

В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин, П. Д. Семенов

ТЕПЛОТЕХНИКА

Том 1

Термодинамика и теория теплообмена

УЧЕБНИК ДЛЯ ВУЗОВ

Под редакцией

доктора технических наук, профессора **В. Л. Ерофеева**,
кандидата технических наук, доцента **А. С. Пряхина**

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по инженерно-техническим направлениям*

Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru

Москва ■ Юрайт ■ 2020

УДК 621.1.016(075.8)

ББК 31.1я73

Е78

Авторы:

Ерофеев Валентин Леонидович — доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания Института водного транспорта Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова (гл. 1–6; гл. 21);

Пряхин Александр Сергеевич — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания Института водного транспорта Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова (гл. 12–20);

Семенов Петр Дмитриевич — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания Института водного транспорта Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова (гл. 7–11).

Рецензенты:

Петриченко М. Р. — профессор, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого;

Гаврилов В. В. — профессор, доктор технических наук, профессор Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.

Ерофеев, В. Л.

Е78 Теплотехника. В 2 т. Том 1. Термодинамика и теория теплообмена : учебник для вузов / В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин, П. Д. Семенов ; под ред. В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина. — М. : Издательство Юрайт, 2020. — 308 с. — Серия : Высшее образование.

ISBN 978-5-534-01738-0 (т. 1)

ISBN 978-5-534-01739-7

В первом томе учебника изложены основы термодинамики и теории теплообмена. Рассмотрены основные понятия и фундаментальные законы термодинамики, понятийный аппарат и основы теории теплообмена и теплообменных устройств. Представлены методы термодинамического анализа и расчета теплоэнергетических устройств и двигателей, а также методика оценки термозодинамических параметров и технико-экономических показателей теплоэнергетического оборудования. Освещены основные положения теории теплопередачи и порядок выполнения расчета процессов теплоотдачи и теплопередачи, а также расчета теплообменного оборудования.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям.

УДК 621.1.016(075.8)

ББК 31.1я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-534-01738-0 (т. 1)

ISBN 978-5-534-01739-7

© Ерофеев В. Л., Пряхин А. С.,
Семенов П. Д., 2015

© ООО «Издательство Юрайт», 2020

Оглавление

Предисловие	7
Введение.....	11

Раздел I ТЕРМОДИНАМИКА

Глава 1. Основные понятия и законы феноменологической термодинамики.....	17
---	-----------

1.1. Предмет, метод исследования и область применения феноменологической термодинамики	17
1.2. Термодинамическая система. Параметры и уравнения состояния. Идеальный и реальный газы.....	20
1.3. Смеси идеальных газов.....	23
1.4. Теплоемкость газов и их смесей	25
1.5. Дифференциальные уравнения термодинамики. Термодинамические потенциалы	29
1.6. Основные законы термодинамики	31
1.6.1. Первое начало термодинамики для закрытой и открытой систем.....	31
1.6.2. Второе начало термодинамики	36
1.6.3. Третье начало термодинамики.....	39
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	40
<i>Тест</i>	40

Глава 2. Термодинамические процессы	43
--	-----------

2.1. Постановка задачи исследования процессов. Равновесные и неравновесные процессы.....	43
2.2. Термодинамические процессы с идеальным газом	44
2.2.1. Изохорный и изобарный процессы	44
2.2.2. Изотермический и адиабатный процессы.....	47
2.2.3. Политропные процессы.....	52
2.3. Термодинамические процессы с водяным паром	60
2.3.1. Термодинамические свойства жидкости и пара. Фазовая диаграмма	60
2.3.2. Основные процессы с водяным паром	69
2.4. Влажный воздух.....	74
2.4.1. Основные свойства влажного воздуха	74
2.4.2. Основные процессы изменения состояния влажного воздуха.....	78
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	82
<i>Тест</i>	82

Глава 3. Рабочий процесс в турбине и компрессоре.....	84
--	-----------

3.1. Идеальная газовая турбина и идеальный компрессор.....	84
3.2. Многоступенчатые компрессоры.....	87

3.3. Работа и коэффициент полезного действия реальных компрессоров	89
3.4. Принципиальная схема газотурбинной установки и процессы в ней.....	90
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	91
<i>Тест</i>	91
Глава 4. Термодинамика газовых потоков	94
4.1. Особенности преобразования энергии в потоке упругой жидкости. Параметры торможения	94
4.2. Сопловое и диффузорное течение. Закон обращения воздействий на поток. Форма каналов сопел и диффузоров.....	95
4.3. Истечение газа через суживающееся сопло и сопло Лаваля. Скачки уплотнения.....	100
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	106
<i>Тест</i>	106
Глава 5. Циклы теплоэнергетических установок	108
5.1. Прямые и обратные круговые процессы (циклы). Циклы теплосиловых установок, холодильных машин и тепловых насосов.....	108
5.2. Цикл Карно, теорема Карно. Обобщенные и эквивалентные циклы Карно.....	110
5.3. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания	114
5.3.1. Реальные двигатели внутреннего сгорания: индикаторные диаграммы, идеальные циклы и КПД	114
5.3.2. Идеальные циклы Отто, Тринклера, Дизеля, Стирлинга. Вывод формул термического КПД циклов	118
5.4. Циклы газотурбинных двигателей	124
5.4.1. Цикл газотурбинных двигателей с подводом теплоты при постоянном давлении и постоянном объеме.....	124
5.4.2. Цикл ГТУ с регенерацией.....	126
5.4.3. Сравнительный анализ циклов ДВС при постоянной степени сжатия и в заданном интервале температур.....	128
5.5. Циклы пароэнергетических установок	130
5.5.1. Идеальный цикл Ренкина.....	130
5.5.2. Направления повышения КПД цикла Ренкина.....	133
5.5.3. Теплофикационный цикл	135
5.6. Обратные циклы	136
5.6.1. Цикл паровой компрессорной холодильной установки	136
5.6.2. Цикл абсорбционной холодильной установки.....	138
5.6.3. Циклы тепловых насосов	139
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	140
<i>Тест</i>	141
Глава 6. Термодинамический анализ теплотехнических устройств	144
6.1. Второе начало термодинамики для необратимых процессов. Закон возрастания энтропии	144
6.2. Необратимость и производство работы. Эксергия	148
6.3. Анализ необратимых циклов с помощью системы коэффициентов полезного действия	153
6.4. Энтропийный и эксергетический методы анализа	154

6.5. Тепловой и эксергетический балансы теплоэнергетических установок. Вторичные энергетические ресурсы.....	156
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	160
<i>Тест</i>	160

Раздел II ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА

Глава 7. Теория теплопроводности.....	165
7.1. Процессы теплообмена.....	165
7.2. Основные понятия теории теплопроводности.....	166
7.3. Теплопроводность материалов.....	169
7.4. Дифференциальное уравнение теплопроводности.....	170
7.5. Условия однозначности.....	173
7.6. Распространение теплоты теплопроводностью в плоской и цилиндрической стенках при стационарном режиме (граничные условия первого рода).....	174
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	183
<i>Тест</i>	183
Глава 8. Конвективный теплообмен	185
8.1. Основные понятия и определения.....	185
8.2. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена.....	190
8.3. Подобие физических явлений.....	198
8.4. Гидромеханическое подобие.....	203
8.5. Тепловое подобие	206
8.6. Уравнения подобия конвективного теплообмена.....	210
8.7. Экспериментальное изучение конвективного теплообмена	211
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	216
<i>Тест</i>	217
Глава 9. Теплообмен при вынужденном и свободном движении теплоносителей	219
9.1. Вынужденное движение жидкости в трубах.....	219
9.2. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости в трубах.....	222
9.3. Теплоотдача при поперечном омывании одиночной гладкой трубы и пучка труб.....	228
9.4. Особенности расчета коэффициента теплоотдачи при поперечном омывании пучка оребренных труб.....	234
9.5. Теплоотдача при свободном движении.....	239
9.6. Теплообмен при кипении жидкости	243
9.6.1. Механизм теплоотдачи при кипении жидкости.....	243
9.6.2. Теплоотдача при кипении жидкости в большом объеме	246
9.6.3. Теплоотдача при кипении жидкости внутри труб.....	249
9.7. Теплоотдача при конденсации пара.....	251
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	254
<i>Тест</i>	255
Глава 10. Тепловое излучение.....	257
10.1. Общие сведения.....	257
10.2. Закон поглощения.....	259

10.3. Основные законы излучения. Серые тела	260
10.4. Закон Кирхгофа	264
10.5. Излучение газов	266
10.6. Теплообмен излучением между двумя телами	270
10.7. Защита от теплового излучения с помощью экранов	273
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	275
<i>Тест</i>	275
Глава 11. Теплопередача	277
11.1. Сложный теплообмен. Теплопередача через стенки	277
11.2. Тепловая изоляция. Критический диаметр изоляции	283
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	285
<i>Тест</i>	286
Глава 12. Теплообменные аппараты	287
12.1. Типы теплообменных аппаратов.....	287
12.2. Схемы тока теплоносителей	288
12.3. Тепловой баланс теплообменного аппарата.....	290
12.4. Температурный напор.....	292
12.5. Тепловые расчеты теплообменных аппаратов	296
12.6. Гидродинамический расчет теплообменных аппаратов	299
12.7. Тепловые трубы и термосифоны	301
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	304
<i>Тест</i>	304
Список литературы.....	306

Предисловие

В основу настоящего издания положен учебник Л. В. Арнольда, Г. А. Михайловского, В. М. Селиверстова «Техническая термодинамика и теплопередача»¹, изданный в 1979 г., а также многолетний научно-педагогический опыт авторов предлагаемой книги, которые являются учениками и продолжателями школы профессоров Л. В. Арнольда, Г. А. Михайловского, В. М. Селиверстова.

Авторы всецело разделяют мнение профессора Л. В. Арнольда, считавшего наиболее важным оттенить физическую сторону рассматриваемых в учебнике процессов. Такой подход к изложению курса теплотехники позволит обучающимся в дальнейшем самостоятельно разобраться в приложении этой дисциплины к специальным вопросам науки и техники.

В настоящее время изменились воззрения на содержание и построение курса, произошло уточнение терминов и толкований некоторых понятий. Расширение объема содержания курса «Теплотехника» согласно актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования потребовало готовить учебник, отвечающий новым задачам. Так, кроме традиционных разделов технической термодинамики и теплопередачи в книге излагаются вопросы приложения первого и второго начал термодинамики к физико-химическим системам. В разделе «Энергетическое использование теплоты» рассмотрены характеристики топлива и основы его горения, теплогенерирующие устройства, холодильная и криогенная техника, вопросы энергосбережения, а также основные направления экономии энергетических ресурсов.

Основными потребителями топлива для производства механической энергии в промышленности и на транспорте являются дизельные двигатели внутреннего сгорания (ДВС), работающие по идеальным циклам Отто или Тринклера. На морском флоте в качестве главных двигателей используются также газотурбинные установки (ГТУ) и паротурбинные установки (ПТУ). На береговых предприятиях широкое распространение получили карбюраторные и газовые ДВС. И если устройство и эксплуатацию судовых двигателей студенты осваивают при изучении ряда специальных дисциплин учебного плана подготовки морского инженера, то изучение закономерностей преобразования теплоты в работу соответствующего оборудования, вопросов эффективного использования энергии, согласно учебному плану подготовки специалистов по эксплуатации перегрузочного оборудования портов и транспортных терминалов, ограничивается

¹ Арнольд Л. В., Михайловский Г. А., Селиверстов В. М. Техническая термодинамика и теплопередача. М. : Высшая школа, 1974.

рамками дисциплины «Теплотехника». Однако на практике выпускникам технических и транспортных вузов приходится исполнять обязанности энергетиков предприятий различных отраслей и самостоятельно осваивать новые знания. Поэтому в данном учебнике рассматриваются некоторые особенности использования энергии не только на судах, но и на береговых предприятиях. Эти материалы могут иметь самостоятельную ценность.

Содержание учебника соответствует требованиям программы «Теплотехника» и включает все сведения, необходимые студентам, обучающимся по энергетическим направлениям бакалавриата, специалитета и магистратуры, для творческого решения сложных задач рационального использования топливно-энергетических ресурсов.

Учебник предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров (далее соответственно) 23.03.03 и 23.04.03 — Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов (дисциплина «Теплотехника»), 26.03.02 и 26.04.02 — Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры (дисциплина «Теплофизические основы судовой энергетики»), 13.03.02 и 13.04.02 — Электроэнергетика и электротехника (дисциплина «Техническая термодинамика и теплопередача»). Учебник также может быть полезен студентам технологических, инженерно-технических и инженерно-экономических вузов при изучении дисциплин в области теплоэнергетики и теплоэнергетического оборудования.

Содержание дисциплины «Теплотехника» базируется на знаниях и умениях, полученных при изучении дисциплин математического и естественнонаучного, общепрофессионального циклов.

Освоение дисциплины формирует у студентов следующие обязательные компетенции:

- способность к восприятию информации, ее анализу и обобщению, постановке цели и выбору путей ее достижения;
- способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат;
- способность применять базовые знания фундаментальных и профессиональных дисциплин, осуществлять управление качеством изделий, продукции и услуг, проводить технико-экономический анализ в области профессиональной деятельности, обосновывать принимаемые решения по технической эксплуатации теплоэнергетического оборудования, уметь решать на их основе практические задачи профессиональной деятельности;
- готовность применять основные законы естественнонаучных дисциплин, методы моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности;
- способность проводить технические расчеты по проектам, технико-экономический и функционально-стоимостной анализ эффективности проектных решений с использованием прикладного программного обеспечения для расчета параметров и выбора серийного и разработки нового теплоэнергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования и пр.;

- способность определять потребности производства в топливно-энергетических ресурсах, обосновывать мероприятия по их экономии;
- способность передавать знания в системах среднего и высшего образования и др.

В результате освоения дисциплины студент должен:

знать

- фундаментальные понятия, законы и теории классической и современной физики;
- основные теплофизические явления и процессы;
- теплофизические основы действия теплоэнергетического оборудования;
- принципы рационального использования природных ресурсов и охраны природы;

уметь

- выделять конкретное физическое содержание в прикладных задачах будущей деятельности;
- излагать, систематизировать и критически анализировать базовую общепрофессиональную информацию;
- на базе полученных знаний и навыков осуществлять выбор теплоэнергетического оборудования, элементов и систем оборудования для замены в процессе эксплуатации;
- использовать математические методы в технических приложениях;
- разрабатывать проекты объектов профессиональной деятельности с учетом физико-технических, механико-технологических, эргономических, эстетических, экологических и экономических требований;
- разрабатывать и реализовывать предложения по энергосбережению;
- понимать роль охраны окружающей среды и рационального природопользования для развития и сохранения цивилизации;
- анализировать результаты исследований и разрабатывать предложения по их внедрению;

владеть

- умением изучать и анализировать необходимую информацию, технические данные, показатели и результаты работы по совершенствованию технологических процессов эксплуатации, ремонта и сервисного обслуживания теплоэнергетического оборудования различного назначения, агрегатов, систем и элементов, проводить необходимые расчеты, используя современные технические средства;
- способностью к проведению технических расчетов по проектам выбора серийного и разработки нового теплоэнергетического оборудования;
- методами организации вычислительных экспериментов в области профессиональной деятельности;
- методами выполнения элементарных лабораторных физико-химических исследований в области профессиональной деятельности;
- умением проводить измерительный эксперимент и оценивать результаты измерений;
- базовыми знаниями, математическим аппаратом и методами в области проектирования энергосберегающего оборудования и систем утилизации вторичных энергоресурсов.

В результате изучения курса студенты должны быть подготовленными к решению общих и частных профессиональных задач в соответствии с видами профессиональной деятельности. Именно такую задачу ставили перед собой авторы учебника, а также рецензенты и консультанты, принимавшие самое деятельное участие в работе над рукописью данного учебника.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам: М. Р. Петриченко, доктору технических наук, профессору Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; В. В. Гаврилову, доктору технических наук, профессору Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.

Особую признательность авторы выражают заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору Г. А. Дрейцеру за ценные указания на необходимость освещения накопленного за последние десятилетия нового экспериментального и теоретического материала по расчету процессов теплообмена в каналах.

Авторы надеются на то, что знания, умения и навыки, полученные при изучении материалов, представленных в учебнике, помогут студентам при освоении специальных дисциплин теплоэнергетического профиля, при прохождении производственной практики, при дипломном проектировании, а также в практической профессиональной деятельности.

Введение

Мировая энергетика с 50-х гг. XX в. характеризовалась чрезвычайно быстрым увеличением потребления энергии. Однако за последние 20—25 лет произошли значительные изменения, связанные прежде всего с переходом от экстенсивного развития энергетики к энергетической политике, основанной на повышении эффективности использования энергии и всемерной ее экономии. Этому способствовало осознание обществом проблемы ограниченности первичных источников энергии и значительное увеличение затрат на извлечение, переработку, транспортировку и использование энергии.

Энергия, наряду с трудом, капиталом и материалами, является одним из важнейших факторов производства. Устойчивое экономическое развитие государства, региона, отраслей народного хозяйства не может не опираться на прочный базис системы энергоснабжения. Прочным же этот базис может быть лишь в том случае, если возможно предвидеть негативные изменения этой системы и либо нейтрализовать действие ряда факторов, их порождающих, либо адаптироваться к новым условиям и принимать решения только на основе разработки и системной реализации энергетической политики государства, региона и отдельных субъектов хозяйствования.

Снижение потребления энергии является своеобразным показателем деиндустриализации, поэтому важным является вопрос эффективности использования энергии. Основным вектором энергетической политики практически во всех странах мира становится политика энергосбережения во всех сферах жизнедеятельности человеческого общества.

Остро стоят проблемы производства, передачи и потребления тепловой энергии в России. К ним относятся: износ мощностей на 60—70%, морально устаревшее и изношенное оборудование ТЭС, котельных и другого теплоэнергетического оборудования, что обуславливает низкий КПД при их работе, высокие тепловые потери и нарастающее число отказов с соответствующими негативными последствиями.

Серьезной проблемой в нашей стране является кадровая политика: наблюдается перекоп в сторону от профессионалов-энергетиков к менеджерам, не имеющим профильных знаний. В этой связи на передний план выступает задача повышения уровня подготовки будущих специалистов как в энергетической сфере, так и в смежных отраслях.

Существует ряд проблем и в законодательной базе: принимаемые законы и долгосрочные программы подчас носят декларативный характер. Имеются и другие проблемы, которые должны рассматриваться во взаимосвязи с мировыми тенденциями энергоиспользования.

Базовый прогноз мирового потребления энергии E (в гигатоннах условного топлива) представлен на рис. В.1.

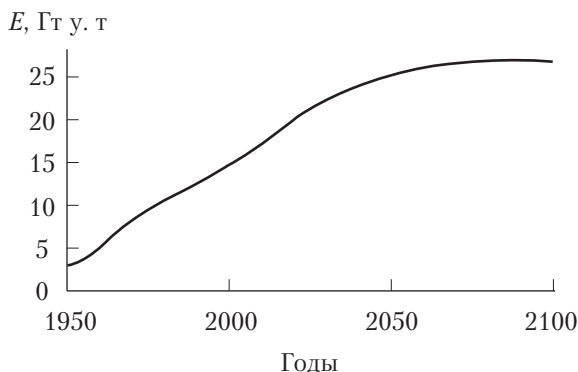


Рис. В.1. Базовый прогноз мирового потребления энергии

Доля энергии первичного электричества, производимого на ветро- и гидростанциях, геотермальных, солнечных, приливных и волновых станциях, не превышает 6–7% и вряд ли может значительно возрасти в будущем. Первичными источниками энергии были и остаются органические топлива (80–87%) и ядерная энергия.

Механическая энергия производится по цепочке «первичный источник — теплота — работа», причем коэффициент полезного действия такого преобразования невысок. Историю развития теплотехники иллюстрирует рис. В.2, где представлено повышение экономичности энергетических установок благодаря открытиям законов преобразования энергии.

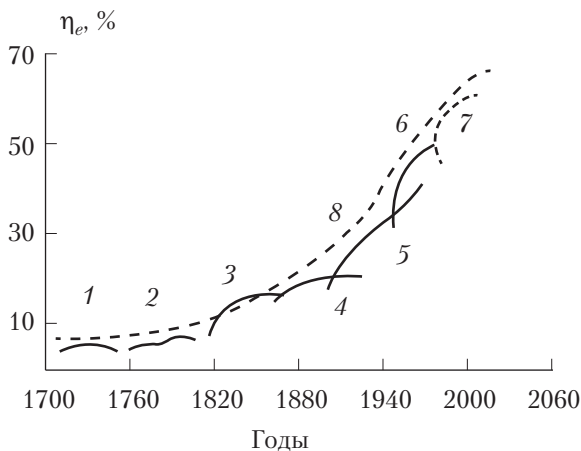


Рис. В.2. Изменение экономичности энергетических установок:

1 — паровые машины Сэвери — Ньюкомена; 2 — паровые машины Уатта; 3 — усовершенствованные паровые машины; 4 — паровые машины с тройным расширением пара; 5 — первые паровые турбины; 6 — двигатели внутреннего сгорания (поршневые), паровые турбины высокого давления; 7 — топливные элементы; магнетогазодинамические электрогенераторные установки; 8 — огибающая кривая

Тепловые двигатели, по-видимому, достигли предела своего теплотехнического совершенства, и лишь установки, работающие по схеме «первичный источник — электроэнергия», исключаящей преобразование теплоты в работу (топливные элементы, магнитогазодинамические электрогенераторные установки), имеют возможность существенно повысить коэффициент полезного действия преобразования энергии. Но создание и широкое использование таких сравнительно дешевых установок — дело достаточно отдаленного будущего. В настоящее же время тепловые двигатели не имеют конкурентов.

Созданию тепловых двигателей, а в дальнейшем существенному повышению их экономичности способствовало возникновение и развитие теплотехники — науки о теплофизических основах энергетики, составной частью которой являются термодинамика и теплопередача, изучающая закономерности переноса теплоты и массы.

Цель настоящего учебника — сформировать у будущих инженеров и менеджеров устойчивые представления о практическом применении теоретических, технических и технологических основ теплотехники, дать действенный аппарат для подготовки, принятия и реализации энергоэффективных проектов.

Раздел I

ТЕРМОДИНАМИКА

В результате изучения данного раздела студент должен:

знать

- основные понятия термодинамики: смеси рабочих тел, теплоемкость, термодинамические процессы и циклы, реальные газы и пары, термодинамика потоков, термодинамический анализ теплотехнических устройств, фазовые переходы;
- фундаментальные законы термодинамики;
- методы термодинамического анализа и термодинамического расчета теплоэнергетических устройств и двигателей;

уметь

- применять фундаментальные законы термодинамики в прикладных задачах будущей деятельности;
- производить оценку термогазодинамических параметров и технико-экономических показателей теплоэнергетического оборудования;
- применять методы термодинамического анализа и термодинамического расчета теплоэнергетических устройств и двигателей;

владеть

- навыками поиска информации о термодинамических свойствах рабочих тел, хладагентов и теплоносителей теплоэнергетических, холодильных и криогенных установок;
 - методами термодинамического анализа с целью выявления энергетической и экономической эффективности теплоэнергетического оборудования;
 - методами термодинамического расчета теплоэнергетических устройств и двигателей.
-

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

1.1. Предмет, метод исследования и область применения феноменологической термодинамики

Термодинамика может быть определена как наука о методах исследования наиболее общих свойств материальных тел, проявляющихся в процессах преобразования одного вида движения материи в другой. Термодинамика занимается изучением физических процессов в макроскопических системах, т.е. в телах, содержащих огромное число микрочастиц.

Термодинамический метод не опирается ни на какие модельные представления о структуре вещества, задачей метода является установление связей между непосредственно наблюдаемыми, измеряемыми в опытах величинами, т.е. термодинамика является дедуктивной наукой, идущей от общего к частному.

В основе термодинамики лежит один из наиболее общих законов природы — *закон сохранения и превращения энергии*, выраженный в специфической, присущей только термодинамике форме — в форме уравнения первого начала термодинамики, что позволяет установить непосредственную связь между физическими величинами, характеризующими влияние разнородных воздействий на объект исследования: на материальное тело или на некоторую систему, в которой происходят процессы, подлежащие изучению.

Вторым законом, также лежащим в основе термодинамики, является *закон одностороннего развития естественных (самопроизвольных) процессов, протекающих в макрообъемах веществ*.

Механизм протекающих процессов и явлений при этом не рассматривается, поэтому классическая термодинамика называется *феноменологической наукой*.

Краткий экскурс в историю термодинамики. Как наука об энергии и ее превращении термодинамика начала складываться в такой исторический период, когда мир физических наук еще не был озарен законом сохранения энергии и даже не были известны ни термин «энергия», ни сущность теплоты. Сложные закономерности превращения энергии, открытие которых происходило постепенно и ценой больших усилий, не сразу становились ясными и очевидными. Они подвергались критике, иногда со стороны крупных ученых, и получали признание нередко через многие годы и даже

через десятилетия. Путь формирования и развития классической термодинамики был очень непростым. Он делится условно на три этапа длительностью приблизительно полстолетия каждый.

Первый этап — первая половина XIX в. Происходит накопление опытных и теоретических знаний. В 1824 г. выходит в свет эпохальный труд С. Карно «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Этот год принято считать годом рождения термодинамики. Хотя нельзя не сказать, что С. Карно придерживается еще вещественной концепции теплоты. Только в последние годы жизни он пришел к тому, что тепло — это движение частиц тела, т.е. то, что в наше время называется энергией теплового движения. Теперь теплотой называется энергия, передаваемая под действием разности температур.

Второй этап — вторая половина XIX в. Публикуется основополагающая работа Р. Клаузиуса «О движущей силе теплоты и о законах, которые можно отсюда получить для теории теплоты» (1850). Автор вводит понятие энтропии и разрабатывает второе начало термодинамики. Через 15 лет Клаузиус приводит «измененное обоснование второго начала», основанное на конкретных энергетических представлениях, путем введения «эквивалента превращения». Эта работа опередила свою эпоху, поэтому не могла получить достойную оценку современников, не найдя отражения ни в научной, ни в учебной литературе. И только теперь она отвечает требованиям времени.

Независимо от Клаузиуса в этот период успешно занимаются исследованием термодинамики Дж. Уатт, У. Томсон (лорд Кельвин), Дж. Максвелл, Л. Больцман и др.

К концу XIX в. термодинамика, именуемая классической, закончила свое формирование. Однако новое поколение ученых испытывало неудовлетворение основами, на которых базировалась термодинамика.

Наступает третий этап — первая половина XX в. Идет поиск таких новых аксиом, которые могли бы служить более надежным основанием второго начала и с большей отчетливостью определяли бы логическую стройность курса. Аксиоматикой термодинамики занимались Н. Н. Шиллер, К. Каратеодори, Т. А. Афанасьева-Эренфест и др. Наряду с этим развиваются основные положения термодинамики благодаря широкому применению ее методов для анализа явлений химической и биологической энергетики.

Феноменологическая термодинамика в том виде, в каком она была создана классиками и дошла до наших дней, представляет собой величественную систему научных знаний, отличающуюся научной строгостью и завершенностью логических построений. Обладая тонким и универсальным методом анализа, она сыграла ключевую роль в развитии теплотехники (в частности, теплоэнергетики) и, кроме того, оказалась источником возникновения и развития многих фундаментальных наук XX в., точнее, источником двух научных направлений, давших две ветви наук:

- *первое направление.* Исследуя методами второго начала термодинамики свойства излучения абсолютно черного тела, М. Планк открыл «квант действия» и создал тем самым квантовую механику. Это позволило Н. Бору разработать современную модель атома и дать тем самым совре-

менные представления о строении вещества. Эти достижения послужили основой для стремительного развития физической и квантовой химии, помогли выйти биологии на молекулярный уровень и стать точной наукой, из науки умозрительной и описательной. На той же основе возникла теория квантовых электромагнитных генераторов (лазеров и мазеров);

- *второе направление.* Исследование Л. Больцманом свойств идеального газа привели его к статистической термодинамике. Развитие статистического математического аппарата и физических представлений определило возникновение математической статистики и статистической механики, теории вероятностей, теории информации и кибернетики.

В развитии наук второго направления сработала «обратная связь»: в 1948 г. в реферативном журнале американской телефонной компании Bell System была опубликована статья К. Шеннона «Математическая теория связи»¹, в которой устанавливалась связь между термодинамикой (понятие энтропии) и информатикой. Идеи, заложенные в данной книге, получили дальнейшее развитие в работах отечественных и зарубежных ученых².

Несмотря на столь значительные прогрессивные сдвиги в науке, совершенные благодаря мощному методу термодинамического анализа, возможности термодинамики еще далеко не исчерпаны. Ее метод находит все более широкое применение в самых разных областях науки и техники. И это понятно: являясь наукой физической, термодинамика отличается от всех других разделов физики тем, что проникает во все ее сферы. По первоначальному смыслу классическая термодинамика, созданная трудами Карно, Клаузиуса, Томсона и др., — это наука о тепловых процессах, идущих в условиях равновесия всех сил. Применение термодинамического метода к исследованию неравновесных процессов породило новое направление — термодинамику неравновесных (или необратимых) процессов, в связи с чем классическую термодинамику стали иногда называть *термостатикой*.

Развитие физических и химических наук и использование в них термодинамического метода исследования привело к разделению термодинамики на отдельные специальные области. Таким образом были созданы:

- *физическая, или общая, термодинамика*, изучающая свойства твердых, жидких и газообразных тел, а также наиболее общие законы превращения энергии (электрические, капиллярные и т.д.);
- *химическая термодинамика*, изучающая химические и физико-химические процессы, их тепловой эффект, а также свойства и поведение растворов и т.п.;
- *техническая термодинамика*, рассматривающая приложение законов термодинамики к преобразованию теплоты в работу.

Ниже будут рассматриваться в основном вопросы технической термодинамики.

¹ Шеннон К. Математическая теория связи // Шеннон К. Работы по теории информатики и кибернетике. М. : Изд-во иностр. лит., 1963.

² См., например: Бриллюэн Л. Наука и теория информации. М. : Физматгиз, 1960; Поплавский Р. П. Термодинамика информационных процессов. М. : Наука, 1981; и др.

1.2. Термодинамическая система. Параметры и уравнения состояния. Идеальный и реальный газы

Термодинамическая система — это тело или совокупность тел, свойства которых являются объектом исследования. Все тела, находящиеся вне границ рассматриваемого тела или их совокупности, называют *окружающей средой*.

Система, которая не может обмениваться энергией с окружающей средой, называется *энергетически изолированной*. Если же система не может обмениваться лишь теплотой, она называется *адиабатно изолированной*.

Под влиянием различного рода энергетических воздействий окружающей среды в термодинамической системе происходит изменение термодинамического состояния тел, например температуры, давления и др., т.е. происходит термодинамический процесс.

Энергия системы E изменяется на величину ΔE за счет воздействий σ_i (тепловых, электрических, механических и т.д.). Тогда по закону сохранения и превращения энергии

$$\Delta E = \sum_{i=1}^{i=U} \sigma_i. \quad (1.1)$$

При элементарном акте взаимодействия между системой и окружающей средой энергия системы изменится на бесконечно малую величину

$$dE = \sum_{i=1}^{i=n} d\sigma_i. \quad (1.2)$$

Уравнение (1.2) и является *уравнением первого начала термодинамики в общем виде*.

Параметры и уравнения состояния. Наличие воздействия какого-либо рода может быть определено по изменению конкретной физической величины, называемой *координатой состояния системы*. Если взаимодействие данного рода имеет место, то координата обязательно изменится. Если воздействие отсутствует, то эта координата остается постоянной и никакими другими воздействиями не может быть изменена.

При механическом деформационном взаимодействии, совершающемся под влиянием равномерно распределенного давления, такой координатой будет являться объем V рабочего тела. Действительно, если рассмотреть в качестве системы газ, находящийся в цилиндре под поршнем, то при неравенстве давлений над и под поршнем последний будет перемещаться вверх или вниз, а объем газа V будет либо уменьшаться, либо увеличиваться. При жестком закреплении поршня, если жесткими являются и стенки цилиндра, никакими иными путями нельзя добиться изменения объема. Постоянство объема газа $dV = 0$ будет свидетельствовать об отсутствии механического деформационного взаимодействия.

При химических и фазовых превращениях происходит изменение одной и той же величины — массы M . Если в системе совершается химическая реакция, то происходят уменьшение массы исходных веществ и увеличение массы продуктов реакции. То же происходит и при переходе вещества

из одного агрегатного состояния в другие. Если же в системе устанавливается химическое или фазовое равновесие, то массы веществ, образующих систему, остаются постоянными: $dM = 0$. Следовательно, координатой при химических и фазовых превращениях является масса.

При рассмотрении тепловых взаимодействий тепловая координата непосредственно на опыте не измеряется и не наблюдается. Она может быть вычислена через другие наблюдаемые на опыте величины. Такой физической величиной является энтропия системы S . При наличии теплообмена энтропия изменяется: $dS \neq 0$; при отсутствии теплообмена она остается постоянной: $dS = 0$.

Рассмотрение различного рода взаимодействий можно было бы продолжить и определить каждому взаимодействию свою координату.

Итак, по поведению координат состояния системы можно судить о наличии или отсутствии данного воздействия. Однако не менее важен вопрос об условиях возможности осуществления данного воздействия на систему.

Для любого рода взаимодействий можно установить более определенную физическую величину, при равенстве которой в системе и окружающей среде воздействия данного рода не существует. Назовем такие физические величины *потенциалами*. Разность соответствующих потенциалов внутри и вне системы является движущей причиной данного процесса в системе. При равенстве потенциалов внутри и вне системы взаимодействие данного рода не может быть осуществлено.

В случае механического деформационного взаимодействия роль потенциала играет давление p . Так, при равенстве давлений внутри и вне системы невозможно осуществить расширение или сжатие системы.

Теплообмен между двумя телами возможен только при наличии разности температур этих тел, следовательно, тепловым потенциалом является температура T .

Электрическое взаимодействие может быть осуществлено только при наличии разности электрических потенциалов U и т.д.

Количественной мерой какого-либо воздействия является произведение потенциала на измерение соответствующей координаты. Так, элементарная работа введения механического деформационного воздействия при равномерном распределении давления равна $dL = pdV$, элементарное количество теплоты $dQ = TdS$ и т.д.

Одновременно следует установить правило знаков. Знак воздействия рассматривается с точки зрения термодинамической системы (или рабочего тела). Так, теплота dQ положительна, если подводится к системе от окружающей среды ($dQ = -dQ'$), работа dL положительна, если совершается внутренними силами против внешних ($dL = -dL'$).

Координаты и потенциалы системы называют *термодинамическими параметрами состояния*.

Параметры состояния относят к единице массы, рассматривая *удельные величины*:

удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$,

$$v = \frac{V}{M};$$

плотность, кг/м³,

$$\rho = \frac{M}{V};$$

удельную энтропию, кДж/(кг · К),

$$s = \frac{S}{M}.$$

К параметрам состояния относятся также величины внутренней энергии

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4$$

и энтальпию

$$I = U + pV,$$

где pV — потенциальная энергия давления.

Под внутренней энергией понимают кинетическую энергию теплового движения молекул, зависящую от температуры тела, и потенциальную энергию их силового взаимодействия.

Термодинамические параметры находятся между собой в функциональной зависимости, называемой *уравнением состояния системы*. В зависимости от числа воздействия, т.е. от степени свободы системы, для каждой системы существуют свои уравнения состояния, характеризующие определенные связи между термодинамическими параметрами.

Для реальной системы уравнение состояния термодинамики получается только из опыта. Так, для системы с двумя степенями свободы — тепловой и механической — уравнение состояния в общем виде записывается как

$$F(p, v, T) = 0. \quad (1.3)$$

Для каждой конкретной термодинамической системы уравнения состояния определяются из модельных представлений о структуре вещества или опытным путем.

Идеальный и реальный газ. *Идеальным газом* называется газ, в котором пренебрегают потенциальной энергией силового взаимодействия между молекулами, а также объемом самих молекул.

Зависимость между параметрами идеального газа описывается законами Бойля — Мариотта, Гей — Люссака.

Закон Бойля — Мариотта. *При постоянной температуре объем газа изменяется обратно пропорционально его давлению:*

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{p_2}{p_1}.$$

Закон Гей — Люссака. *При постоянном давлении удельные объемы газа изменяются прямо пропорционально абсолютным температурам:*

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Уравнение состояния идеального газа. Совместное решение законов Бойля — Мариотта и Гей — Люссака позволяет получить уравнение состояния, или характеристическое уравнение идеального газа,

$$\frac{pv}{T} = \text{const.}$$

Уравнение состояния идеального газа может быть получено исходя из молекулярно-кинетической теории газа в виде

$$pv/T = R = \text{const или } pv = RT. \quad (1.4)$$

Постоянную R в уравнениях называют *газовой постоянной*¹.

Уравнение состояния реального газа. Для реального газа может быть использовано уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT. \quad (1.5)$$

В уравнении состояния реального газа величина a/v^2 учитывает влияние сил притяжения между молекулами на внутреннее давление газа, а величина b является собственным объемом молекул.

1.3. Смеси идеальных газов

В практических приложениях термодинамики большей частью приходится рассматривать такие смеси газов, когда компоненты не вступают друг с другом в химические реакции. Примером может служить воздух, состоящий из смеси кислорода и атмосферного азота (последний включает и все остаточные газы, входящие в воздух в малом количестве, в том числе углекислый газ, аргон, гелий и пр.).

Состав смеси газов может быть задан различными способами:

во-первых, указанием массовых долей компонентов смеси — в долях единицы или в процентах:

$$m_1 + m_2 + \dots + m_n = \sum_{i=1}^{i=n} m_i = 1, \quad (1.6)$$

где m_i — массовая доля i -го компонента смеси;

$$m_i = \frac{M_i}{M_{\text{см}}}.$$

Здесь M_i — масса i -го компонента смеси; $M_{\text{см}}$ — масса смеси;

во-вторых, указанием объемных долей компонентов смеси:

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = \sum_{i=1}^{i=n} r_i = 1, \quad (1.7)$$

где r_i — объемная доля i -го компонента смеси;

¹ Поскольку для каждого газа существует свое значение постоянной R , ее иногда называют *индивидуальной* газовой постоянной.

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}}.$$

Здесь V_i — парциальный объем i -го компонента смеси; $V_{\text{см}}$ — объем смеси.

Парциальным объемом компонента смеси называют часть объема смеси, которая занимает компонент, сжатый при температуре смеси до давления смеси;

в-третьих, указанием молярных компонентов смеси в долях единицы:

$$N_1 + N_2 + \dots + N_n = \sum_{i=1}^{i=n} N_i = 1, \quad (1.8)$$

где N_i — молярная доля i -го компонента смеси;

$$N_i = \frac{n_i}{\sum n_i},$$

где n_i — число молей i -го компонента смеси.

Не трудно доказать, что для идеального газа $N_i = r_i$. Действительно, умножая числитель и знаменатель на величину объема 1 моля вещества V_{μ} , получим объемы компонента и смеси:

$$N_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \frac{V_{\mu}}{V_{\mu}} = \frac{V_i}{V_{\text{см}}} = r_i.$$

Таким образом, задание смеси идеальных газов объемными долями компонентов равносильно заданию смеси молярными долями отдельных газов.

Давление смеси газов можно представить как сумму парциальных давлений компонентов смеси (опытный закон Дальтона):

$$p_{\text{см}} = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^{i=n} p_i, \quad (1.9)$$

где p_i — парциальное давление, оказываемое отдельным компонентом в объеме всей смеси при неизменной температуре.

Пересчет состава смеси с массовых долей на объемные и обратно может быть произведен после введения понятия *кажущейся молекулярной массы смеси газов* $\mu_{\text{см}}$ по формулам:

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \mu_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{m_i}{\mu_i}}; \quad (1.10)$$

$$r_i m_i \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_i} = m_i \frac{\sum_{i=1}^{i=n} r_i \mu_i}{\mu_i}; \quad (1.11)$$

$$\mu_i = r_i \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_i} = r_i \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \mu_i r_i}. \quad (1.12)$$

Для газовой смеси справедливо уравнение состояния идеального газа, если в него ввести условную величину газовой постоянной смеси:

$$p_{\text{см}} V_{\text{см}} = M_{\text{см}} R_{\text{см}} T. \quad (1.13)$$

Газовая постоянная смеси газов может быть вычислена по формулам, кДж/(кг · К):

$$R_{\text{см}} = \frac{\mu R}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8,314}{\mu_{\text{см}}} \quad (1.14)$$

или

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^{i=n} m_i R_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{r_i}{R_i}}. \quad (1.15)$$

С помощью подобных соотношений можно рассчитать удельный объем и плотность смеси газов:

$$v_{\text{см}} = \sum_{i=1}^{i=n} m_i v_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{r_i}{v_i}}; \quad (1.16)$$

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{m_i}{\rho_i}} = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \rho_i. \quad (1.17)$$

Парциальное давление компонентов, входящих в состав смеси, определяется по формуле

$$p_i = r_i p_{\text{см}}. \quad (1.18)$$

1.4. Теплоемкость газов и их смесей

Теплоемкостью (C) называют отношение количества теплоты, необходимой для изменения температуры в веществе на бесконечно малую величину:

$$C = \frac{dQ}{dT}. \quad (1.19)$$

Такую теплоемкость называют *истинной*.

При решении практических задач используют *среднюю теплоемкость* — условную постоянную величину в определенном интервале температур:

$$\bar{C} = \frac{Q}{T_2 - T_1}. \quad (1.20)$$

В зависимости от единиц количества вещества различают:

- массовую теплоемкость c , кДж/(кг · К);
- молярную теплоемкость μc или C_{μ} , кДж/(кмоль · К);

• объемную теплоемкость C или c' , отнесенную к 1 м^3 газа при нормальных физических условиях ($p = 760 \text{ мм рт. ст.}$, $t = 0^\circ\text{C}$), $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Массовая, молярная и объемная теплоемкости связаны между собой следующими зависимостями:

$$c = \frac{\mu c}{\mu} = C v_{\text{н}} = \frac{C}{\rho_{\text{н}}}; \quad (1.21)$$

$$\mu c = 22,4 C, \quad (1.22)$$

где μ — молекулярная масса вещества, $\text{кг}/\text{кмоль}$; $v_{\text{н}}$, $\rho_{\text{н}}$ — удельный объем и плотность вещества при нормальных условиях; $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ — объем одного киломоля любого идеального газа при нормальных физических условиях¹.

Теплоемкость рабочего тела зависит от характера процесса, поэтому тоже является функцией процесса. В различных процессах теплоемкость может принимать значения в пределах $-\infty < C < +\infty$.

При анализе термодинамических процессов, протекающих при постоянном объеме (изохорных), используют изохорную теплоемкость c_v , μc_v , c'_v , при анализе термодинамических процессов, протекающих при постоянном давлении (изобарных), используют изобарную теплоемкость c_p , μc_p , c'_p .

Используя выражения первого начала термодинамики, запишем:

$$c_v = \frac{dq_v}{dT} = \frac{du + pdv_0}{dT} = \frac{du}{dT}; \quad (1.23)$$

$$c_p = \frac{dq_p}{dT} = \frac{di + vdp}{dT} = \frac{di}{dT}. \quad (1.24)$$

Поскольку внутренняя энергия и энтальпия идеального газа зависят только от температуры, то их изменения в любом процессе можно рассчитать по формулам:

$$du = c_v dT \text{ или } u_2 - u_1 = \Delta u = \bar{c}_v (T_2 - T_1); \quad (1.25)$$

$$di = c_p dT \text{ или } i_2 - i_1 = \Delta i = \bar{c}_p (T_2 - T_1). \quad (1.26)$$

Связь между изобарной и изохорной теплоемкостями можно установить следующим образом. В изобарном процессе подведенная q_p теплота расходуется на изменение внутренней энергии и на совершение внешней работы, а в изохорном — теплота q_v расходуется только на изменение внутренней энергии. При нагревании 1 кг рабочего тела на одинаковую температуру разность между теплотой q_p и q_v будет равна работе, произведенной в процессе при $p = \text{const}$, т.е.

$$dq_p - dq_v = dl.$$

¹ В действительности объем одного киломоля газа при нормальных физических условиях отличается от $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$. Данное значение приблизительно соответствует объему одного киломоля двухатомных газов.

Для идеального газа работа в изобарном процессе может быть определена из уравнения состояния после дифференцирования последнего:

$$d(pv) = RdT \text{ или } pdv + vdp = RdT.$$

После подстановки значений dq_p и dq_v и сокращения на dT получаем

$$c_p - c_v = R. \quad (1.27)$$

Формула (1.27), устанавливающая связь между изобарной и изохорной теплоемкостями, называется *уравнением Майера*. Из нее вытекает также физический смысл газовой постоянной: *газовая постоянная R равна работе 1 кг газа в изобарном процессе при изменении его температуры на один кельвин (1 К)*. Разные газы в изобарном процессе производят неодинаковую работу.

Умножая обе части равенства (1.27) на молекулярную массу, получаем

$$\mu c_p - \mu c_v = \mu R \approx 8,314 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}). \quad (1.28)$$

Величина μR (или R_μ) называется *универсальной газовой постоянной*.

Из (1.28) следует, что разность молярных изобарной и изохорной теплоемкостей для идеальных газов является величиной постоянной.

При решении теплотехнических задач необходимо знать значения теплоемкостей различных газов. При невысоких температурах можно пользоваться значениями теплоемкостей, полученными на основе классической молекулярно-кинетической теории газов, согласно которой теплоемкость идеального газа зависит только от количества атомов в молекуле газа, характера процесса и не зависит от температуры.

Молярные теплоемкости идеальных газов в процессе, протекающем при постоянном объеме, имеют следующие значения:

$\mu c_v = 12,6 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ — одноатомные газы;

$\mu c_v = 20,9 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ — двухатомные газы;

$\mu c_v = 29 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ — трех- и многоатомные газы.

Молярная изобарная теплоемкость может быть рассчитана по формуле (1.28). Массовые и объемные теплоемкости идеальных газов определяют по (1.21) и (1.22).

Сравнивая приведенные значения теплоемкости с опытными данными, можно прийти к следующим выводам. Если для одноатомных газов приведенные значения теплоемкостей хорошо совпадают с опытными результатами, то для двухатомных газов такое совпадение наблюдается только при температурах 0–20°C. При более высоких температурах имеют место значительные расхождения в величинах теплоемкостей.

Для трех- и многоатомных газов значения теплоемкости, полученные на основании молекулярно-кинетической теории газов, даже при невысоких температурах резко отличаются от величин теплоемкости, определяемой опытным путем. Эти расхождения объясняются тем, что классическая молекулярно-кинетическая теория газов не учитывает внутреннюю энергию колебательного движения атомов внутри молекулы. Влияние ее на величину теплоемкости тем сильнее, чем больше число ато-

мов в молекуле и выше температура. Так, например, теплоемкость воздуха при 300°C по сравнению с теплоемкостью при 0°C увеличивается на 4%, а при 2000°C — почти на 25%. Еще больше увеличивается теплоемкость с повышением температуры у трехатомных газов.

В тепловых двигателях происходит значительное изменение температуры газа, поэтому необходимо учитывать зависимость теплоемкости от температуры:

$$c = f(t).$$

Эту зависимость находят экспериментальным путем, она имеет вид алгебраического многочлена:

$$c = a + bt + dt^2 + \dots, \quad (1.29)$$

где a, b, d — коэффициенты, определяемые опытным путем.

Как следует из (1.29) и рис. 1.1, в общем случае теплоемкость имеет криволинейную зависимость от температуры. Величины истинных и средних изохорных и изобарных теплоемкостей в зависимости от температуры приводятся в справочных таблицах. В них средние значения теплоемкостей дают для интервала температур от 0 до $t^\circ\text{C}$. Средние теплоемкости в интервале температур t_1 и t_2 с использованием таблиц вычисляют по формуле

$$\bar{c}_{t_1-t_2} = \frac{\bar{c}_{0-t_2}t_2 - \bar{c}_{0-t_1}t_1}{t_2 - t_1}, \quad (1.30)$$

где $\bar{c}_{0-t_1}, \bar{c}_{0-t_2}$ — средние табличные теплоемкости газа в интервале температур $(0-t_1)$ и $(0-t_2)$, °C.

В (1.30) числитель представляет собой количество теплоты, подводимой к газу с целью повышения его температуры от t_1 до t_2 , °C.

Часто в теплотехнических расчетах криволинейную зависимость теплоемкости от температуры заменяют близкой к ней прямолинейной зависимостью (рис. 1.1). В этом случае истинную теплоемкость определяют по следующей приближенной формуле:

$$c = a + bt. \quad (1.31)$$

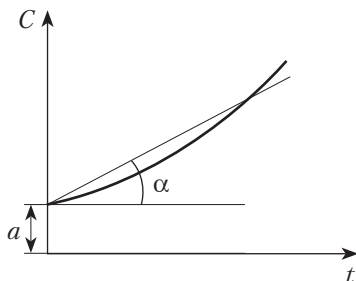


Рис. 1.1. Зависимость теплоемкости от температуры

Графически коэффициент a выражает теплоемкость газа при 0°C, а коэффициент b является тангенсом угла α наклона прямой. В таком слу-

чае среднюю теплоемкость газа в интервале температур от t_1 до t_2 находят по формуле

$$\bar{c}_{t_1-t_2} = \frac{c_1 + c_2}{2} = \frac{a + bt_1 + a + bt_2}{2} = a + \frac{b}{2}(t_1 + t_2). \quad (1.32)$$

Расчетные приближенные формулы для определения средних теплоемкостей при постоянном давлении для различных газов в интервале температур от 0 до 1000°C приведены в специальных таблицах. Использование (1.31) и (1.32) позволяет обойтись при расчетах без справочных таблиц.

На теплоемкость реальных газов влияет не только температура, но и давление.

Для определения теплоемкости смеси газов необходимо знать ее состав и значения теплоемкостей компонентов.

При нагреве смеси на 1°C каждый компонент также нагревается на 1°C. Следовательно, если смесь задана массовыми долями, то теплоемкость смеси, кДж/К,

$$C_{\text{см}} = M_{\text{см}}c_{\text{см}} = M_1c_1 + M_2c_2 + \dots + M_nc_n,$$

где $M_{\text{см}}$ — масса смеси, кг; $c_{\text{см}}$ — массовая теплоемкость смеси, кДж/(кг · К); M_1, M_2, \dots, M_n — массы компонентов, кг; c_1, c_2, \dots, c_n — массовые теплоемкости компонентов, кДж/(кг · К).

Разделив обе части последнего уравнения на $M_{\text{см}}$, получим

$$c_{\text{см}} = m_1c_1 + m_2c_2 + \dots + m_nc_n = \sum m_i c_i. \quad (1.33)$$

Если смесь задана объемными долями, то объемную теплоемкость 1 м³ смеси газов при нормальных физических условиях находят по формуле

$$c'_{\text{см}} = r_1c'_1 + r_2c'_2 + \dots + r_nc'_n = \sum r_i c'_i. \quad (1.34)$$

Мольную теплоемкость газовой смеси определяют по аналогичной формуле:

$$\mu c_{\text{см}} = r_1\mu c_1 + r_2\mu c_2 + \dots + r_n\mu c_n = \sum r_i \mu c_i. \quad (1.35)$$

1.5. Дифференциальные уравнения термодинамики. Термодинамические потенциалы

Дифференциальные уравнения термодинамики представляют систему равенств, полученных в результате совместного применения первого и второго начал (см. об этом подробнее в подпараграфе 1.6.2) термодинамики к равновесным процессам. Эти уравнения применимы к любым простым телам, состояние которых определяется двумя независимыми параметрами. Из общих дифференциальных уравнений можно получить частные решения, устанавливающие связь между различными функциями состояния. Так, по экспериментальным данным о двух параметрах состояния можно вычислить другие и найти уравнение состояния изучаемого рабочего тела

и, наоборот, по известному уравнению состояния можно установить связь между физическими свойствами рабочего тела (в том числе, например, значение удельной теплоемкости).

Теорию дифференциальных уравнений, в частности, широко используют при вычислении значений отдельных физических величин реального газа (удельные энтропия, энтальпия, теплоемкость), а также при составлении термодинамических таблиц.

Не останавливаясь подробно на выводах, рассмотрим пример.

Продифференцировав уравнение состояния $F(p, v, T) = 0$, после ряда математических операций получают дифференциальные уравнения, устанавливающие связь закона изменения удельных теплоемкостей c_p и c_v с параметрами состояния:

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = T \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v, \quad (1.36)$$

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = -T \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p \quad (1.37)$$

или общее выражение для дифференциала удельной энтропии:

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv, \quad (1.38)$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp. \quad (1.39)$$

Использование теории дифференциальных уравнений термодинамики позволяет оценить достоверность уравнений состояния реальных рабочих тел, полученных в результате обработки опытных данных о параметрах состояния и теплоемкостях. Примером может служить уравнение состояния водяного пара М. П. Вукаловича и Н. И. Новикова (см. об этом подробнее в параграфе 2.3.1).

Движущей силой любого процесса, происходящего в системе, является разность соответствующих потенциалов внутри и вне системы.

Термодинамическим потенциалом называется функция состояния, убыль которой в равновесном процессе равна работе, произведенной системой в определенных условиях. К таким термодинамическим функциям относятся:

1. *Внутренняя энергия (адиабатический потенциал) U ;*

$$dU = TdS - pdV.$$

2. *Свободная энергия (изотермический потенциал) F , называемая изо-хорно-изотермическим потенциалом*

$$F = U - TS,$$

или *энергией Гельмгольца*

$$dF = -SdT - pdV.$$