность элементов конструкций теплотехнического оборудования
- Раздел 10. Экономика теплоэнергетики и теплотехники
- Раздел 11. Охрана труда в теплоэнергетике и теплотехнике

КНИГА ВТОРАЯ

Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент

- Раздел 1. Механика жидкости и газа
- Раздел 2. Термодинамика
- Раздел 3. Основы тепло- и массообмена
- Раздел 4. Основы теории и расчета процессов горения, газификации и пиролиза топлива
- Раздел 5. Теплотехнические измерения
- Раздел 6. Методы экспериментального изучения процессов тепло- и массообмена
- Раздел 7. Экспериментальные методы определения теплофизических свойств веществ
- Раздел 8. Автоматизация теплофизического эксперимента
- Раздел 9. Нетрадиционная энергетика

КНИГА ТРЕТЬЯ

Тепловые и атомные электрические станции

- Раздел 1. Паровые котлы
- Раздел 2. Реакторы и парогенераторы АЭС
- Раздел 3. Паротурбинные установки
- Раздел 4. Газотурбинные и парогазовые установки
- Раздел 5. Насосы и газодувные машины
- Раздел 6. Технологические системы и компоновки ТЭС и АЭС
- Раздел 7. Водный режим, химический контроль и обработка воды на электростанциях
- Раздел 8. Электрические машины и трансформаторы

КНИГА ЧЕТВЕРТАЯ

Промышленная теплотехника

- Раздел 1. Энергосбережение
- Раздел 2. Высокотемпературные теплотехнологические установки
- Раздел 3. Электротермические установки
- Раздел 4. Промышленные тепло- и массообменные аппараты и установки
- Раздел 5. Холодильные и криогенные установки
- Раздел 6. Системы теплоэнергоснабжения промышленных предприятий
- Раздел 7. Автоматизированное управление теплотехническими объектами
- Раздел 8. Энергетика и экология

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
-----------------------	---

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

1.1. Основные физические свойства жидкостей и газов	11
1.2. Кинематика жидкой среды	12
1.3. Напряженное состояние жидкой среды	14
1.4. Статика жидкостей и газов	15
1.5. Общие уравнения динамики жидкостей и газов	17
1.5.1. Уравнения движения вязких жидкостей и газов	17
1.5.2. Уравнения движения идеальных (не вязких) жидкостей и газов	19
1.5.3. Уравнения импульса, момента импульса и энергии	20
1.5.4. Основы теории подобия гидромеханических процессов	21
1.6. Одномерное течение вязкой жидкости	22
1.6.1. Уравнение Бернулли для потока несжимаемой жидкости	22
1.6.2. Гидравлические сопротивления	22
1.6.3. Истечение несжимаемой жидкости	29
1.6.4. Гидравлический расчет трубопроводных систем	31
1.6.5. Силовое воздействие потока на твердые поверхности	32
1.6.6. Неустановившееся движение в напорном трубопроводе	33
1.7. Потенциальные течения несжимаемой жидкости	35
1.7.1. Общие свойства потенциальных течений	35
1.7.2. Примеры плоских потенциальных течений	36
1.8. Ламинарные течения несжимаемой жидкости	39
1.8.1. Течения в ограниченных пространствах	39
1.8.2. Ламинарный пограничный слой	40
1.9. Турбулентные течения	44

1.9.1. Турбулентные напряжения и некоторые гипотезы	44
1.9.2. Универсальные законы распределения скоростей	46
1.9.3. Турбулентный пограничный слой	46
1.9.4. Турбулентные струи несжимаемой жидкости	49
1.9.5. Уравнения баланса энергии в турбулентном потоке	50
1.10. Магнитная гидродинамика	52
1.10.1. Система уравнений магнитной гидродинамики	52
1.10.2. Числа подобия магнитной гидродинамики	53
1.10.3. Классификация МГД-течений	54
1.10.4. Течения в продольном магнитном поле	54
1.10.5. Течения в поперечном магнитном поле	56
1.10.6. Течения в компланарном магнитном поле	59
1.10.7. Течения в неравномерном магнитном поле	59
1.11. Одномерные течения газа	60
1.11.1. Основные расчетные зависимости для адиабатного течения невязкого идеального газа	60
1.11.2. Газодинамические функции	61
1.11.3. Изменение параметров одномерного адиабатного потока газа вдоль трубы переменного сечения	62
1.11.4. Прямой скачок уплотнения	63
1.11.5. Истечение газа через сопло	64
1.11.6. Адиабатное течение идеального газа с трением в трубе постоянного сечения	66
1.11.7. Изотермическое течение в трубе	67
1.11.8. Одномерное течение при различных внешних воздействиях	68
1.12. Плоские и осесимметричные течения невязкого газа	68
1.12.1. Общие уравнения потенциального движения баротропной невязкой среды	68

2.6.5. Циклы комбинированных установок	157
2.7. Сложные термодинамические системы	157
2.7.1. Общие закономерности	157
2.7.2. Магнетики в магнитном поле	158
2.7.3. Диэлектрики в электрическом поле	159
2.7.4. Сверхпроводники в магнитном поле	160
2.7.5. Поверхность раздела фаз	161
2.7.6. Газ и жидкость в поле тяготения	162
2.7.7. Излучение в полости	163
2.7.8. Упругие твердые тела	164
2.7.9. Гальванические элементы	164
Список литературы	165

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

ОСНОВЫ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА

3.1. Общие сведения	166	Б. Конвективный теплообмен	202
А. Теплопроводность	166	3.5. Основные определения	202
3.2. Основные положения	166	3.5.1. Коэффициент теплоотдачи. Температурный напор	202
3.2.1. Температурное поле. Тепловой поток	166	3.5.2. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена	203
3.2.2. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Закон Фурье	167	3.5.3. Методы теории подобия	204
3.2.3. Теплопроводность	168	3.5.4. Гидродинамическая аналогия теплообмена	211
3.3. Стационарная теплопроводность	181	3.6. Теплоотдача при течении жидкости (газа) в трубах	213
3.3.1. Теплопроводность однородной стенки при отсутствии внутренних источников теплоты	181	3.6.1. Основные определения	213
3.3.2. Учет зависимости теплопроводности от температуры	181	3.6.2. Ламинарный режим	213
3.3.3. Теплопроводность многослойной стенки	184	3.6.3. Турбулентный режим	219
3.3.4. Коэффициент теплопередачи. Термические сопротивления	185	3.6.4. Теплообмен с жидкометаллическими теплоносителями	222
3.3.5. Теплопроводность стержня (ребра)	189	3.7. Теплоотдача при внешнем обтекании тел	228
3.3.6. Теплопередача через ребренную стенку	189	3.8. Теплоотдача при свободной конвекции	229
3.3.7. Теплопроводность при наличии внутренних источников теплоты	193	3.9. Теплообмен при пленочном течении жидкостей	230
3.4. Нестационарная теплопроводность	194	3.10. Теплообмен при высокой скорости газового потока	231
3.4.1. Классификация процессов	194	В. Конвективный теплообмен при изменении агрегатного состояния	232
3.4.2. Переходные процессы	194	3.11. Теплообмен при кипении жидкостей	232
3.4.3. Регулярный режим охлаждения (нагрева)	199	3.11.1. Классификация процессов кипения	232
3.4.4. Процессы непрерывного нагрева (охлаждения)	200	3.11.2. Кипение в большом объеме	232
3.4.5. Периодические процессы. Тепловые волны в полуограниченном теле	201	3.11.3. Кипение при течении в каналах	238
		3.12. Теплоотдача при конденсации пара	243
		3.12.1. Классификация процессов конденсации	243
		3.12.2. Пленочная конденсация пара	244
		3.12.3. Пленочная конденсация движущегося пара	245
		3.12.4. Капельная конденсация пара	247
		Г. Тепловое излучение	247
		3.13. Общие положения	247
		3.13.1. Основные понятия	247
		3.13.2. Законы теплового излучения	249
		3.14. Теплообмен между телами, разделенными прозрачной средой	252
		3.14.1. Постановка задачи и общий метод расчета	252
		3.14.2. Угловые коэффициенты	253
		3.15. Теплообмен между газом и поверхностью твердого тела	256
		3.15.1. Особенности излучения и поглощения газов	256

3.15.2. Основной закон переноса энергии излучения в излучающе-поглощающей и рассеивающей среде	256
3.15.3. Собственное излучение газового объема	257
3.15.4. Методы расчета теплообмена ..	260
Д. Совместные процессы тепло- и массообмена	261
3.16. Общие сведения	261
3.16.1. Классификация процессов	261
3.16.2. Основные понятия и соотношения	262
3.16.3. Диффузионные потоки. Коэффициент диффузии	262
3.17. Перенос энергии и импульса в бинарной смеси	264
3.17.1. Поток энергии	264
3.17.2. Поток импульса	265
3.18. Система дифференциальных уравнений	266
3.19. Условия совместности на проницаемой межфазной границе	267
3.19.1. Общие понятия	267
3.19.2. Универсальные условия	267
3.19.3. Специальные условия	268
3.19.4. Характерные случаи	269
3.20. Аналогия процессов тепло- и массообмена	270
3.20.1. Умеренная интенсивность массообмена	270
3.20.2. Высокая интенсивность массообмена	272
3.21. Неравновесные эффекты на границе газ—конденсированная среда	274
3.21.1. Непроницаемая поверхность ..	274
3.21.2. Проницаемая поверхность. Испарение и конденсация	275
Список литературы	276

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ, ГАЗИФИКАЦИИ И ПИРОЛИЗА ТОПЛИВА

4.1. Характеристика топлив	280
4.1.1. Основные виды топлив	280
4.1.2. Состав топлив	287
4.1.3. Теплота сгорания топлива	291
4.1.4. Теплофизические свойства топлива	293
4.1.5. Водоугольное топливо	294
4.2. Горение топлива	294
4.2.1. Основные положения	294

4.2.2. Расчет основных показателей процесса полного горения топлива	295
4.2.3. Самовоспламенение и зажигание	298
4.2.4. Процессы распространения пламени	301
4.3. Основы расчета топливосжигающих устройств для котлов малой производительности и промышленных печей	302
4.3.1. Расчет дутьевых горелок	302
4.3.2. Расчет инжекционных горелок	303
4.3.3. Расчет механических центробежных форсунок	305
4.3.4. Расчет пневматических форсунок	306
4.4. Газификация и пиролиз топлив	308
4.4.1. Виды и технологии газификации	308
4.4.2. Химическое равновесие реакций газификации топлива	311
4.4.3. Пиролиз топлива	312
4.5. Образование вредных веществ при горении, газификации и пиролизе топлив	317
4.5.1. Виды вредных веществ	317
4.5.2. Трансформация соединений серы	317
4.5.3. Образование оксидов азота	318
4.5.4. Образование полициклических ароматических углеводородов	322
Список литературы	324

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

5.1. Общие сведения об измерениях и погрешностях	325
5.2. Измерение температуры	328
5.2.1. Международная температурная шкала МТШ-90	328
5.2.2. Стеклянные и манометрические термометры	329
5.2.3. Термоэлектрические преобразователи	332
5.2.4. Термопреобразователи сопротивления	334
5.2.5. Средства измерения температуры тел по их тепловому излучению	338
5.2.6. Преобразователи с унифицированным выходным сигналом	341
5.2.7. Вторичные приборы	341
5.3. Измерение давления	344
5.3.1. Общие сведения об изменении давления	344

5.3.2. Жидкостные манометры и дифманометры	345	6.2.2. Измерение температуры твердых тел	379
5.3.3. Деформационные манометры и дифманометры	345	6.2.3. Зондовые методы измерения полей давления в потоках жидкости и газа	382
5.3.4. Электрические манометры и дифманометры	350	6.2.4. Зондовые методы измерения полей скорости	383
5.3.5. Грузопоршневые и прочие манометры	352	6.2.5. Бесконтактные методы измерения полей скорости	386
5.3.6. Методика измерения давления и разности давлений	352	6.2.6. Методы исследования полей плотности в потоках жидкости и газа и структуры двухфазных потоков	387
5.4. Измерение уровня	353	6.3. Методы экспериментально исследования теплообмена	391
5.4.1. Методы измерения уровня	353	6.3.1. Создание стационарных тепловых потоков	391
5.4.2. Приборы для измерения уровня	353	6.3.2. Измерение стационарных тепловых потоков	392
5.5. Измерение расхода	355	6.3.3. Источники погрешностей при измерении тепловых потоков и способы их устранения	393
5.5.1. Общие сведения об измерении расхода	355	6.3.4. Определение тепловых потоков по методу регулярного теплового режима	394
5.5.2. Измерение расхода по перепаду давления на сужающем устройстве	356	6.3.5. Измерение нестационарных тепловых потоков	395
5.5.3. Расходомеры постоянного перепада давления	358	6.3.6. Определение среднemasовых энтальпий, температуры и паросодержания при течении жидкости в трубах	395
5.5.4. Тахометрические расходомеры и счетчики количества вещества	359	6.3.7. Косвенные методы определения средней теплоотдачи	396
5.5.5. Электромагнитные, ультразвуковые, вихревые и массовые расходомеры	361	6.3.8. Определение критических тепловых потоков при кипении	397
5.5.6. Методика измерения расхода	363	6.4. Методы определения коэффициентов сопротивления трения	397
5.6. Измерение расхода теплоты	364	6.5. Методы определения характеристик массообмена	400
5.6.1. Общие сведения об измерении расхода и количества теплоты	364	Список литературы	401
5.6.2. Теплосчетчики с различными типами преобразователей расхода	365		
5.7. Измерение состава газов и концентраций растворов	367		
5.7.1. Общие сведения о газоанализаторах и анализаторах растворов	367		
5.7.2. Газоанализаторы	368		
5.7.3. Анализаторы жидкостей	372		
5.7.4. Методика анализа состава газов и растворов	374		
Список литературы	375		
Список предприятий-изготовителей	376		

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА

6.1. Классификация методов экспериментального исследования	378
6.2. Методы экспериментального исследования полей температуры, давления, скорости, плотности и концентрации	378
6.2.1. Измерение полей температуры в потоках жидкости и газа	378

РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

7.1. Метод определения термических свойств веществ	403
7.1.1. Определение плотности и линейного расширения твердых тел	403
7.1.2. Определение плотности жидкостей и газов	406
7.1.3. Определение поверхностного натяжения и краевых углов смачивания	410

7.1.4. Определение давления насыщенных паров	411
7.1.5. Определение температуры плавления	413
7.2. Методы определения калорических свойств веществ	413
7.2.1. Определение калорических свойств твердых тел	413
7.2.2. Определение калорических свойств жидкостей и газов	415
7.2.3. Определение теплоты плавления и парообразования	418
7.3. Методы определения теплопроводности и вязкости веществ	418
7.3.1. Определение теплопроводности веществ	418
7.3.2. Определение вязкости жидкостей и газов	424
7.4. Современные динамические методы определения теплофизических свойств веществ	429
7.4.1. Методы нагрева образца импульсом электрического тока	429
7.4.2. Метод лазерной вспышки	431
7.4.3. Метод ударного сжатия	433
Список литературы	433

РАЗДЕЛ ВОСЬМОЙ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

8.1. Основные понятия и определения	436
8.2. Общие принципы построения АСНИ	437
8.2.1. Состав и структура АСНИ	437
8.2.2. Принципы построения и требования к элементам АСНИ	439
8.3. Особенности использования датчиков в АСНИ	440
8.4. Аппаратные средства АСНИ	442
8.4.1. Информационно-измерительные системы на базе компьютерных шин	442
8.4.2. Информационно-измерительные системы на базе приборного интерфейса IEEE-488	444
8.4.3. Информационно-измерительные системы на базе магистрально-модульных систем	445
8.4.4. Информационно-измерительные системы на базе локальных устройств ввода/вывода	452
8.5. Программные средства АСНИ	454
8.5.1. Структура и состав программных средств	454
8.5.2. Операционные системы	454
8.5.3. Средства и языки программирования	456
8.6. Статистический анализ экспериментальных данных	456
8.6.1. Методы обработки экспериментальных данных	456
8.6.2. Экспериментальное определение и анализ основных вероятностных свойств случайных величин	459
8.6.3. Статистический анализ случайных процессов	464
8.6.4. Определение функциональной зависимости между величинами по результатам наблюдений	469
8.6.5. Планирование эксперимента	474
8.6.6. Программное обеспечение статистического анализа данных	475
Список литературы	476

РАЗДЕЛ ДЕВЯТЫЙ

НЕТРАДИЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

9.1. Общие сведения	478
9.2. Солнечные энергетические установки	479
9.2.1. Характеристика солнечной радиации	479
9.2.2. Солнечные коллекторы	488
9.2.3. Селективные покрытия	489
9.2.4. Системы солнечного теплоснабжения	491
9.2.5. Солнечные электростанции	493
9.2.6. Солнечные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП)	497
9.3. Геотермальная энергетика	503
9.4. Ветроэнергетика	507
9.5. Термоэлектрические генераторы (ТЭГ)	516
9.6. Термоэмиссионные преобразователи (ТЭП)	520
9.7. Магнитогидродинамические преобразователи (МГД-преобразователи)	524
9.7.1. Принцип действия МГД-генератора	524
9.7.2. МГД-генераторы открытого цикла	527
9.7.3. МГД-генераторы замкнутого цикла	527
9.7.4. Энергосиловые МГД-установки	528
9.8. Электрохимические генераторы и энергоустановки	528
9.8.1. Общие сведения	528
9.8.2. Термодинамика процессов в топливном элементе	531

9.8.3. Характеристики топливных элементов и электрохимических генераторов	531	9.9.3. Классификация термоядерных реакторов	538
Термоядерные электростанции и термоядерные реакторы	535	9.9.4. Термоядерные реакторы типа «Токамак» и термоядерная электростанция	540
9.9.1. Термоядерные реакции. Общие сведения	535	9.9.5. Реакторы типа ДЕМО и ИТЭР	542
9.9.2. Типы и характеристики термоядерных реакций	536	Список литературы	545
		Предметный указатель	547