

Нащокин В. В.

**Техническая термодинамика
и теплопередача**

Научно-популярный, физика

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Н37

Н37 **Нащокин В. В.**
Техническая термодинамика и теплопередача: Научно-популярный, физика /
Нащокин В. В. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 496 с.

ISBN 978-5-458-30766-6

В книге излагаются основы технической термодинамики и теплопередачи. В первой части изложены законы термодинамики и их приложение к анализу циклов тепловых двигателей, газотурбинных, паротурбинных и холодильных установок. Во второй части изложены физические основы теплообмена. Рассмотрены элементарные способы передачи теплоты. Кратко изложено приложение общей теории тепло- и массообмена к изучению процессов во влажных коллоидных капиллярно-пористых телах. В книге даны контрольные вопросы и некоторое количество решенных задач. Книга написана с использованием международной системы единиц.

ISBN 978-5-458-30766-6

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

Часть первая

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Глава I

ВВЕДЕНИЕ

§ 1-1. Энергетика и ее значение в народном хозяйстве СССР

С первых дней жизни Советского государства Коммунистическая партия СССР придавала огромное значение претворению в жизнь Ленинского учения об электрификации всей страны.

«Коммунизм, — говорил В. И. Ленин, — это есть советская власть плюс электрификация всей страны»*, поэтому ленинская идея сплошной электрификации — стержень всей программы строительства экономики коммунизма.

Еще в 1921 г. под руководством В. И. Ленина был разработан первый план электрификации России — план ГОЭЛРО, сыгравший огромную роль в развитии энергетики СССР. В. И. Ленин назвал этот план второй программой партии. По плану ГОЭЛРО предусматривалась постройка в течение пятнадцати лет 20 тепловых и 10 гидроэлектростанций общей мощностью 1850 тыс. *квт*. Выработку электроэнергии намечалось довести до 8,8 млрд. *квт·ч* в год. Этот план был выполнен досрочно.

Уже в 1960 г. мощность всех электростанций составила почти 67 млн. *квт*, а в 1970 г. — 166 млн. *квт* с выработкой электроэнергии около 740 млрд. *квт·ч*.

В настоящее время электроэнергия вырабатывается главным образом на тепловых электростанциях при сжигании химического топлива: каменного угля, жидкого и газообразного топлива. В СССР в 1970 г. тепловые электростанции выработали 84% от общей выработки электроэнергии. Ведущую роль тепловые электростанции сохраняют и в настоящее время.

В предстоящем пятилетии прирост мощности на тепловых электростанциях намечается за счет установки энергетических блоков мощностью по 300, 500 и 800 тыс. *квт*. Будут проходить испытания блоков мощностью 1200 тыс. *квт*.

Народнохозяйственное значение этих мощных агрегатов очень велико, так как они дают возможность получать большую экономию топлива.

* Ленин В. И. Полн. собр. соч. Изд. 5-е, т. 42, с. 159.

До 1941 г. в СССР на тепловых электростанциях в основном использовался пар давлением 25—30 ат и температурой перегрева 400—425° С. После второй мировой войны на теплоэлектростанциях в качестве основных параметров применяли пар с давлением 90 ат и температурой 500—525° С. Переход с пара давлением 30 ат на пар давлением в 90 ат дал народному хозяйству экономию топлива 12—15%.

В 1959 г. на некоторых новых электростанциях применяли пар высоких параметров — давлением 170 ат и температурой 550° С.

В период 1961—1965 гг. осуществилось дальнейшее увеличение параметров пара; было построено большое количество котлоагрегатов на давление 240 ат и температуру 565—580° С. Такие турбины на 20% экономичнее паровых турбин, имеющих давление 90 ат и температуру 500° С.

С переходом работы котлов на более высокие параметры (температуры до 600° С и давления пара 300 бар и выше) и увеличения мощности отдельных блоков технико-экономические показатели тепловых электростанций непрерывно улучшаются; к. п. д. лучших паротурбинных станций достигает 40%, что является для паротурбинных установок почти предельной величиной. Более высокие к. п. д. могут дать только комбинированные парогазовые установки, в которых паровая турбина дополняется газовой. Эти установки имеют наибольшую перспективу применения (см. гл. XX).

Большое народнохозяйственное значение будет иметь внедрение в практику новых методов получения электроэнергии, над которыми в настоящее время работают советские ученые. Будут практически осваиваться генераторы электроэнергии на магнитогидродинамическом принципе, т. е. на использовании энергии плазмы.

Создание высокотемпературных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей позволит непосредственно превращать теплоту в электрическую энергию с к. п. д. до 15—20%.

Будет решаться актуальная проблема непосредственного преобразования химической энергии топлива в электрическую. В результате ее решения можно ожидать появления новых источников тока и электрохимических генераторов энергии. Первые образцы электрохимических генераторов электротока, работающих на газообразном водороде и кислороде, уже созданы в нашей стране. Они подтверждают высокую эффективность прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую. К. п. д. их достигает 80%, что намного выше эффективности существующих сейчас тепловых электростанций.

Получат широкое распространение газотурбинные установки.

С 1940 г. по развитию теплофикации СССР занимает первое место в мире. Примерно 30% всей электрической мощности тепловых электростанций приходится на теплоэлектроцентрали. Комбинированная выработка теплоты и электрической энергии на теплоэлектроцентралях позволяет получить значительную экономию топлива, и на будущее время она остается важнейшим направлением развития энергетики СССР.

Грандиозные перспективы развития советской теплоэнергетики ставят перед термодинамикой обширные задачи по исследованию теп-

лофизических свойств воды и водяного пара при сверхвысоких давлениях — до 2000 бар и температурах пара до 1000° С. Методы этих исследований можно будет распространить и на определение теплофизических свойств других рабочих тел, которые будут применяться на новых атомных и тепловых электростанциях, в химической и других отраслях промышленности.

Будут проведены большие работы по исследованию углекислоты в широком интервале температур и давлений. Применение углекислоты в парогазовом цикле открывает большие перспективы в получении высоких к. п. д. и, следовательно, позволит резко уменьшить расход топлива на единицу установленной мощности.

Широкое развитие получают работы, связанные с тепловыми насосами, с производством холода и с использованием термоядерной энергии на электростанциях. Список вопросов, в которых термодинамика имеет решающее значение, можно продолжить и далее, но и из этих примеров видно огромное значение теоретических основ теплотехники.

§ 1-2. Предмет технической термодинамики и ее задачи

Термодинамика, являясь разделом теоретической физики, представляет собой одну из самых обширных областей современного естествознания — науку о превращениях различных видов энергии друг в друга. Это наука рассматривает самые разнообразные явления природы и охватывает огромную область химических, механических и физико-химических явлений.

Термодинамика в настоящее время может быть разделена на три части:

общую термодинамику, или физическую термодинамику, изучающую процессы превращения энергии в твердых, жидких и газообразных телах, излучение различных тел, магнитные и электрические явления, а также устанавливающую математические зависимости между термодинамическими величинами;

химическую термодинамику, которая на основе законов общей термодинамики изучает химические, тепловые, физико-химические процессы, равновесие и влияние на равновесие внешних условий;

техническую термодинамику, рассматривающую закономерности взаимного превращения теплоты в работу. Она устанавливает взаимосвязь между тепловыми, механическими и химическими процессами, которые совершаются в тепловых и холодильных машинах, изучает процессы, происходящие в газах и парах, а также свойства этих тел при различных физических условиях.

Термодинамика базируется на двух основных законах, получивших название начал термодинамики.

Первое начало термодинамики представляет собой приложение к тепловым явлениям всеобщего закона природы — закона превращения и сохранения энергии.

Второе начало термодинамики устанавливает условия протекания

и направленность макроскопических процессов в системах, состоящих из большого количества частиц. Поэтому второе начало термодинамики имеет более ограниченное применение, нежели первое.

В начале XX в. два начала термодинамики были дополнены еще одним опытным положением, получившим название тепловой теоремы Нернста. Эта теорема, позволяющая определить свойства тел при очень низких температурах, используется главным образом в химической термодинамике и имеет ограниченное применение.

Техническая термодинамика начала развиваться с 20-х годов прошлого столетия, но, несмотря на свою сравнительную молодость, она заслуженно занимает в настоящее время одно из центральных мест среди физических и технических дисциплин.

В теоретической части техническая термодинамика является общим отделом. науки об энергии, а в прикладной части представляет собой теоретический фундамент всей теплотехники, изучающей процессы, протекающие в тепловых двигателях.

В термодинамике используются два метода исследования: метод круговых процессов и метод термодинамических функций и геометрических построений. Последний метод был разработан и изложен в классических работах Гиббса. Этот метод получил за последнее время широкое распространение.

В начале второй половины XVIII в. была решена очень важная техническая задача — был создан универсальный тепловой двигатель для промышленности и транспорта. Первую паровую машину изобрел русский инженер И. И. Ползунов. Она была построена уже после его смерти в 1766 г., т. е. почти за 20 лет до паровой машины Джемса Уатта. И. И. Ползунов не только создал первую в мире паровую машину, но и изобрел к ней распределительное устройство и впервые осуществил автоматическое питание парового котла.

До 50-х годов XIX столетия наука рассматривала теплоту как особое, невесомое, неуничтожаемое и несоздаваемое вещество — теплород. Одним из первых, кто опроверг эту теорию, был М. В. Ломоносов. В 1744 г. в своей диссертации «Размышление о причине теплоты и холода» он писал, что теплота состоит во внутреннем движении собственной материи и указывал, что огонь и теплота состоят во вращательном движении частиц, из которых состоят все тела. Тем самым в своих работах М. В. Ломоносов заложил основы механической теории теплоты. Однако Ломоносов не был понят современниками. Еще долгое время физики продолжали толковать о теплороде. Только к середине XIX в. механическая теория теплоты в результате работ целого ряда ученых находит повсеместное признание, становится основой всей термодинамики и энергетики.

Открытие закона сохранения и превращения энергии, этого основного закона естествознания, как указывал неоднократно Энгельс, оказало решающее влияние на все последующее развитие не только физики, но и всего естествознания в целом. Энгельс относит это открытие к числу трех великих естественнонаучных открытий XIX в., благодаря которым был обоснован по существу диалектико-материалистический взгляд на природу.

Одним из первых высказал идею закона сохранения энергии М. В. Ломоносов. В работе «Рассуждение о твердости и жидкости тел», в письме к Эйлеру от 5 июля 1747 г. Ломоносов писал: «Все перемены в натуре случающиеся, такого суть состояния, что сколько чего у одного тела отнимается, столько же присовокупляется к другому. Так, где убудет несколько материи, то умножится в другом месте... Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения: ибо тело, движущее своей силой другое, столько же оныя у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает».

В данной формулировке Ломоносова еще не содержится количественных соотношений, но, несмотря на это, отчетливо и полно определяется сущность закона сохранения и превращения энергии. Только через столетие благодаря работам Лавуазье, Майера, Гельмгольца и других этот закон получил всеобщее признание. Отдавая должное гениальному предвидению М. В. Ломоносова, закон сохранения и превращения энергии часто называют его именем.

В 1840 г. химик, русский академик Г. Гесс сформулировал принцип сохранения энергии применительно к химическим процессам. В дальнейшем целая плеяда русских и советских ученых теоретиков своими работами значительно расширила учение о теплоте и внесла большой вклад в развитие термодинамики.

Техническая термодинамика, применяя основные законы к процессам превращения теплоты в механическую работу и механической работы в теплоту, дает возможность разрабатывать теорию тепловых двигателей, исследовать процессы, протекающие в них, и позволяет выявлять их экономичность для каждого типа отдельно.

§ 1-3. Международная система единиц (СИ)

С 1963 г. ГОСТ 9867—61 была введена в СССР как предпочтительная Международная абсолютная система единиц (СИ) для всех отраслей науки и техники.

Основными единицами в этой системе приняты: единица длины — метр (м), единица массы — килограмм (кг), единица времени — секунда (сек), температура термодинамическая — градус Кельвина (°К). Все остальные единицы являются производными от основных.

За единицу количества энергии (в том числе теплоты и работы) принят абсолютный джоуль (дж), равный работе постоянной силы в 1 н на пути в 1 м при совпадении направлений силы и перемещения точки приложения силы ($1 \text{ дж} = 1 \text{ н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{сек}^2$).

ГОСТ 8550—61 временно разрешает пользоваться внесистемной единицей энергии — килокалорией ($1 \text{ ккал} = 4,1868 \cdot 10^3 \text{ дж}$).

Единица мощности ватт (вт) соответствует работе 1 дж в 1 сек (дж/сек).

В табл. 1-1 приведены соотношения между различными единицами измерения энергии.

Таблица 1-1

| Единицы измерения | Килоджоуль | Килокалория | Килограммометр | Киловатт-час |
|---------------------------------|------------|-------------|----------------|--------------|
| Килоджоуль (кдж) | 1 | 0,239 | 102,0 | 0,000278 |
| Килокалория (ккал) | 4,1868 | 1 | 427 | 0,00116 |
| Килограммометр (кг·м) | 0,00981 | 0,00234 | 1 | 0,00000272 |
| Киловатт-час (квт·ч) | 3600 | 860 | 367200 | 1 |
| Л. с.-час (л.с.ч) | 2647,8 | 632,3 | 270000 | 0,736 |

§ 1-4. Основные термодинамические параметры состояния

Предметом технической термодинамики является главным образом изучение процессов взаимного преобразования теплоты и работы в различных тепловых машинах.

В тепловых двигателях преобразование теплоты в работу осуществляется с помощью так называемого рабочего тела. Например, в двигателях внутреннего сгорания, а также в газотурбинных установках рассматриваются процессы, в которых рабочим телом является газ. В паровых двигателях рассматриваются процессы, в которых рабочим телом является пар, легко переходящий из парообразного состояния в жидкое и, наоборот, из жидкого в парообразное.

Физическое состояние тела вполне определяется некоторыми величинами, характеризующими данное состояние, которые в термодинамике называют *параметрами состояния*.

Параметрами состояния может быть целый ряд величин: удельный объем, давление, температура, внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, концентрация, изохорно-изотермный потенциал и др.

Однако при отсутствии силовых полей (гравитационного, электромагнитного и др.) состояние однородного тела может быть однозначно определено тремя параметрами, в качестве которых в технической термодинамике принимают удельный объем, абсолютную температуру и давление.

Эти три параметра, называемые обычно *основными*, не являются независимыми величинами и, как будет показано далее, связаны между собой вполне определенными математическими зависимостями.

У д е л ь н ы й о б ь е м. Удельным объемом однородного вещества называется объем, занимаемый единицей массы данного вещества. В технической термодинамике удельный объем обозначается v и измеряется в $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$v = V/m,$$

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

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

$$\rho = m/V.$$

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

$$v = 1/\rho; \rho = 1/v; v\rho = 1.$$

Д а в л е н и е. Давление с точки зрения молекулярно-кинетической теории есть средний результат ударов молекул газа, находящихся в непрерывном хаотическом движении, о стенки сосуда, в котором заключен газ, и представляет собой нормальную составляющую силы, действующей на единицу поверхности.

В СИ давление измеряется в ньютонах на квадратный метр (н/м^2).

В практических расчетах возможно применение кратных и дольных единиц измерения давления: килоньютон на 1 м^2 (кн/м^2), меганьютон на 1 м^2 (Мн/м^2); часто давление измеряется во внесистемных единицах — барах ($1 \text{ бар} = 10^5 \text{ н/м}^2$). Однако необходимо помнить, что во все термодинамические формулы давление должно подставляться в ньютонах на квадратный метр (н/м^2).

Давление может измеряться столбом жидкости — ртути, воды, спирта и др., уравнивающим давление газа. На рис. 1-1 изображен сосуд с газом. К стенке сосуда припаяна изогнутая трубка, наполненная какой-либо жидкостью. Давление в сосуде p_1 , а атмосферное давление p_0 , при этом $p_1 > p_0$. Под действием разности давлений $p_1 - p_0$ жидкость в правом колене поднимется и уравнивает избыток давления в сосуде. Отсюда можно написать равенство

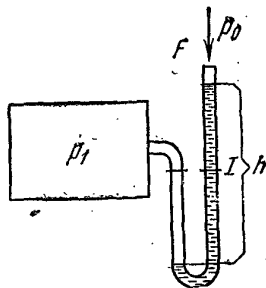


Рис. 1-1

откуда

$$p_1 F = p_0 F + h F \rho g,$$

$$h = \frac{p_1 - p_0}{\rho g}.$$

Высота столба жидкости h прямо пропорциональна разности давлений в сосуде и наружной среды и обратно пропорциональна плотности жидкости.

Если разность давлений принять равной 1 бар, то высота h при наполнении трубки ртутью равна

$$h = \frac{10 \cdot 10^4}{13595,10 \cdot 9,81} = 750,10 \text{ мм рт. ст.},$$

где $\rho = 13595,10 \text{ кг/м}^3$ — плотность ртути при 0°C ; $g \cong 9,81 \text{ м/сек}^2$ — ускорение свободного падения (берется для данной точки поверхности Земли).

При наполнении трубки водой высота равна

$$h = \frac{10 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9,81} = 10,20 \text{ м.}$$

Для измерения давлений применяют барометры и манометры, а для измерения разрежения — вакуумметры. Барометрами измеряют атмосферное давление, а манометрами — давление, превышающее атмосферное. Давление, превышающее атмосферное, называют *избыточным*.

Термодинамическим параметром состояния является только абсолютное давление. *Абсолютным давлением* называют давление, отсчитываемое от абсолютного нуля давления или от абсолютного вакуума. При определении абсолютного давления различают два случая:

1) когда давление в сосуде больше атмосферного и 2) когда оно меньше атмосферного. В первом случае абсолютное давление в сосуде равно сумме показаний манометра и барометра (рис. 1-2):

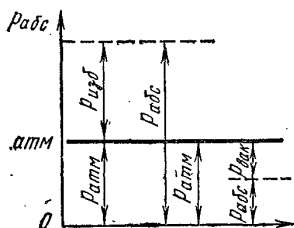


Рис. 1-2

$$p_{абс} = p_{изб} + p_{атм}$$

Если величина барометрического давления неизвестна, то при выражении давления в барах абсолютное давление $p_{абс} \approx p_{изб} + 1$.

Во втором случае абсолютное давление в сосуде равно показанию барометра минус показание вакуумметра (рис. 1-2):

$$p_{абс} = p_{атм} - p_{вак}$$

Избыточное давление и разрежение не являются параметрами состояния, так как они при одном и том же абсолютном давлении могут принимать различные значения в зависимости от величины атмосферного давления.

Поскольку ГОСТ 9867—61 допускает временно применять и старые единицы измерения, в табл. 1-2 приводятся для справок соотношения между различными единицами измерения давления.

Таблица 1-2

| | Физическая атмосфера (атм) | Техническая атмосфера (1 ат=1 кг/см ²) | Бар (бар) | Миллиметры ртутного столба (мм рт. ст) |
|-------------------------------------|----------------------------|--|-----------|--|
| 1 атм | 1 | 1,0332 | 1,0132 | 760,0 |
| 1 ат | 0,9678 | 1 | 0,9807 | 735,5 |
| 1 бар | 0,9869 | 1,0197 | 1 | 750,1 |
| 10 ³ мм рт. ст | 1,3158 | 1,3595 | 1,3332 | 1000 |

Температура. Температура, характеризуя степень нагретости тел, представляет собой меру средней кинетической энергии поступательного движения его молекул, т. е. температура характеризует среднюю интенсивность движения молекул, и чем больше средняя скорость движения молекул, тем выше температура тела. Понятие температуры не может быть применено к одной или нескольким молекулам. Если два тела с различными средними кинетическими энергиями движения молекул привести в соприкосновение, то тело с большей средней кинетической энергией молекул (с большей температурой) будет отдавать энергию телу с меньшей средней кинетической энергией молекул (с меньшей температурой), и этот процесс будет протекать до тех пор, пока средние кинетические энергии молекул обоих тел не

сравниваются, т. е. не выравниваются температуры обоих тел. Такое состояние двух тел называется *тепловым равновесием*.

Кинетическая теория материи при тепловом равновесии связывает среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул $m\bar{w}^2/2$ с абсолютной температурой идеального газа T и устанавливает между этими величинами прямую связь

$$m\bar{w}^2/2 = 3/2 \kappa T,$$

где m — масса молекулы; \bar{w} — средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул; T — абсолютная температура; κ — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ дж/град.

Абсолютная температура всегда величина положительная. При температуре абсолютного нуля ($T = 0$) прекращается тепловое движение молекул ($\bar{w} = 0$). Эта предельная минимальная температура и является началом для отсчета абсолютных температур.

В технике для измерения температур используют различные свойства тел: 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 термометрах сопротивления; изменение электродвижущей силы в цепи термопары при нагревании или охлаждении ее спая. При измерении высоких температур оптическими пирометрами используются законы излучения твердых тел и методы сравнения раскаленной нити с исследуемым материалом.

ГОСТ 8550—61 предусматривает применение двух температурных шкал: термодинамической температурной шкалы, основанной на втором законе термодинамики, и международной практической температурной шкалы, являющейся практическим осуществлением термодинамической температурной шкалы с помощью реперных (опорных) точек и интерполяционных уравнений.

Измерение температур в каждой из этих шкал может производиться как в градусах Кельвина ($^{\circ}\text{K}$), так и в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) в зависимости от принятого начала отсчета (положения нуля) по шкале.

В так называемой тройной точке воды, т. е. в точке, где жидкая, парообразная и твердая фазы находятся в устойчивом равновесии, температура в градусах Кельвина равна $273,16^{\circ}\text{K}$ (точно), а в градусах Цельсия $0,01^{\circ}\text{C}$.

Следовательно, между температурами, выраженными в градусах Кельвина и градусах Цельсия, имеется следующее соотношение:

$$t^{\circ}\text{K} = 273,15 + t^{\circ}\text{C}.$$

Параметром состояния является абсолютная температура, измеряемая в градусах Кельвина. Градус абсолютной шкалы численно равен градусу шкалы Цельсия, так что $dT = dt$.

§ 1-5. Термодинамическая система

В любом явлении природы участвует множество различных тел, так или иначе связанных между собой. При термодинамическом изучении какого-либо явления в качестве объекта исследования выделяется группа тел или единичное тело, или даже отдельные его части. Объект изучения называется *термодинамической системой*, а все, что лежит вне его границ, — *окружающей средой*. Термодинамической системой называется совокупность макроскопических тел, обменивающихся энергией как друг с другом, так и с окружающей (внешней) средой.

Простейшим примером термодинамической системы (тела) может служить газ, находящийся в цилиндре с поршнем. К окружающей среде следует отнести цилиндр и поршень, воздух, который окружает их, стены помещения, где находится цилиндр с поршнем, и т. д.

Если термодинамическая система не имеет никаких взаимодействий с окружающей средой, то ее называют *изолированной*, или замкнутой, *системой*.

Система, окруженная так называемой адиабатной оболочкой, исключаящей теплообмен с окружающей средой, называется *теплоизолированной*, или адиабатной, *системой*. Примером теплоизолированной системы является рабочее тело, находящееся в сосуде, стенки которого покрыты идеальной тепловой изоляцией, исключаящей теплообмен между рабочим телом и окружающей средой.

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

Однородная термодинамическая система (как по составу, так и по физическому строению), внутри которой нет поверхностей раздела, называется *гомогенной* (например, лед, вода, газы).

Система, состоящая из нескольких макроскопических частей с различными физическими свойствами, отделенных одна от другой видимыми поверхностями раздела, называется *гетерогенной* (например, лед и вода, вода и пар и др.).

Гомогенные части системы, отделенные от остальных частей видимыми поверхностями раздела, называются *фазами*. В зависимости от числа фаз гетерогенные системы называются *двухфазными* и *трехфазными* (газообразное, жидкое и твердое состояние). *Компонентом* термодинамической системы называют всякую химически однородную систему.

§ 1-6. Термодинамический процесс

Основные термодинамические параметры состояния p , v и T однородного тела зависят один от другого и взаимно связаны определенным математическим уравнением вида

$$F(p, v, T) = 0,$$

которое в термодинамике называют *уравнением состояния*. Если известно уравнение состояния, то для определения состояния простейших систем — однородных и постоянных по времени, по массе и по со-