



ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие предназначается для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 270800 «Строительство» по профилям «Теплогазоснабжение и вентиляция», «Промышленное и гражданское строительство», «Водоснабжение и водоотведение», «Производство и применение строительных материалов и конструкций», «Профессиональное обучение и педагогика».

Учебное пособие написано в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта профессионального образования по направлению подготовки 270800 «Строительство».

Авторы поставили перед собой цель создать книгу небольшого объема, которая содержала бы весь круг вопросов, включенных в рабочую программу дисциплины «Основы гидравлики и теплотехники».

Учебное пособие с точки зрения системного подхода к изучению дисциплины разделено на три части.

В первой рассматриваются положения технической термодинамики, относящиеся к формам энергии и их преобразованиям в технических процессах. Общие соотношения классической термодинамики для макроскопических свойств веществ демонстрируются на примерах рассмотрения водяного пара и влажного воздуха.

Во второй части рассматриваются вопросы механики несжимаемой и сжимаемой жидкости, которые являются основой для расчета переноса механической энергии и свойств жидкости в изотермических потоках. Течение сжимаемой жидкости (газа) изучается как приложение термодинамики к поточным процессам.

В третьей части работы изложены основные положения теории тепломассообмена во всех его проявлениях: теплопроводность, естественная и вынужденная конвекция, излучение. Рассмотрены вопросы теплопередачи, а также теплообмен при фазовых превращениях, тепло- и массообмен в двухкомпонентных средах. Последняя глава третьей части знакомит читателя с некоторыми аспектами нестационарной теплопроводности.



КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ ТЕПЛОТЕХНИКИ И ГИДРАВЛИКИ

Основой термодинамики как науки можно считать опубликованный в 1824 г. французским военным инженером С. Карно его единственный трактат «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». В этой работе Карно впервые изложил проблему превращения теплоты в работу в общем виде, ввел понятия «идеальная машина» и «обратимый круговой процесс». Его выводы, отвлеченные от определенной конструкции машины и от конкретного рабочего тела, привели к открытию закономерности, которая теперь называется *вторым законом термодинамики*.

В записях Карно, опубликованных лишь спустя 10 лет после его смерти, уже содержится первая формулировка принципа эквивалентности теплоты и работы, в соответствии с которым теплота и работа взаимопревращаемы. Этот принцип был высказан лишь в 1842 г. немецким врачом Ю. Р. Майером, а затем в 1845 г. сформулирован им как *первый закон термодинамики*.

Дж. Джоуль в 1843–1848 гг. экспериментально подтвердил *первый закон термодинамики* путем многочисленных опытов.

В 1850 г. немецкому ученому Р. Клаузиусу на основе идей Карно, Майера и Джоуля удалось четко сформулировать оба закона термодинамики и дать количественную формулировку *первого закона термодинамики* в виде уравнения, связывающего теплоту и работу с внутренней энергией. При формулировке второго закона термодинамики

он ввел новую величину, которую назвал энтропией. Введенное Клаузиусом понятие энтропии занимает ключевое место в построении термодинамики. Утверждение *второго закона термодинамики* о направлении всех естественных процессов нашло проявление в *принципе возрастания энтропии*.

Независимо от Клаузиуса в 1851 г. У. Томсон (лорд Кельвин) дал другую формулировку *второго закона термодинамики*. Томсон показал, что из выводов *второго закона термодинамики* следует существование универсальной температурной шкалы, которая не зависит от свойств вещества. При этом он обосновал термодинамические соотношения для реализации абсолютной температурной шкалы, названной в его честь *шкалой Кельвина*.

Благодаря классическим работам Клаузиуса и Томсона к концу XIX в. термодинамика достигла в своем развитии определенной степени завершенности.

В середине XX столетия был разработан новый раздел термодинамики — *термодинамика необратимых процессов*, которая позволяет расширить и уточнить область применения термодинамических исследований.

Основоположником современной теории теплоты является великий русский ученый М. В. Ломоносов. В своей диссертации «Размышления о причине теплоты и холода», написанной в 1747–1748 гг., Ломоносов сформулировал основы механической теории теплоты. Тогда же Ломоносов впервые формулирует всеобщий закон сохранения материи и энергии.

Через 20 лет после Ломоносова французский химик А. Л. Лавуазье подтвердил закон сохранения материи.

Русский современник Ломоносова Г. В. Рихман провел ряд экспериментальных работ по теплопередаче и калориметрии, разработал метод смешения для определения теплоемкости тел, провел опытное исследование скорости испарения воды, открыл эффект «мокрого термометра», лежащий в основе метода определения влажности воздуха.

Французские ученые — математики Ж. Фурье и С. Пуассон создали основы математической теории теплопроводности.

Основной закон излучения был открыт экспериментально в 1872 г. Й. Стефаном, а теоретически был выведен на основе второго закона термодинамики Л. Больцманом в 1884 г.

Русский ученый Б. Б. Голицин на основании второго закона термодинамики доказал, что излучение оказывает давление на облучаемую поверхность. Экспериментально это явление подтвердил в своих опытах П. Н. Лебедев.

В 1893 г. В. Вин, пользуясь методами термодинамики, установил один из законов теплового излучения, связывающий длину волны, соответствующую максимальной интенсивности излучения черного тела, с абсолютной температурой излучающей поверхности.

М. Планк в 1902 г. теоретическим путем нашел зависимость распределения интенсивности теплового излучения по длинам волн при различных температурах, а Э. Ленц провел экспериментальные исследования, подтвердившие связь между коэффициентами теплопроводности и электропроводности металлов.

Зарождение отдельных представлений в области гидравлики следует отнести к глубокой древности. Они формировались на основе опыта, накопленного в Египте, Месопотамии, Греции и Китае в процессе гидротехнических работ. Устройства и машины, созданные Ктесибием и Героном, в Александрии были образцами для подражания в течение многих столетий. В Древней Греции впервые появился термин «гидравлика», первоначально обозначающий «искусство сооружения музыкальных инструментов типа органов, использующих вертикальные трубы, частично заполненные водой». Этимология термина связана с двумя греческими словами: «гидр» — вода и «авлос» — труба, трубка. В Древнем Риме сооружались сложные системы водоснабжения. Первым научным трудом по гидравлике считается работа Архимеда (287–212 гг. до н. э.) «О плавающих телах», содержащая его известный закон о равновесии тела, погруженного в жидкость.

Период средневековья обычно характеризуется как регресс. Однако именно в это время были созданы универсальные энергетические машины — водяные колеса различных

типов и размеров, послуживших основой промышленной революции Нового времени.

Эпоха Возрождения неразрывно связана, прежде всего, с именем Леонардо да Винчи (1452–1519), явившимся основоположником гидравлики как науки. Многие труды великого Леонардо стали известны сравнительно недавно, однако некоторые достижения в механике и гидротехнике (например, улучшение конструкции шлюзовых ворот) еще при его жизни повлияли на развитие европейской техники. Он написал труд «О движении воды в речных сооружениях», первый установил понятие сопротивления движению твердых тел в жидкостях и газах и положил начало экспериментальной гидравлике, поставив лабораторные опыты. Великий итальянский физик Галилео Галилей опубликовал в 1612 г. трактат по гидростатике «Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и о телах, которые в ней движутся». Он показал, что сила гидравлического сопротивления возрастает с увеличением скорости движущегося в жидкости твердого тела и с ростом плотности жидкой среды.

Период с начала XVII до конца XVIII в. является временем формирования теоретических основ механики жидкости и газа. Б. Кастелли, преподаватель математики в городах Пиза и Рим, четко изложил принцип неразрывности движения жидкости (уравнение расхода). Э. Торричелли, выдающийся математик и физик, изобрел ртутный барометр и установил формулу для истечения жидкости в виде закона подобия. Б. Паскаль (1623–1662) сформулировал основной закон гидростатики о независимости значения гидростатического давления от ориентировки поверхности в рассматриваемой точке. Он же показал возможность применения для измерения атмосферного давления различных жидкостей. И. Ньютон (1643–1727) установил квадратичный закон сопротивления при обтекании и дал описание закона вязкого трения в жидкости. Важный этап в становлении инженерного образования связан с созданием Л. Эйлером (1707–1783), Ж. Л. Д’Аламбером (1717–1783) и Ж. Л. Лагранжем (1736–1813) аналитической механики. Постепенно именно эта дисциплина стала

основой инженерного образования. Первоначально единый курс распался на теоретическую механику, сопротивление материалов и гидравлику. Д. Бернулли (1700–1782) впервые в 1738 г. ввел термин «гидродинамика». Так был назван и его знаменитый труд, изданный в Страсбурге. Его отец, И. Бернулли (1667–1748), опубликовал в 1743 г. трактат под названием «Гидравлика». Основополагающая работа Эйлера с выводом системы уравнений движения идеальной жидкости увидела свет в 1735 г.

Наибольшие успехи в рамках модели идеальной жидкости были достигнуты Г. Гельмгольцем и Г. Кирхгофом, разработавшим методы теории функции комплексной переменной. Дальнейшее развитие эти методы получили в работах Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина.

ЧАСТЬ I

ТЕХНИЧЕСКАЯ
ТЕРМОДИНАМИКА

ВВЕДЕНИЕ

Название науки «термодинамика» происходит от греческих слов «*термос*» — тепло и «*динамис*» — сила. Следовательно, само название определяет термодинамику как науку, изучающую вопросы, связанные с условиями взаимного преобразования тепловой и механической энергии в тепловых и холодильных установках.

В отличие от многих областей физики и химии, термодинамика не связана с представлением о молекулярной структуре вещества.

Термодинамика основывается на двух экспериментально установленных законах, получивших название первого и второго начал термодинамики.

Первое начало термодинамики характеризует количественную сторону процессов превращения энергии, т. е. представляет собой приложение к тепловым явлениям всеобщего закона природы — закона сохранения и превращения энергии.

Второе начало термодинамики устанавливает качественную сторону, т. е. характеризует направления макроскопических процессов, происходящих в физических системах.

Задача термодинамики состоит в исследовании макроскопических свойств реальных газов и паров в состоянии равновесия, а также процессов, происходящих с ними вследствие внешнего воздействия. Предметом изучения являются результаты этого воздействия, т. е. конечное состояние, достигаемое телом, произведенная работа и количество поглощенной телом теплоты.

Законы технической термодинамики применяются к процессам взаимного превращения теплоты и работы, что дает возможность разрабатывать теорию тепловых двигателей и позволяет выявлять их экономичность.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1.1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Объектом изучения термодинамики являются различные термодинамические системы. *Термодинамической системой* называют совокупность материальных тел, находящихся в механическом и тепловом взаимодействии друг с другом и окружающей средой.

Термодинамическую систему, которая не может обмениваться теплотой с окружающей средой, называют *теплоизолированной*, или *адиабатной, системой*. Примером теплоизолированной системы является рабочее тело, находящееся в сосуде, стенки которого покрыты идеальной тепловой изоляцией, исключающей теплообмен между рабочим телом и окружающей средой. Такую теплоизолирующую оболочку называют *адиабатической*.

Если термодинамическая система не взаимодействует с окружающей средой, то ее называют *изолированной*, или *замкнутой*.

Система, имеющая во всех своих частях одинаковый состав и физические свойства, называется *физически однородной*.

Однородная система, внутри которой нет поверхностей раздела, называется *гомогенной* (например, лед, вода, пар, газы).

Система, состоящая из нескольких однородных макроскопических частей с различными физическими свойствами, отделенных друг от друга видимыми поверхностями раздела, называется *гетерогенной* (например, вода и пар).

Различные части, из которых состоит эта система, называются *фазами*. Различают газообразную, жидкую и твердую (кристаллическую) фазы.

Макроскопические величины, характеризующие состояние системы, называют *термодинамическими параметрами*.

1.2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ

К числу основных термодинамических параметров относятся абсолютная температура, абсолютное давление и объем.

Температура определяет направление перехода теплоты. Как хорошо известно из опыта, теплота самопроизвольно может переходить лишь от более нагретого тела к менее нагретому, т. е. от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой. Таким образом, температура определяет направление перехода теплоты и характеризует степень нагретости тел.

Согласно молекулярно-кинетической теории газов, абсолютная температура идеального газа T пропорциональна средней кинетической энергии поступательного движения молекул:

$$\frac{m\bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2}kT, \quad (1.1)$$

где m — масса молекулы; \bar{u} — средняя скорость поступательного движения молекул; k — постоянная Больцмана, равная $1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/град.

Как видно, абсолютная температура принимает значение $T = 0$, если скорость движения молекул $u = 0$, что невозможно.

Впервые на недостижимость абсолютного нуля указал Ломоносов.

Для измерения температур используют свойство тел менять свое состояние (расширение тел от нагревания в жидкостных термометрах, изменение объема при постоянном давлении или изменение давления при постоянном объеме в газовых термометрах, изменение электрического сопротивления проводника при нагревании в термомет-

рах сопротивления, изменение электродвижущей силы в цепи термопары при нагреве или охлаждении ее спая).

Наиболее рациональной температурной шкалой является так называемая абсолютная, или термодинамическая, шкала температур, предложенная Кельвином в 1848 г. Температура, измеренная по этой шкале, обозначается T К.

Практическим осуществлением абсолютной шкалы является международная стоградусная шкала, в которой температура плавления льда и температура кипения химически чистой воды при нормальном атмосферном давлении обозначены соответственно 0 и 100°. Измеренная по этой шкале температура обозначается $t^\circ\text{C}$ (градусы Цельсия).

Связь между этими шкалами устанавливается следующим соотношением:

$$T \text{ К} = t^\circ\text{C} + 273,15, \quad (1.2)$$

из которого следует, что абсолютный нуль температуры равен $-273,15^\circ\text{C}$.

Абсолютное давление представляет собой силу, действующую по нормали к поверхности тела, отнесенную к единице площади этой поверхности. С точки зрения молекулярно-кинетической теории давление есть средний результат ударов молекул газа, находящихся в непрерывно хаотическом движении, о стенки сосуда, в котором заключен газ:

$$p = \alpha n k T, \quad (1.3)$$

где n — число молекул в единице объема; α — коэффициент сжимаемости, который является функцией температуры; k — константа Больцмана, равная $1,37 \cdot 10^{-16}$ эрг/град.

Таким образом, давление p будет тем больше, чем выше абсолютная температура тела и чем больше число молекул в единице объема n .

В формулах термодинамики всегда применяется абсолютное давление, измеренное в паскалях (Па), которое представляет собой давление, вызываемое силой в один ньютон (Н), равномерно распределенной по поверхности

площадью 1 м^2 . Наряду с паскалем для измерения давления применяются различные единицы: бар, атмосфера, высота жидкого столба (ртутного, водяного, спиртового).

Удельный объем. Удельным объемом однородного вещества называется объем, занимаемый единицей массы этого вещества. В технической термодинамике удельный объем обозначается v и измеряется в $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$v = \frac{V}{m}, \quad (1.4)$$

где V — объем произвольного количества вещества, м^3 ; m — масса этого вещества, кг.

Плотность тела определяется как масса единицы объема и измеряется в $\text{кг}/\text{м}^3$:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.5)$$

Удельный объем есть величина, обратная плотности, т. е.

$$v = \frac{1}{\rho}; \quad v\rho = 1. \quad (1.6)$$

1.3. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Идеальными газами называются такие, в которых отсутствуют силы взаимного притяжения и отталкивания между молекулами, а объем самих молекул пренебрежимо мал по сравнению с объемом газа. На основе этой схемы можно составить простые математические зависимости между параметрами состояния газа и на их основе изучить термодинамические процессы.

Зависимость между удельным объемом и абсолютным давлением идеального газа в процессе при постоянной температуре устанавливает закон Бойля — Мариотта:

$$pv = \text{const}. \quad (1.7)$$

Гей-Люссак показал, что при постоянном давлении объемы одного и того же количества идеального газа из-

меняются прямо пропорционально абсолютным температурам:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (1.8)$$

На основе этих уравнений было получено соотношение, однозначно связывающее между собой параметры p , v , T газа, т. е. уравнение состояния идеального газа, которое называется уравнением Клапейрона. В технической термодинамике оно используется в трех формах.

Уравнение Клапейрона для 1 кг газа:

$$pv = RT, \quad (1.9)$$

где p — абсолютное давление, Па; v — удельный объем, м³/кг; T — абсолютная температура, К; R — газовая постоянная для 1 кг газа, Дж/кг·К.

Газовая постоянная зависит только от свойств газа и является индивидуальной величиной для каждого газа.

Уравнение Клапейрона для произвольной массы газа m кг запишется так:

$$pV = mRT. \quad (1.10)$$

Согласно закону Авогадро, в равных объемах разных идеальных газов, находящихся при одинаковых температурах и одинаковых давлениях, заключено равное число молекул. Из этого закона следует, что отношение массовых количеств разных идеальных газов при этих же условиях равно отношению молекулярных масс этих газов.

Введем понятия о моле и киломоле. *Моле* называется количество вещества в граммах, численно равное его молекулярной массе, а *киломоле* — количество вещества в килограммах, численно равное его молекулярной массе. Так, например, киломоль кислорода (O_2) равен 32 кг, киломоль углекислого газа (CO_2) равен 44 кг и т. д.

Второе следствие, вытекающее из закона Авогадро, гласит: *объемы молей разных газов, взятых при одинаковых температурах и давлениях, равны между собой*, т. е.

$$\mu v = \text{const}, \quad (1.11)$$

где μ — молекулярная масса газа, кг; v — удельный объем газа, м³/кг.

Объем одного киломоля идеального газа при нормальных физических условиях ($p = 101\,325$ Па, $T = 273$ К) $\mu v = 22,4$ м³/кмоль. Таким образом, объем одного киломоля при одних и тех же условиях для всех идеальных газов одинаков.

Напишем уравнение состояния для 1 киломоля газа:

$$p\mu v = \mu RT, \quad (1.12)$$

откуда

$$\mu R = \frac{p\mu v}{T}. \quad (1.13)$$

Произведение μR называется *универсальной газовой постоянной* и является работой, которую нужно совершить над 1 киломоля идеального газа, чтобы изменить его температуру на 1°С. Если в это уравнение подставить значения давления и температуры при нормальных физических условиях и объем одного киломоля газа, то получим

$$\mu R = \frac{101\,325 \cdot 22,4}{273} = 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{К}. \quad (1.14)$$

Тогда универсальное уравнение состояния, отнесенное к 1 киломолю газа, имеет следующий вид:

$$p\mu v = 8314 T. \quad (1.15)$$

Это уравнение называют уравнением состояния Клапейрона — Менделеева, оно является наиболее общим для идеальных газов, так как связывает три закона (Бойля — Мариотта, Гей-Люссака и Авогадро) и включает универсальную газовую постоянную, не зависящую от природы газа. Зная универсальную газовую постоянную μR , можно подсчитать значение газовой постоянной:

$$R = \frac{8314}{\mu}, \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}. \quad (1.16)$$

1.4.

СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

В технической термодинамике часто используются понятия чистого вещества и смеси. Чистым веществом называется вещество, все молекулы которого одинаковы (вода, азот, этиловый спирт, железо и т. д.). Примерами

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru