

Глава 8. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 33. Внутренняя энергия



Ключевые понятия: термодинамика, термодинамическая система, термодинамический процесс, внутренняя энергия, кинетическая и потенциальная энергии микрочастиц, идеальный газ, универсальная газовая постоянная, многоатомные газы, число степеней свободы, поступательное и вращательное движения молекулы.

На этом уроке вы: узнаете о двух методах изучения тепловых явлений; узнаете, что включает в себя понятие внутренней энергии тела; научитесь рассчитывать внутреннюю энергию идеального газа.

Тепловые явления и два метода их изучения. Нам уже известно, что *физические процессы, протекающие в телах при их нагревании или охлаждении, называются тепловыми явлениями*. Исторически сложилось так, что тепловые явления в физике изучаются с двух точек зрения: *термодинамической и молекулярно-кинетической*.

К концу XIX в. оформилась наука, получившая название **термодинамика**. Она возникла как раздел физики, изучающий оптимальные способы преобразования теплоты в механическую работу. В основе термодинамики лежат принципы, являющиеся обобщением огромного количества опытных данных. Эти принципы были сформулированы в виде общих законов, которые, не касаясь внутренней структуры веществ, теплового движения молекул и взаимодействия между ними, устанавливают количественные соотношения при превращениях энергии в тепловых процессах.

Одним из основных понятий термодинамики является понятие *термодинамическая система*, под которой понимают тело или группу тел, состоящих из большого числа молекул. В качестве термодинамической системы могут рассматриваться, например, газ, находящийся под поршнем цилиндра; жидкость, налитая в стакан; кусок железа. Все, что не входит в систему и находится вне ее границ, называется *окружающей средой*. В термодинамике оперируют величинами, которые характеризуют вещество в целом, но не имеют смысла применительно к отдельным молекулам. К числу таких величин, называемых *макроскопическими параметрами*, мы можем отнести, например, давление. Ведь не имеет смысла говорить о давлении одной молекулы. Мы можем говорить о давлении газа, подразумевая под этим среднюю силу действия бесчисленных ударов молекул о стенки сосуда. Именно эту среднюю по времени силу действия ударов молекул об единицу площади и фиксирует прибор для измерения давления — манометр.

Состояние термодинамической системы характеризуется определенным набором макроскопических параметров. Например, для описания состояния системы “газ, находящийся под поршнем цилиндра”, необходимо задать три параметра: давление p , объем V , температура T . Если термодинамическая система переходит из одного состояния в другое, то говорят, что произошел *термодинамический процесс*.

В то же время мы уже знаем, что существует и другой способ описания тепловых явлений, который называется **молекулярно-кинетической теорией**. В молекулярно-кинетической теории, или в *статистической механике*, как ее еще называют в теоретической физике, все процессы, происходящие внутри тела, объясняются поведением атомов и молекул, из которых оно состоит. Например, процесс плавления твердых тел, при котором происходит разрушение кристаллической решетки, объясняется тем, что энергия, получаемая твердым телом извне, приводит к увеличению амплитуды колебаний атомов в узлах кристаллической решетки. При некотором значении температуры энергия колебательного движения атомов становится настолько большой, что силы притяжения между ними уже не могут удерживать атомы в узлах решетки, и они покидают ее пределы.

Оба метода — термодинамический и молекулярно-кинетический, широко используются для изучения тепловых явлений. При этом они не противоречат друг другу, а, наоборот, зачастую взаимно дополняют друг друга.

Внутренняя энергия. Все макроскопические тела наряду с механической энергией обладают и энергией, зависящей от внутреннего состояния тел. Эту энергию назвали *внутренней*. Попробуем, используя уже известные нам знания, выяснить, от каких параметров зависит внутренняя энергия тела.

Согласно основным положениям молекулярно-кинетической теории, все тела состоят из микрочастиц (атомов и молекул). Микрочастицы внутри тела непрерывно и хаотично движутся, следовательно, обладают кинетической энергией. Кроме того, микрочастицы внутри тела взаимодействуют друг с другом, следовательно, обладают и потенциальной энергией. Тогда можно сказать, что *внутренняя энергия тела равна сумме кинетических энергий хаотического движения всех микрочастиц тела в системе отсчета, связанной с его центром масс, и потенциальных энергий взаимодействия всех микрочастиц друг с другом*. Из определения внутренней энергии тела следует, что это понятие не включает в себя ни кинетическую энергию, связанную с движением тела, как целого, ни потенциальную энергию, связанную с нахождением тела в поле каких-либо внешних сил. Вместо этого, оно может включать в себя: кинетическую энергию поступательного, вращательного и колебательного движений молекул, потенциальную

энергию взаимодействия между атомами внутри молекул, а также потенциальную энергию взаимодействия между самими молекулами.

Внутренняя энергия идеального газа. Если учесть, что количество молекул макроскопического тела невероятно огромно, то становится понятным, что теоретически рассчитать его внутреннюю энергию не представляется возможным. Ведь это потребовало бы от нас записи и решения гигантского количества уравнений движения для каждой, отдельно взятой молекулы. Даже мощности и быстродействия современных суперкомпьютеров не хватило бы для того, чтобы справиться с этой задачей.

Однако именно тот факт, что число молекул в макроскопических телах огромно, избавляет нас от необходимости учитывать движения каждой молекулы в отдельности. Вместо этого, нам достаточно знать лишь средние значения величин, характеризующих движение молекул, таких как *средняя скорость* или *средняя кинетическая энергия*, рассмотренных нами в главе 6. Применение такого подхода, называемого в молекулярно-кинетической теории *статистическим*, значительно упрощает задачу расчета внутренней энергии термодинамической системы.

Рассчитаем, например, внутреннюю энергию идеального газа. Вспомним, что идеальный газ — это газ, молекулы которого представляют собой материальные точки, практически не взаимодействующие друг с другом. Отсутствие взаимодействия между молекулами идеального газа означает, что его внутренняя энергия должна выражаться суммой лишь кинетических энергий молекул, входящих в состав этого газа. Если обозначить кинетическую энергию отдельной i -й молекулы W_{ki} , то, воспользовавшись знаком суммирования Σ , можно записать:

$$U = \sum W_{ki}. \quad (33.1)$$

Формулу (33.1) для внутренней энергии идеального газа можно упростить еще больше, если мы, рассуждая, что в среднем все молекулы газа имеют одинаковую кинетическую энергию \bar{W}_k , запишем выражение для общей их энергии как произведение числа молекул газа N на величину средней кинетической энергии одной молекулы \bar{W}_k :

$$U = N \bar{W}. \quad (33.2)$$

Из предыдущей главы известно, что средняя кинетическая энергия одноатомной молекулы \bar{W}_k выражается формулой:

$$\bar{W}_k = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT. \quad (33.3)$$

Число молекул газа массой m определяется выражением:

$$N = v N_A = \frac{m}{M} N_A. \quad (33.4)$$

С учетом формул (33.3) и (33.4) и известного нам соотношения между постоянными $R = kN_A$, выражение для внутренней энергии одноатомного идеального газа примет вид:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (33.5)$$

Из полученной формулы видно, что для данной массы идеального газа его внутренняя энергия зависит только от температуры и не зависит от его давления и объема.

Внутренняя энергия многоатомных газов. Полученное нами выражение для внутренней энергии (33.5) справедливо только для одноатомного идеального газа, так как его молекула, являясь материальной точкой, может совершать в пространстве лишь поступательное движение, а потому имеет три *поступательные степени свободы*. Молекула многоатомного газа, как мы знаем, способна совершать и другие виды движения. Рассмотрим, например, молекулу двухатомного газа (O_2 , N_2 , H_2), чья форма напоминает маленькую гантель. Такая молекула, помимо поступательного движения вдоль трех осей прямоугольной системы координат x , y , z , может также совершать вращательное движение вокруг этих трех осей, проходящих через центр масс молекулы (рис. 33.1).

В связи с этим, говорят о наличии у многоатомной молекулы трех других, *вращательных степенях свободы*. В отличие от одноатомной молекулы, у которой вся ее энергия приходится на три поступательные степени свободы, у многоатомной молекулы полная ее энергия распределяется между тремя поступательными и тремя вращательными степенями свободы. Заметим, однако, что в случае двухатомной молекулы, энергией, приходящейся на одну из ее вращательных степеней свободы, можно пренебречь. Из приведенного выше рисунка нетрудно понять, что речь идет об энергии вращения молекулы относительно оси z , которая проходит через оба атома молекулы (рис. 33.1). Энергия вращательного движения, как нам известно, выражается формулой:

$$W_{\text{вр}} = \frac{1}{2} J\omega^2,$$

и, поскольку, момент инерции молекулы I относительно оси z ничтожно мал, то и энергия вращения молекулы вокруг этой оси тоже пренебрежимо мала.

В таком случае, средняя кинетическая энергия двухатомной молекулы будет распределена между оставшимися пятью степенями свободы. Причем, в силу полной хаотичности теплового движения молекул, мы можем предположить, что на каждую степень свободы

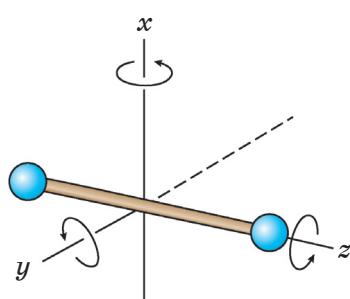


Рис. 33.1

молекулы, независимо от того, является ли она поступательной или вращательной, должна приходиться одинаковая энергия. Эту энергию разумно полагать равной $\frac{1}{2} kT$, так как для одноатомной молекулы с ее тремя степенями свободы средняя кинетическая энергия выражается формулой $\frac{3}{2} kT$. Предположение о равномерном распределении энергии молекулы по степеням ее свободы было доказано Больцманом и носит название *закона равнораспределения*.

Таким образом, средняя кинетическая энергия двухатомной молекулы должна рассчитываться по формуле $\bar{W}_K = \frac{5}{2} kT$. В таком случае, для расчета внутренней энергии идеального двухатомного газа заданной массы m справедлива формула:

$$U = \frac{5}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (33.6)$$



Вопросы для самоконтроля

1. Чем отличается термодинамический метод изучения тепловых явлений от молекулярно-кинетического?
2. Что понимают под термодинамической системой?
3. Что называется *термодинамическим процессом*?
4. Какая энергия называется *внутренней*? Что представляет собой внутренняя энергия с точки зрения микроструктуры вещества?
5. Как вы думаете, почему точка на pV -диаграмме полностью характеризует состояние определенного количества идеального газа?
6. Как зависит внутренняя энергия данной массы газа от его температуры?
7. Изменится ли внутренняя энергия идеального газа, если уменьшить количество вещества, содержащегося в нем?
8. Почему внутренняя энергия идеального газа зависит от того, сколько атомов содержится в молекуле газа?
9. Моль какого газа при данной температуре обладает большей внутренней энергией — идеального или реального?

**Объясните**

1. В ясную ночь понаблюдайте за падением метеорита в земной атмосфере. Почему он раскаляется?
2. Приложив силу к бруски, можно заставить его двигаться по шероховатой ровной поверхности с постоянной скоростью. Работа, совершенная силой по перемещению бруска, не меняет его кинетическую и потенциальную энергии. В таком случае, на что тратится работа силы?

Решайте

1. В баллоне находится 5 кг аргона при температуре 300 К. Чему равна внутренняя энергия газа?
(Ответ: 470 кДж)
2. Чему равна внутренняя энергия 2 молей двухатомного идеального газа при температуре 27°C?
(Ответ: 6,2 кДж)
3. Каково давление одноатомного идеального газа, занимающего объем 2 л, если его внутренняя энергия равна 300 Дж?
(Ответ: 10^5 Па)
- 4. Найдите концентрацию молекул идеального одноатомного газа в сосуде вместимостью 2 л при температуре 27°C, если его внутренняя энергия 300 Дж.
(Ответ: $2,4 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$)

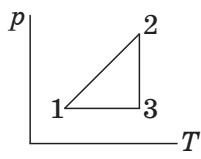


Рис. 33.2

5. Идеальный газ совершает циклический процесс, график которого в координатах p , T изображен на рисунке 33.2. Как менялась внутренняя энергия газа на каждом из участков цикла? За весь цикл?

(Ответ: 1—2 повышалась; 2—3 не менялась; 3—1 уменьшалась. Не изменилась)

**Рефлексия**

1. Понятны ли были цели, обозначенные в начале параграфа?
2. С какими терминами и понятиями вы встречались ранее?
3. Какая часть пройденного материала усвоена хорошо, а какая слабо? Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы? Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. Помогли ли вам задания "Творческой мастерской" в усвоении темы? В чем возникли наибольшие затруднения?
5. Какая информация заинтересовала вас особенно? Почему?

§ 34. Работа, совершаемая при термодинамических процессах



Ключевые понятия: работа, совершающаяся газом, работа, совершающая над газом, работа при изобарном процессе, функция состояния, функция процесса.

На этом уроке вы: научитесь рассчитывать работу, совершающую газом при изобарном процессе; научитесь определять работу газа графически; ознакомитесь с понятиями функция состояния и функция процесса.

Работа в механике и термодинамике. Согласно формулам (33.5) и (33.6), температуру заданной массы идеального газа можно изменить только путем изменения его внутренней энергии. Каким же образом можно изменить внутреннюю энергию газа?

Из механики нам известно, что изменение энергии тела происходит всякий раз, когда тело совершает работу или, когда над телом совершается работа. И если в первом случае энергия тела уменьшается, то во втором — увеличивается. Если, например, упруго деформированная пружина совершает работу, то убывает ее потенциальная энергия. Если же внешняя сила, заставляя тело ускоряться, совершает над ним работу, то возрастает кинетическая энергия тела.

Работа в термодинамическом процессе также приводит к изменению энергии тела. Но, в отличие от механической работы, где рассматривается движение тела как целого, работа в термодинамике связана с перемещением микрочастиц тела относительно друг друга и совершается только тогда, когда есть изменение объема тела. Следовательно, для того, чтобы уменьшить, к примеру, внутреннюю энергию газа, находящегося под поршнем цилиндра, необходимо заставить его совершить механическую работу по расширению. Если же требуется повысить температуру газа, то нужно совершить работу по сжатию газа.

Молекулярная картина изменения внутренней энергии при совершении работы. Попробуем разобраться, почему при совершении газом работы по расширению его внутренняя энергия понижается, в то время как при совершении внешней силой работы по сжатию газа его внутренняя энергия увеличивается. Дело в том, что, когда молекула газа соударяется с поршнем, удаляющимся от нее, как это происходит при расширении газа, то она после столкновения теряет свою скорость, а вместе с ней, и свою кинетическую энергию (рис. 34.1, *а*). Наоборот, когда молекула соударяется с поршнем, движущимся ей навстречу, что имеет место при сжатии газа, ее скорость и кинетическая энергия после столкновения возрастают (рис. 34.1, *б*). В случае же упругого соударения молекулы с неподвижным поршнем изменения ее скорости не происходит вообще (рис. 34.1, *в*). Во всех трех рассмотренных случаях уместна аналогия с действиями футболиста, стремящегося, в

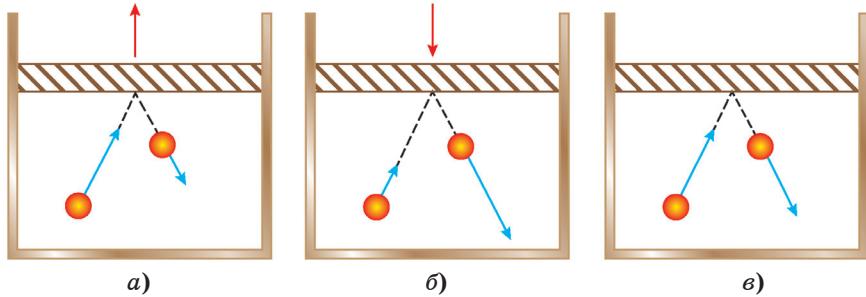


Рис. 34.1

первом случае, остановить движение летящего к нему мяча, во втором — придать мячу еще большую скорость, в третьем — сыграть в “стенку” с партнером.

Так как в общем случае внутренняя энергия тела, помимо суммарной кинетической энергии его молекул, включает в себя и суммарную потенциальную энергию взаимодействия между молекулами, зависящую от расстояний между ними, то изменение внутренней энергии тела может быть вызвано также изменением расстояний между молекулами тела при его сжатии или расширении.

Вычисление работы газа. В механике рассматривается движение макроскопических тел. Нам известно, что если под действием постоянной силы F тело перемещается на расстояние s , то работа, совершаемая силой, определяется выражением:

$$A = Fscos\alpha, \quad (34.1)$$

где α — угол между векторами силы \vec{F} и перемещения \vec{s} .

Рассмотрим газ, находящийся под поршнем площадью поверхности S при давлении p (рис. 34.2). Из определения давления $p = \frac{F}{S}$, величина силы давления газа F , действующей на поршень, равна pS . Пусть под действием силы поршень сместится в направлении ее действия на очень малое расстояние Δh . При таком малом смещении поршня давление газа практически не изменится, что позволяет рассматривать процесс расширения газа как изобарический. Следовательно, сила, с которой газ давит на поршень, остается постоянной в течение всего процесса. В таком случае, для вычисления работы, совершаемой газом по поднятию поршня, мы можем воспользоваться формулой (34.1):

$$A = Fh = pS(h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1) = p(V_2 - V_1) = p\Delta V, \quad (34.2)$$

где ΔV — изменение объема газа. Из формулы (34.2) видно, что, если конечный объем больше начального ($V_2 > V_1$, $\Delta V > 0$), то работа газа положительна, и говорят, что **сам газ совершил работу**. Если же конечный объем меньше начального ($V_2 < V_1$, $\Delta V < 0$), то работа **самого**

газа отрицательна, и говорят, что над газом совершили работу. Так как, согласно третьему закону Ньютона, сила F , с которой газ действует на поршень, равна силе F' , с которой внешняя сила действует на газ, взятой с обратным знаком ($F = -F'$), то в первом случае внешняя сила совершает отрицательную работу, а во втором — положительную.

Вычисление работы с помощью графика $p(V)$. Формула (34.2) позволяет рассчитать работу, совершающую газом при изобарическом процессе. Построим график изобарического процесса в координатах $p - V$ (рис. 34.3). Из графика видно, что произведение $p\Delta V$ численно равно площади прямоугольника, ограниченного сверху графиком изобарного процесса $p(V)$, снизу — осью V и с двух сторон — перпендикулярами к ней (заштрихованная область).

Рассмотренный нами графический метод вычисления работы применим не только для изобарного процесса. С помощью графика процесса в координатах $p - V$ можно рассчитать работу любого процесса как площадь фигуры под кривой, ограниченной сверху кривой $p(V)$, снизу — осью V и с двух сторон — перпендикулярами к ней, равными по длине начальному и конечному давлению. Докажем это на примере термодинамического процесса, график которого в координатах $p - V$ изображен на рисунке 34.4. Разобъем интервал $V_1 - V_2$ на графике на множество бесконечно малых участков ΔV . Давление на каждом из этих участков можно считать постоянным. Пользуясь формулой работы для изобарного процесса (34.2), рассчитаем на каждом из участков элементарные (бесконечно малые) работы ΔA (площадь затемненной области), и сложим их для вычисления работы газа на всем интервале от V_1 до V_2 . Ввиду малости ΔV , очевидно, что суммарная площадь всех маленьких прямоугольников достаточно близка площади под кривой графика процесса.

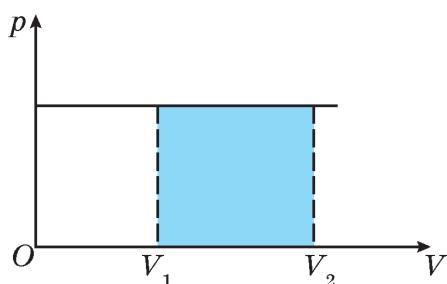


Рис. 34.3

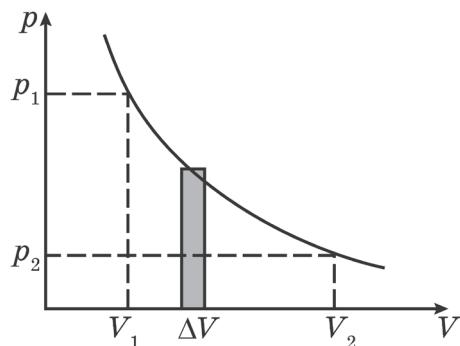


Рис. 34.4

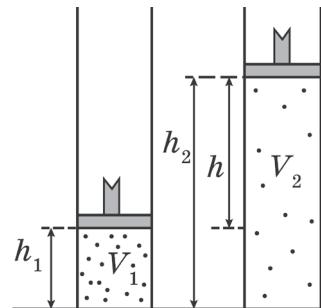


Рис. 34.2

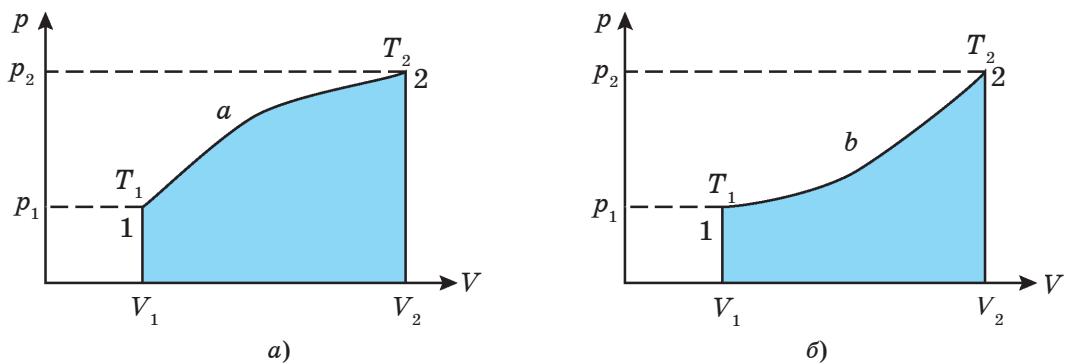


Рис. 34.5

Пусть газ переходит из состояния 1 с параметрами p_1 , V_1 , T_1 в состояние 2 с параметрами p_2 , V_2 , T_2 , совершая два разных процесса: а) 1- a -2; б) 1- b -2 (рис. 34.5, а и рис. 34.5, б). Применив графический способ, сравним работы, совершаемые газом в каждом из этих процессов. Очевидно, что $A_{1-a-2} > A_{1-b-2}$. Мы видим, что работа газа зависит от того, по какому пути он на графике $p(V)$ переходит из одного состояния в другое. В этом смысле, про работу в термодинамике говорят как о *функции процесса*. Нельзя говорить, что в системе содержится определенное количество работы. Можно говорить о работе, совершенной системой или над системой, в результате чего изменяется ее внутренняя энергия.

Изменение внутренней энергии газа в процессах а) и б) одно и то же $\Delta U_{1-a-2} = \Delta U_{1-b-2}$, так как она, как мы знаем, определяется лишь макропараметрами газа в начальном и конечном состояниях. Следовательно, про внутреннюю энергию можно сказать, что она является *функцией состояния*.



Вопросы для самоконтроля

1. Объясните, почему работа газа при изменении его объема отличается от работы внешней силы, действующей на поршень, знаком, и не отличается по модулю.
2. Как, используя график какого-либо процесса на pV -диаграмме, можно определить работу, совершающую газом? В каком случае эта работа положительна, а в каком — отрицательна?
3. Имеются три процесса: изохорный, изобарный и изотермический. В ходе какого из них при одинаковом изменении объема работа, совершаемая газом, максимальна; минимальна?



Творческая мастерская

Объясните

Как объяснить нагревание газа при сжатии с молекулярной точки зрения?

Анализируйте

Работа в термодинамике является *функцией процесса*. Какой смысл вкладывается в это утверждение?

Решайте

1. Углекислый газ массой 10 г нагрет от 20°C до 30°C при постоянном давлении. Найти работу расширения газа и изменение его внутренней энергии.

(Ответ: $A = 18,9 \text{ Дж}$; $\Delta U = 83 \text{ Дж}$)

2. При изобарном нагревании на 159 К газом, масса которого 3,47 кг, была совершена работа 144 кДж. Определите молярную массу газа.

(Ответ: $32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$)

■3. Идеальный газ массой m , находящийся при температуре T , охлаждается изохорно так, что давление падает в n раз. Затем газ расширяется при постоянном давлении. В конечном состоянии его температура равна первоначальной. Определите совершенную газом работу. Молярная масса газа равна M .

$$(Ответ: A = \frac{n - 1}{n} \frac{m}{M} RT)$$

*4. Некоторое количество газа нагревают от температуры $T_1 = 300 \text{ К}$ до температуры $T_2 = 400 \text{ К}$. При этом объем газа изменяется прямо пропорционально температуре. Начальный объем газа $V = 3 \text{ дм}^3$. Давление, измеренное в конце процесса, $p = 10^5 \text{ Па}$. Какую работу совершил газ в этом процессе?

(Ответ: 100 Дж)

*5. Один моль одноатомного идеального газа совершает циклический процесс 1—2—3—4—1, график которого изображен на рисунке 34.6. Температура газа в 1-м состоянии 100 К. Работа, совершенная газом за цикл, равна 16,6 кДж. Найдите количество молей газа.

(Ответ: 2 моля)

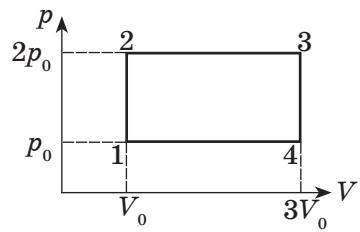


Рис. 34.6

Рефлексия

- Понятны ли были цели, обозначенные в начале параграфа?
- С какими терминами и понятиями вы встречались ранее?
- Какая часть пройденного материала усвоена хорошо, а какая слабо? Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы? Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
- Помогли ли вам задания "Творческой мастерской" в усвоении темы? В чем возникли наибольшие затруднения?
- Какая информация заинтересовала вас особенно? Почему?

§ 35. Количество теплоты. Способы изменения внутренней энергии. Теплоемкость



Ключевые понятия: теплопередача, теплород, количество теплоты, теплоемкость, удельная теплоемкость, молярная теплоемкость, уравнение теплового баланса.

На этом уроке вы: узнаете, что такое теплопередача; узнаете физический смысл удельной теплоемкости вещества; познакомитесь с понятием молярная теплоемкость вещества; научитесь рассчитывать количество теплоты, необходимое для изменения температуры тела.

Изменение внутренней энергии при теплопередаче. В предыдущем параграфе мы рассмотрели механизм изменения внутренней энергии газа посредством совершения работы. Существует, однако, еще один способ изменения внутренней энергии тел, происходящий без совершения работы. Рассмотрим его более подробно на примере газа, находящегося под поршнем цилиндра. На этот раз закрепим поршень, не давая ему возможности перемещаться. Так как объем газа теперь не может изменяться, то работа не совершается. Если в этих условиях нагреть газ, например, приведя его в контакт с более нагретым телом, то температура и внутренняя энергия газа возрастут. Заметим, что в рассмотренном случае передаче энергии от нагреветого тела к газу способствовало не совершение работы, а наличие разности температур у контактирующих тел.

Передача энергии от одного тела к другому, происходящая в результате разности температур этих тел, называется теплопередачей.

Теория теплорода. Опыт показывает, что если одно тело привести в контакт со вторым телом, температура которого отличается от температуры первого, то более горячее из тел начнет остывать, а более холодное — нагреваться. Процесс теплопередачи продолжится до тех пор, пока температуры обоих тел не уравняются. До середины XIX в. механизм теплопередачи ученые пытались объяснить перетеканием из одного тела в другое некой невесомой жидкости, названной ими *теплородом*. В дальнейшем выяснилось, что подобные представления о причине изменения температур тел, приведенных в контакт между собой, неверны и никакого теплорода не существует.

Теплопередача с молекулярной точки зрения. В действительности передачу энергии при контакте двух тел с разными температурами следует объяснять следующим образом: при взаимных столкновениях, происходящих на границе этих тел, молекулы нагреветого тела отдают молекулам холодного тела часть своей кинетической энергии. Это приводит к тому, что скорости молекул нагреветого тела уменьшаются, а холодного — увеличиваются.

Количество теплоты и теплоемкость. Несмотря на то, что теория теплорода оказалась несостоительной, некоторые понятия, введенные ее сторонниками, прочно укоренились в физике и широко используются и поныне. Одно из них — *количество теплоты*.

Количество теплоты представляет собой энергию, передаваемую от одного тела к другому в процессе теплопередачи.

Понятие количества теплоты, так же как и работы, имеет смысл применительно к термодинамическому процессу, но не к состоянию системы. Не имеет смысла говорить, например, о количестве теплоты, запасенной системой. Можно говорить о количестве теплоты только по отношению к энергии, передаваемой от одного тела к другому в результате разности температур. Следовательно, количество теплоты Q , так же как и работа A , является функцией процесса.

Два способа изменения внутренней энергии. Таким образом, существуют два разных способа изменения внутренней энергии термодинамической системы: 1) путем совершения работы; 2) в процессе теплопередачи. Например, нагретый газ в цилиндре двигателя может терять свою внутреннюю энергию и остывать в результате отдачи теплоты окружающей среде, не совершая при этом никакой работы. Но он может терять энергию и остывать, если будет перемещать поршень в условиях полной теплоизоляции, когда теплопередача отсутствует.

Теплоемкость. Из курса физики для 8 классов вы уже знаете, что количество теплоты, необходимое для нагревания тела на 1 К , для различных тел разное. Поэтому для характеристики тепловых свойств тел пользуются величиной, называемой *теплоемкостью*.

Теплоемкостью тела называют количество теплоты, которое нужно подвести к телу или отнять от него для изменения его температуры на 1 К .

Для характеристики вещества используют понятие *удельной теплоемкости*, которую обозначают буквой c .

Удельная теплоемкость — это количество теплоты, которое нужно подвести к 1 кг вещества или отнять от него для того, чтобы изменить его температуру на 1 К .

Из определения удельной теплоемкости следует, что она измеряется в $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right]$ и выражается формулой:

$$c = \frac{Q}{m\Delta t}. \quad (35.1)$$

Теплоемкость, отнесенная к 1 молю вещества, называется *молярной теплоемкостью* и обозначается буквой C .

Молярная теплоемкость — это количество теплоты, которое нужно подвести к 1 молю вещества или отнять от него для того, чтобы изменить его температуру на 1 К .

Удельная теплоемкость связана с молярной теплоемкостью очевидным соотношением:

$$c = \frac{C}{M}, \quad (35.2)$$

где M — молярная масса вещества.

Из (35.2) следует, что молярная теплоемкость должна измеряться в $\frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{К})}$ и определяться выражением:

$$C = Mc = \frac{M}{m} \cdot \frac{Q}{\Delta T}. \quad (35.3)$$

С помощью формул (35.1) или (35.3) мы можем рассчитать количество теплоты Q , которое необходимо для того, чтобы изменить температуру заданной массы вещества на ΔT :

$$Q = mc\Delta T = \frac{m}{M} C\Delta T. \quad (35.4)$$

Теплообмен в замкнутой термодинамической системе. Мы уже знаем, что теплообмен между телами прекращается, когда температуры тел выравниваются и наступает тепловое равновесие. Рассмотрим теплообмен, происходящий между телами термодинамической системы, которая изолирована от окружающей среды. Такую систему называют *замкнутой*. Внутренняя энергия замкнутой термодинамической системы не изменяется. Если тела, входящие в систему, не совершают никакой работы, то изменение внутренней энергии любого из тел системы будет вызвано количеством теплоты, которое оно получило или отдало до наступления в системе теплового равновесия. И, так как суммарная внутренняя энергия тел не изменяется, то, следовательно, не изменяется и сумма количеств теплоты, полученных или отданных каждым из тел замкнутой системы:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0. \quad (35.5)$$

Это уравнение называется *уравнением теплового баланса*. Количества теплоты, входящие в уравнение, рассчитываются по формулам (35.1) или (35.3) и могут быть как положительными, так и отрицательными по знаку.



Вопросы для самоконтроля

1. Какое явление называется *теплопередачей*?
2. Вспомните, какие виды теплопередачи существуют?
3. Что мы понимаем под количеством теплоты?
4. Почему нельзя говорить о количестве теплоты, запасенной системой?



Экспериментируйте

- Используя термометр и мензурку, определите теплоемкость воды. Сравните полученное значение с табличным и объясните расхождение между ними.
- Наполните стакан емкостью 200 см³ кипятком на три четверти. Дополните стакан холодной водой температурой 10 °С. Измерьте установившуюся температуру воды. Используя уравнение теплового баланса, определите расчетное значение температуры. Сравните полученные результаты. Объясните расхождение между ними.

Объясните

- Почему при холостых выстрелах ствол пушки нагревается сильнее, чем при стрельбе снарядами?
- Объясните механизм теплопередачи, опираясь на знания о микроструктуре вещества.

Анализируйте

Чему равно значение теплоемкости газа при изотермическом процессе?

Решайте

- Какое количество теплоты необходимо для нагревания 19 л воды в латунной посуде массой 12 кг от 21°С до температуры кипения? ($c_{\text{л}} = 380 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$)

(Ответ: 6,7 МДж)

- Для закалки нагретую до 1073 К стальную деталь массой 0,5 кг опустили в воду массой 10 кг при температуре 288 К. До какой температуры охладится стальная деталь?

(Ответ: 292,3 К)

- Сколько воды при температуре 100°С надо добавить к 200 кг воды при температуре 10°С, чтобы получить температуру смеси 37°С?

(Ответ: 85,7 кг)

Рефлексия

- Понятны ли были цели, обозначенные в начале параграфа?
- С какими терминами и понятиями вы встречались ранее?
- Какая часть пройденного материала усвоена хорошо, а какая слабо? Нуждается ли вы в дополнительном разъяснении темы? Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
- Помогли ли вам задания "Творческой мастерской" в усвоении темы? В чем возникли наибольшие затруднения?
- Какая информация заинтересовала вас особенно? Почему?

§ 36. Первый закон термодинамики



Ключевые понятия: закон сохранения и превращения энергии, первый закон термодинамики.

На этом уроке вы: узнаете смысл первого закона термодинамики как закона сохранения энергии применительно к механической и тепловой энергии.

К середине XIX в. появилось огромное количество опытных фактов, говорящих о взаимных превращениях различных форм энергии. Например, механическая энергия летящей свинцовой пули после ее соударения с массивной плитой переходит в тепло. Энергия колебательного движения маятника уходит на преодоление силы сопротивления воздуха, превращаясь при этом во внутреннюю энергию маятника и окружающего его воздуха. Было установлено также, что какие бы превращения энергии не происходили в замкнутой системе тел, полная энергия системы оставалась постоянной.

Таким образом, на основании многочисленных наблюдений и результатов кропотливых опытов был сформулирован **закон сохранения и превращения энергии**:

энергия в природе не возникает из ничего и никуда не исчезает; она только переходит из одной формы в другую, от одного тела к другому, а полная энергия в замкнутой системе тел остается величиной неизменной.

В установление закона сохранения и превращения энергии большой вклад внесли немецкий врач и естествоиспытатель Р. Майер (1814—1878), высказавший теоретические положения, английский ученый Дж. Джоуль (1818—1889), осуществивший экспериментальные исследования и немецкий ученый Г. Гельмгольц (1821—1894), которому принадлежит математическое выражение закона сохранения энергии и обобщение полученных результатов на все явления природы.

В термодинамике не берется во внимание механическая энергия тела как целого. В ней рассматривается изменение внутренней энергии тел, которое, как мы уже знаем, может происходить либо в результате процесса совершения работы, либо в результате процесса теплопередачи. В общем случае, внутренняя энергия термодинамической системы может изменяться, когда оба эти процесса совершаются одновременно. Применительно к таким случаям, закон сохранения и превращения энергии приобретает форму *первого закона термодинамики*:

Изменение внутренней энергии термодинамической системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы, совершенной над системой и количества теплоты, переданной системе.

$$\Delta U = A' + Q, \quad (36.1)$$

где A' — работа, совершенная внешними силами над системой.

Учитывая, что работа A' , совершаемая внешними силами над системой, и работа A , совершаемая системой над внешними телами, связаны соотношением $A' = -A$, первый закон термодинамики можно записать в следующей форме:

$$Q = \Delta U + A. \quad (36.2)$$

Количество теплоты, сообщенное термодинамической системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

Таким образом, первый закон термодинамики представляет собой общее выражение закона сохранения и превращения энергии, распространенного на тепловые явления.

Невозможность создания вечного двигателя первого рода. Из первого закона вытекает важное следствие о невозможности *создания вечного двигателя первого рода* — воображаемого механизма, который, действуя циклически, совершал бы работу, превышающую получаемую им энергию. Действительно, циклический режим означает, что рабочее вещество двигателя периодически возвращается в начальное состояние. В таком случае, внутренняя энергия вещества в начальном и конечном состояниях одна и та же: $U_2 = U_1$, а, значит, изменение внутренней энергии равно нулю $\Delta U = U_2 - U_1 = 0$. Тогда, согласно (36.2), $Q = A$. Это означает, что работа не может быть больше, чем теплота, получаемая двигателем, например, при сгорании топлива.

Решением Парижской Академии наук было принято не рассматривать многочисленные проекты вечных двигателей.



Вопросы для самоконтроля

1. Почему закон сохранения и превращения энергии носит универсальный характер?
2. Как формулируется первый закон термодинамики?
3. Что в термодинамике понимают под вечным двигателем первого рода?



Творческая мастерская

Наблюдайте

1. Пронаблюдайте, как при слабом морозе снег на дорогах с интенсивным автомобильным движением размягчается и подтаивает. Объясните явление.

В зимнее время пустую бутылку, находившуюся долго на улице, затыкают пробкой и вносят в теплое помещение. Через некоторое время пробка вылетает. За счет чего пробка приобретает кинетическую энергию?

Объясните

- Почему при сверлении отверстия дрелью сверло нагревается?
- Почему при быстром скольжении вниз по канату можно обжечь руки?

Творите

Придумайте задачу, в которой происходят превращения энергии из одного вида в другой.

Решайте

1. Автомобиль массой 10 т движется со скоростью 28,8 км/ч и останавливается при торможении. Сколько теплоты выделилось при торможении, если вся кинетическая энергия автомобиля обратилась во внутреннюю?

(Ответ: 320 кДж)

■2. Градинка температурой 0°C падает на тротуар, температура которого 0°C. Считая, что температура воздуха не изменяется с высотой и тоже равна 0°C, определите первоначальную высоту, с которой должна упасть градинка, для того, чтобы полностью растаять? Сопротивлением воздуха пренебречь.

Удельная теплота плавления льда $3,34 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

(Ответ: 54 км)

■3. Два моля углекислого газа расширили, как показано на рисунке 36.1. Рассчитайте: работу, совершенную газом; изменение внутренней энергии; количество теплоты, сообщенное газу.

(Ответ: $A = 1350 \text{ Дж}$; $U = 750 \text{ Дж}$; $Q = 2100 \text{ Дж}$)

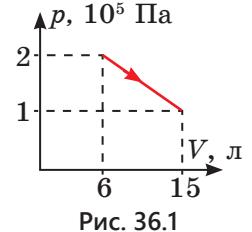


Рис. 36.1



Рефлексия

- Понятны ли были цели, обозначенные в начале параграфа?
- С какими терминами и понятиями вы встречались ранее?
- Какая часть пройденного материала усвоена хорошо, а какая слабо? Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы? Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
- Помогли ли вам задания "Творческой мастерской" в усвоении темы? В чем возникли наибольшие затруднения?
- Какая информация заинтересовала вас особенно? Почему?

§ 37. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам



Ключевые понятия: изохорный процесс, изобарный процесс, изотермический процесс, универсальная газовая постоянная, формула Майера.

На этом уроке вы: научитесь применять первый закон термодинамики к различным изопроцессам; узнаете физический смысл универсальной газовой постоянной; установите связь между молярными теплоемкостями идеального газа при изобарном и изохорном процессах.

Применим первый закон термодинамики к различным процессам.

Изохорный процесс. При изохорном процессе, происходящем с газом, неизменным параметром остается объем газа. Тогда, применив к этому процессу первый закон термодинамики в виде $Q = \Delta U + A$, и учитывая, что при изохорном процессе работа не совершается ($A = 0$), получим следующее выражение:

$$Q = \Delta U. \quad (37.1)$$

Из формулы (37.1) очевидно, что при изохорном нагревании газа, когда $Q > 0$, его внутренняя энергия возрастает $\Delta U > 0$. При охлаждении газа $Q > 0$, и следовательно, его внутренняя энергия уменьшается $\Delta U > 0$.

Формула (37.1) также дает нам возможность определить теплоемкость газа при изохорном процессе. Рассчитаем молярную теплоемкость одноатомного идеального газа при постоянном объеме, которую обозначим C . По определению:

$$C = \frac{M}{m} \cdot \frac{Q}{\Delta T}.$$

В этой формуле количество теплоты Q согласно (37.1) заменим на

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Тогда

$$C_V = \frac{M}{m} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{M}{m} \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T}{\Delta T} = \frac{3}{2} R. \quad (37.2)$$

Для двухатомного идеального газа аналогичные расчеты дают:

$$C_V = \frac{5}{2} R. \quad (37.3)$$

Изобарный процесс. Так как при изобарном процессе объем газа не фиксирован и может изменяться, то газ имеет возможность совершать работу. Ясно, что в этом случае закон термодинамики следует записывать в его полном виде: $Q = \Delta U + A$. Работу при изобарном процессе

$A = p\Delta V$ с учетом уравнения состояния идеального газа $pV = \frac{m}{M}RT$ можно выразить через изменение температуры:

$$A = p\Delta V = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M}R(T_2 - T_1) = \frac{m}{M}R\Delta T.$$

Из этого выражения легко установить физический смысл постоянной R : *универсальная газовая постоянная — это физическая величина, численно равная работе, совершающей 1 молем идеального газа в процессе изобарного расширения при нагревании его на 1 К.*

Сравним количества теплоты, необходимых для изменения температуры газа на 1 К, для случаев изобарного и изохорного процессов. Очевидно, что в первом случае понадобится большее количество теплоты, чем во втором. Действительно, ведь условия постоянства давления означают, что газу предоставлена возможность свободно расширяться, а, значит, совершать работу. Но в таком случае сообщаемая газу теплота будет расходоваться не только на изменение его внутренней энергии, как это было при изохорном процессе, но также на совершение газом работы по расширению. Следовательно, теплоемкость газа при изобарном процессе должна превышать его теплоемкость при изохорном процессе.

Определим молярную теплоемкость идеального одноатомного газа при постоянном давлении, которую будем обозначать C_p . Так как теперь: $Q = \Delta U + A$, то количество теплоты можем рассчитать:

$$Q = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M}R\Delta T + \frac{m}{M}R\Delta T = \frac{5}{2} \cdot \frac{m}{M}R\Delta T.$$

В таком случае:

$$C_p = \frac{M}{m} \frac{Q}{\Delta T} = \frac{M}{m} \cdot \frac{\frac{5}{2} \frac{m}{M} R \Delta T}{\Delta T} = \frac{5}{2} R. \quad (37.4)$$

Для двухатомного идеального газа молярная теплоемкость при постоянном давлении равна:

$$C_p = \frac{7}{2} R. \quad (37.5)$$

Сравнение выражений для молярных теплоемкостей газа при изохорном (37.2), (37.3) и изобарном (37.4), (37.5) процессах позволяет установить связь между ними:

$$C_p = C_v + R. \quad (37.6)$$

Это соотношение впервые было получено Р. Майером и носит название *формулы Майера*.

Изотермический процесс. При изотермическом процессе температура газа, а, следовательно, его внутренняя энергия не изменяются $\Delta U = 0$. Тогда все сообщаемое ему количество теплоты полностью идет на совершение газом работы:

$$Q = A. \quad (37.7)$$

Выражение (37.7) означает, что при изотермическом расширении газ совершает положительную работу ($A > 0$) за счет подводимого к нему количества теплоты ($Q > 0$), а при изотермическом сжатии, когда работа газа отрицательна ($A < 0$), теплота от него отводится ($Q < 0$).

Молярную теплоемкость газа при изотермическом процессе можно считать бесконечно большой. Действительно, какое бы количество теплоты ни передали газу, нагреваться он не будет — вследствие того, что его температура должна оставаться постоянной. Математически, бесконечность теплоемкости газа при изотермическом процессе следует из формулы:

$$C_T = \frac{M}{m} \cdot \frac{Q}{\Delta T} = \infty,$$

в которой знаменатель обращается в ноль ввиду $\Delta T = 0$.



Вопросы для самоконтроля

1. По какой причине теплоемкость некоторого количества вещества зависит от происходящего с ним процесса?
2. Чему равно значение теплоемкости при изотермическом процессе?
3. Одну и ту же массу идеального газа нагревают на 1°K : первый раз при постоянном объеме, второй — при постоянном давлении. В каком случае потребуется большее количество теплоты?



Творческая мастерская

Объясните

Почему теплоемкость газа при постоянном давлении всегда больше его теплоемкости при постоянном объеме?

Творите

Придумайте пример такого процесса, проводимого с идеальным газом, при котором его теплоемкость будет иметь отрицательное значение.

Анализируйте

Процессы, при которых теплоемкость газа остается постоянной, называются *политропными*. Покажите, что все известные нам изопроцессы являются политропными.

Решайте

1. Гелий массой 1 г был нагрет на 100 К при постоянном давлении. Определите:
а) количество теплоты, переданное газу; б) работу расширения газа; с) приращение внутренней энергии газа.

(Ответ: а) 520 Дж; б) 208 Дж; в) 312 Дж)

2. Какое количество тепла надо сообщить азоту при изобарическом нагревании, чтобы газ совершил работу 2,0 Дж?

(Ответ: 7 Дж)

3. Расширяясь, водород совершил работу 6 кДж. Определить количество теплоты, подведенное к газу, если процесс протекал: а) изобарически; б) изотермически.

(Ответ: а) 21 кДж; б) 6 кДж)

4. Для изобарного нагревания идеального двухатомного газа ему сообщили 12 МДж тепла. Найдите работу газа и приращение его внутренней энергии.

(Ответ: $A = 3,4 \text{ МДж}$; $\Delta U = 8,6 \text{ МДж}$)

■5. При изотермическом расширении кислорода, содержавшего количество вещества 1 моль и имевшего температуру 300 К, газу было передано количество теплоты 2 кДж. Во сколько раз увеличился объем газа?

(Ответ: в 2,23 раза)

*6. Плотность некоторого двухатомного газа при нормальных условиях $\rho = 1,43 \text{ кг}/\text{м}^3$. Найти удельные теплоемкости C_p и C_v этого газа.

(Ответ: $C_v = 650 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$; $C_p = 910 \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$)



Рефлексия

- Понятны ли были цели, обозначенные в начале параграфа?
- С какими терминами и понятиями вы встречались ранее?
- Какая часть пройденного материала усвоена хорошо, а какая слабо? Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы? Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
- Помогли ли вам задания "Творческой мастерской" в усвоении темы? В чем возникли наибольшие затруднения?
- Какая информация заинтересовала вас особенно? Почему?

§ 38. Адиабатный процесс



Ключевые понятия: адиабатный процесс, уравнение Пуассона, показатель адиабаты.

На этом уроке вы: узнаете, что такое *адиабатный процесс* и каковы условия его протекания; ознакомитесь с примерами адиабатного процесса в природе и технике; узнаете уравнение адиабатного процесса.

В изопроцессах, как мы знаем, один из макроскопических параметров газа остается неизменным, в то время как два других изменяются. Существуют однако процессы, в которых могут изменяться все три макроскопических параметра газа p , V , T . Среди них большой интерес для нас представляет *адиабатный процесс*.

Процесс, при котором отсутствует теплообмен между термодинамической системой и окружающей средой, называется адиабатным.

Работа газа при адиабатном процессе. При адиабатном процессе $Q = 0$. В таком случае первый закон термодинамики для адиабатного процесса принимает форму:

$$A = -\Delta U. \quad (38.1)$$

Согласно формуле (38.1), газ, совершая положительную работу ($A > 0$) по адиабатному расширению, охлаждается, так как знак изменения его внутренней энергии должен быть отрицательным $\Delta U < 0$. И, наоборот, при адиабатном сжатии ($A < 0$) газ нагревается, так как его внутренняя энергия возрастает $\Delta U > 0$. Молекулярную картину изменения температуры газа мы обсуждали в § 34.

Способы осуществления адиабатного процесса. Идеальных адиабатных процессов в природе не существует, так как невозможно полностью устраниТЬ теплообмен между системой и окружающей средой. Однако существуют способы практического осуществления условий, при которых процесс можно считать близким к адиабатному:

1. Процесс должен протекать достаточно быстро, для того чтобы теплообмен не успевал происходить. Примером адиабатного процесса, осуществляемого этим способом, является быстрое накачивание насосом велосипедной камеры. Нагревание воздуха при быстром адиабатном сжатии нашло применение в двигателях Дизеля, с принципом действия которых мы ознакомимся далее в этой главе.

2. Процесс должен протекать в больших массах газа. Процессы охлаждения воздушных масс, происходящие в грандиозных масштабах в атмосфере Земли, являются примером данного способа осуществления адиабатных процессов.

Уравнение адиабатного процесса. При адиабатном процессе соотношение между давлением газа и его объемом уже не будет определяться законом Бойля — Мариотта $pV = \text{const}$, так как в этом процессе температура не является постоянной. Вычисления показывают, что для адиабатного процесса зависимость $p(V)$ выражается формулой, называемой **уравнением Пуассона**:

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (38.2)$$

где γ — постоянная, называемая **показателем адиабаты** для данного газа.

Показатель адиабаты γ равен отношению молярной теплоемкости идеального газа при постоянном давлении C_p к его теплоемкости при постоянном объеме C_V :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}. \quad (38.3)$$

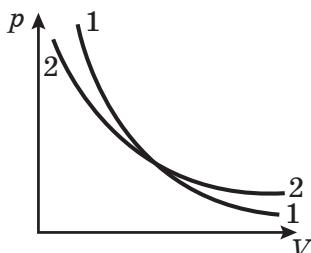


Рис. 38.1

График адиабатного процесса. Пользуясь законом Бойля — Мариотта ($pV = \text{const}$) и уравнением Пуассона ($pV^\gamma = \text{const}$) мы можем сравнить графики изотермического (изотерма) и адиабатного (адиабата) процессов в координатах $p - V$. Из рисунка 38.1 видно, что адиабата 1 идет круче изотермы 2. Объясняется это тем, что, если при изотермическом расширении газа уменьшение давления вызывается лишь увеличением объема, то при его адиабатном расширении на уменьшение давления газа влияют сразу два фактора: увеличение объема и понижение температуры газа. Математически различие двух графиков можно объяснить тем, что при адиабатном изменении объема газа его давление изменяется обратно пропорционально не первой степени объема $p \sim \frac{1}{V^1}$, как в случае изотермического процесса, а $p \sim \frac{1}{V^\gamma}$, причем, как мы уже знаем, $\gamma = \frac{C_p}{C_V} > 1$.

1. Как изменится температура идеального газа в ходе адиабатного расширения?
 2. Можно ли осуществить такой замкнутый процесс, при котором все подведенное к рабочему телу количество теплоты превращалось бы в механическую работу?
 3. Пусть газ, находясь в адиабатной изоляции, совершает отрицательную работу. Что происходит при этом с его внутренней энергией?
 4. Всегда ли теплота, подведенная к системе, приводит к увеличению ее температуры? Объясните, почему.

Вопросы для самоконтроля

- Как изменится температура идеального газа в ходе адиабатного расширения?
- Можно ли осуществить такой замкнутый процесс, при котором все подведенное к рабочему телу количество теплоты превращалось бы в механическую работу?
- Пусть газ, находясь в адиабатной изоляции, совершает отрицательную работу. Что происходит при этом с его внутренней энергией?
- Всегда ли теплота, подведенная к системе, приводит к увеличению ее температуры? Объясните, почему.



Творческая мастерская

Наблюдайте

Понаблюдайте за облаками на небе. Объясните, как адиабатические процессы, происходящие в атмосфере, приводят к формированию облаков.

Экспериментируйте

Налейте в сосуд Дьюара (термос) кипяток. Спустя некоторое время измерьте температуру воды в термосе. Объясните, какие факторы способствуют нарушению адиабатных условий, о чем свидетельствует охлаждение воды.

Объясните

Дайте физическое и математическое объяснение тому, что кривая зависимости $p(V)$ для адиабаты идет круче, чем для изотермы?

Творите

Вам необходимо осуществить адиабатный процесс с газом, при котором теплобмен с окружающей средой ничтожно мал. Предложите два способа, которыми этого можно добиться.

Анализируйте

Чему равно значение теплоемкости газа при адиабатном процессе?

Решайте

1. При адиабатическом сжатии кислорода массой 1 кг совершена работа 100 кДж. Определите конечную температуру газа, если до сжатия кислород находился при температуре 300 К.

(Ответ: 454 К)

2. Одноатомный идеальный газ расширяется адиабатически и при этом объем его увеличивается вдвое. Во сколько раз изменится температура газа?

(Ответ: уменьшится в 1,6 раза)

■3. Двухатомный идеальный газ расширяют адиабатически так, что его первоначальный объем увеличивается в 40 раз. Во сколько раз изменилось давление газа? Во сколько раз изменилась температура газа?

(Ответ: $\left(\frac{P_1}{P_2} = 175; \frac{T_1}{T_2} = 4,4\right)$)

Рефлексия

1. Понятны ли были цели, обозначенные в начале параграфа?
2. С какими терминами и понятиями вы встречались ранее?
3. Какая часть пройденного материала усвоена хорошо, а какая слабо? Нуждается ли вы в дополнительном разъяснении темы? Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. Помогли ли вам задания "Творческой мастерской" в усвоении темы? В чем возникли наибольшие затруднения?
5. Какая информация заинтересовала вас особенно? Почему?

§ 39. Термодинамические процессы в тепловых двигателях



Ключевые понятия: тепловой двигатель, круговой процесс, нагреватель, охладитель, рабочее тело, КПД теплового двигателя.

На этом уроке вы: ознакомитесь с принципом работы теплового двигателя; узнаете, что такое КПД теплового двигателя; научитесь рассчитывать КПД различных циклов.

Человечество уже давно использует в своей практике двигатели — устройства, которые предназначены для совершения механической работы. В зависимости от того, какой вид энергии они превращают в механическую работу, различают тепловые, механические и электрические двигатели. Особенно широко используются *тепловые двигатели*. **Тепловыми двигателями называют машины, которые превращают внутреннюю энергию топлива в механическую работу.**

Круговой процесс. Конструкции тепловых двигателей многообразны, однако все они обладают одним общим свойством — *цикличностью*.

Циклом (круговым процессом) называется процесс, при котором термодинамическая система, пройдя ряд промежуточных состояний, возвращается в первоначальное состояние.

График кругового процесса представляет собой замкнутую кривую линию (рис. 39.1). Работа, совершаемая при круговом процессе, численно равна площади фигуры, охватываемой этой замкнутой кривой. Докажем справедливость этого утверждения, взяв в качестве термодинамической системы некоторую массу газа.

Положительная работа A_1 , совершаемая газом при расширении, выражается площадью фигуры $d1a2c$. При сжатии работа газа A_2 отрицательна и выражается площадью фигуры $d1b2c$. Тогда работа A , совершаемая газом за цикл, равна $A = A_1 - A_2$ и выражается площадью фигуры, ограниченной замкнутой кривой $1a2b1$.

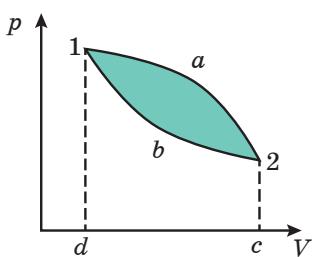


Рис. 39.1

Принцип действия теплового двигателя. Любой тепловой двигатель должен иметь *нагреватель, рабочее тело и охладитель* (рис. 39.2). Во время цикла, совершаемого тепловым двигателем: 1) рабочее тело, в качестве которого обычно используется газ, получает количество теплоты Q_1 от нагревателя; 2) за счет возросшего запаса внутренней энергии рабочее тело совершает работу A ; 3) от рабочего тела отводится количество теплоты Q_2 к охладителю.

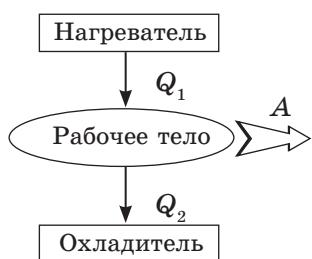


Рис. 39.2

Необходимость наличия охладителя. Рассмотрим, чем вызвана необходимость отвода теплоты Q_2 к охладителю. Для этого в качестве рабочего тела возьмем газ, находящийся под подвижным поршнем. Приводя газ в тепловой контакт с нагревателем, заставим его изотермически расширяться из состояния 1 в состояние 2 и совершил работу по поднятию поршня (рис. 39.3). Но является ли эта система двигателем? Нет, потому, что данный процесс не является циклическим. Для того, чтобы завершить цикл, необходимо вернуть газ в исходное состояние 1, сжимая его до первоначального объема. Если сжатие газа проводить при температуре нагревателя, то работа, совершаемая газом, будет такая же по величине, какую он совершил при расширении, но отрицательная по знаку: $A_{2 \rightarrow 1} = -A_{1 \rightarrow 2}$. В итоге мы получим нулевую суммарную работу за полный цикл. Следовательно, для получения отличной от нуля полезной работы в течение одного цикла, сжимать газ до первоначального состояния следует при температуре ниже, чем температура нагревателя. Вот почему в тепловом двигателе необходимо наличие второго теплового резервуара — охладителя, тепловой контакт с которым и приводит к понижению температуры газа в процессе его сжатия. Так как процесс, совершаемый рабочим веществом, является циклическим, то начальное и конечное значения его внутренней энергии одинаковы, и, следовательно, $\Delta U = 0$. Тогда, согласно первому закону термодинамики, суммарная работа A , совершенная тепловым двигателем за цикл, равна суммарному количеству теплоты $Q_{\text{сум.}}$, сообщенному двигателю во время цикла: $A = Q_{\text{сум.}}$. Из рисунка 39.1 видно, что $Q_{\text{сум.}} = |Q_1| - |Q_2|$. Величины Q_1 и Q_2 взяты здесь по модулю, а для того, чтобы указать их направления, перед ними использованы знаки “+” и “−”. Таким образом, $A = |Q_1| - |Q_2|$.

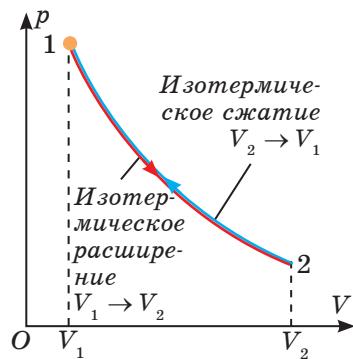


Рис. 39.3

КПД теплового двигателя. Коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя называют отношение суммарной работы, совершенной двигателем за один цикл к количеству теплоты, подводимой к газу в течение цикла:

$$\eta = \frac{A}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}. \quad (39.1)$$

Из формулы (39.1) видно, что КПД теплового двигателя не может быть равным 1, или 100%.



Вопросы для самоконтроля

1. Какой процесс называют круговым?
2. Какое устройство называют тепловым двигателем?
3. Какова роль охладителя в тепловом двигателе?
4. Что такое коэффициент полезного действия теплового двигателя?
5. Почему КПД теплового двигателя не может быть равным 100%?



Решайте

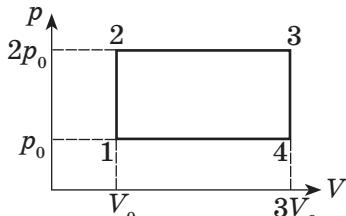


Рис. 39.4

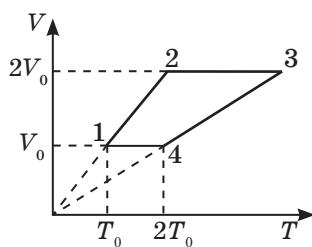


Рис. 39.5

- 1. КПД теплового двигателя 40%. В результате его усовершенствования количество теплоты, получаемое от нагревателя за один цикл, увеличилось на 20%, а количество теплоты, отдаваемое холодильнику, уменьшилось на 20%. Каким стал КПД двигателя после усовершенствования?

(Ответ: 60%)

- 2. Один моль двухатомного идеального газа совершает циклический процесс 1—2—3—4—1, график которого изображен на рисунке 39.4. p_0 , V_0 — считать известными. Найдите КПД цикла.

(Ответ: 12%)

- *3. Один моль одноатомного идеального газа совершает циклический процесс 1—2—3—4—1, график которого изображен на рисунке 39.5. V_0 , T_0 — считать известными. Найдите КПД цикла.

(Ответ: 15%)

- *4. Найти КПД цикла, состоящего из двух изобар и двух адиабат, если в пределах цикла давление изменяется в 2 раза. Рабочим веществом является азот.

(Ответ: 18%)



Рефлексия

1. Понятны ли были цели, обозначенные в начале параграфа?
2. С какими терминами и понятиями вы встречались ранее?
3. Какая часть пройденного материала усвоена хорошо, а какая слабо? Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы? Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. Помогли ли вам задания "Творческой мастерской" в усвоении темы? В чем возникли наибольшие затруднения?
5. Какая информация заинтересовала вас особенно? Почему?

§ 40. Цикл Карно. КПД цикла Карно



Ключевые понятия: тепловой двигатель Карно, КПД цикла Карно.

На этом уроке вы: узнаете, что такое *тепловой двигатель Карно*; изучите цикл Карно; научитесь рассчитывать КПД цикла Карно.

Идеальная тепловая машина Карно.

В начале XIX в. широкое распространение получили *тепловые машины*, но КПД этих устройств был очень низким. Так, у паровых машин он был равен всего 8—9%, а у первых поршневых двигателей внутреннего сгорания 12—20%. Возник естественный вопрос: каким образом повысить КПД тепловых машин? Над этой проблемой активно работал французский физик и инженер Сади Карно (1796—1832).

Результаты своих исследований он опубликовал в 1824 г. в работе “Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу”. Карно решил построить (теоретически) идеальную тепловую машину с максимально возможным КПД. Его идеальная тепловая машина работала на идеальном газе и без потерь энергии. Цикл, по которому работала такая теоретическая машина, получил название *цикл Карно*. Он представляет собой замкнутый процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат, протекающий в следующей последовательности (рис. 40.1). Газ, помещенный под поршень в цилиндр с хорошо проводящим тепло дном, получает тепло от нагревателя с температурой T_1 (рис. 40.2, а). Изотермически расширяясь, газ совершает работу A_{12} (рис. 40.2, б). Затем дно цилиндра делают теплоизолированым, как и стенки цилиндра (рис. 40.3, а), и газ, расширяясь адиабатно, совершает работу A_{23} (рис. 40.3, б). Температура газа при этом понижается, так как при адиабатном расширении работа ($A > 0$) может совершаться только за счет уменьшения внутренней энергии газа ($\Delta U < 0$). После этого теплоизолирующую подставку убирают, приводя газ в тепло-

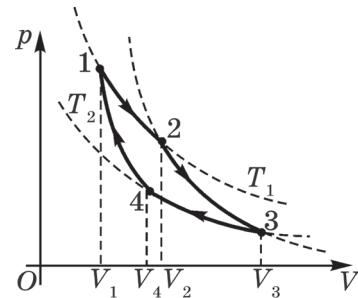


Рис. 40.1

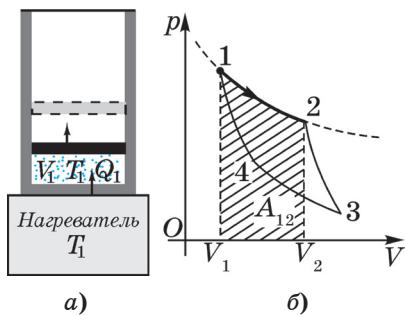


Рис. 40.2

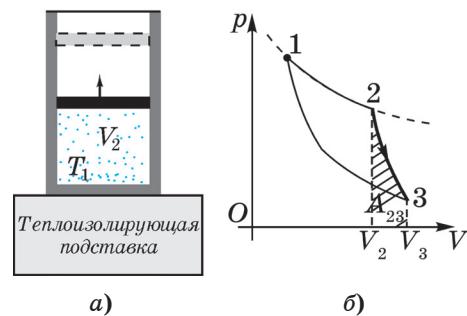


Рис. 40.3

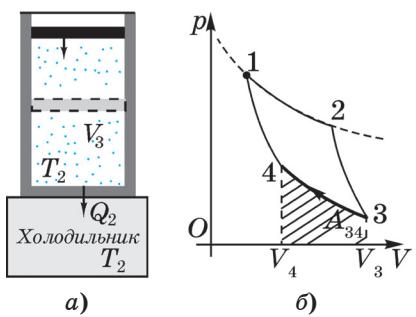


Рис. 40.4

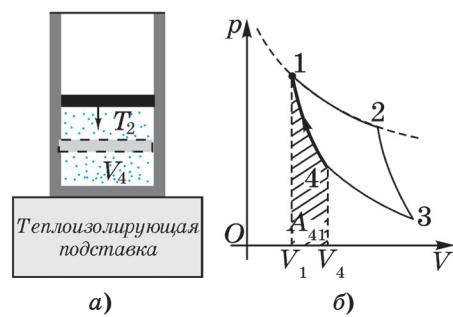


Рис. 40.5

вой контакт с охладителем, имеющим температуру T_2 . Далее следует процесс изотермического сжатия газа при этой температуре, во время которого от газа отводится количество теплоты Q_2 к охладителю. Сам газ при этом совершает отрицательную работу A_{34} (рис. 40.4, б). И, наконец, опять заменяя дно цилиндра теплоизолирующей подставкой (рис. 40.5, а), газ сжимают адиабатно до первоначального состояния с температурой T_1 . При этом газ совершает отрицательную работу A_{41} (рис. 40.5, б).

КПД цикла Карно. Так как суммарная работа, совершенная газом за цикл, равна $A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41}$, а количество теплоты газ получает только на участке изотермического расширения Q_{12} , то КПД теплового двигателя, работающего по циклу Карно, определяется отношением $\eta = \frac{A}{Q_{12}}$.

Расчеты показывают, что КПД зависит лишь от соотношения между температурами нагревателя и охладителя:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (40.1)$$

Таким образом, даже для идеальной машины Карно КПД всегда меньше 1.

Пути повышения КПД теплового двигателя. Формула (40.1) показывает, что нужно делать для того, чтобы достичь максимально возможного КПД тепловой машины: нужно по возможности повысить температуру нагревателя и понизить температуру охладителя. Однако в попытках достижения максимального КПД мы не можем безгранично как повышать температуру нагревателя (из-за риска плавления материала), так и понижать температуру охладителя (ввиду недостижимости абсолютного нуля температуры).



Вопросы для самоконтроля

1. Из каких этапов состоит цикл Карно?
2. Чем определяется КПД цикла Карно?
3. Почему даже для цикла Карно невозможно достичь КПД, равного единице?
4. Как можно повысить КПД тепловых машин?



Творческая мастерская

Объясните

При изотермическом расширении газ совершают работу, численно равную количеству теплоты, которое ему сообщили. Означает ли это, что возможно создание теплового двигателя с КПД, равным единице?

Анализируйте

1. Двигатель, работающий по циклу Карно, называют *идеальной тепловой машиной*. Почему?
2. Почему невозможно понизить температуру комнаты, держа открытой дверцу работающего холодильника?

Решайте

1. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя в три раза выше температуры холодильника. Нагреватель передал газу количество теплоты 42 кДж. Какую работу совершил газ?

(Ответ: 28 кДж)

- *2. На рисунке изображен цикл Карно (рис. 40.6). При этом площадям, обозначенным буквами A, B, C, D и E соответствуют энергии: A – 50 Дж; B – 45 Дж; C – 40 Дж; D – 10 Дж; E – 150 Дж. Считая, что цикл совершается по часовой стрелке, определите:

- количество теплоты, сообщенного газу;
- работу цикла;
- КПД цикла.

(Ответ: а) 245 Дж; б) 160 Дж; в) 65%)

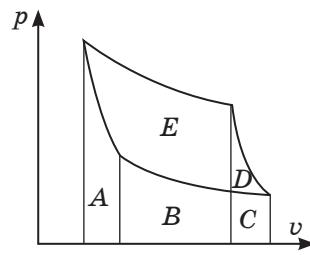


Рис. 40.6

Рефлексия

1. Понятны ли были цели, обозначенные в начале параграфа?
2. С какими терминами и понятиями вы встречались ранее?
3. Какая часть пройденного материала усвоена хорошо, а какая слабо? Нуждается ли вы в дополнительном разъяснении темы? Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. Помогли ли вам задания "Творческой мастерской" в усвоении темы? В чем возникли наибольшие затруднения?
5. Какая информация заинтересовала вас особенно? Почему?

§ 41. Обратимые и необратимые процессы. Энтропия. Второй закон термодинамики



Ключевые понятия: обратимый процесс, необратимый процесс, второй закон термодинамики, вечный двигатель второго рода, энтропия.

На этом уроке вы: научитесь различать обратимые и необратимые процессы; выясните сущность второго закона термодинамики; ознакомитесь с понятием энтропии; научитесь рассчитывать изменение энтропии в термодинамических процессах.

Обратимый процесс. В термодинамике следует различать обратимые и необратимые процессы. *Процесс перехода термодинамической системы из 1-го состояния во 2-е называется обратимым, если возможен процесс перехода из 2-го состояния в 1-е, в результате которого ни в самой системе, ни в окружающей среде не останется никаких изменений.* В качестве примера обратимого процесса можно привести колебание маятника в среде без трения. Совершив одно полное колебание, маятник вернулся бы в исходное положение, причем никаких следов от произошедших изменений не осталось бы. Температура маятника, так же как и температура окружающей среды, остались бы неизменными.

Необратимые процессы. В природе, однако, трение присутствует всегда, в ней не существует абсолютно упругих тел и соударений. Следовательно, все механические процессы в природе необратимы. Вообще все процессы, происходящие в термодинамических системах, т. е. в телах, в которых число молекул огромное, характерны своей *необратимостью*. Рассмотрим несколько примеров необратимых процессов.

1. Если два тела с разными температурами привести в контакт между собой, то теплота всегда передается от более нагретого тела к менее нагретому телу. В природе никогда не происходит *самопроизвольного обратного процесса передачи теплоты от холодного тела к горячему*.

2. Резиновый мяч, падающий с некоторой высоты, совершив несколько соударений с землей, приходит в состояние покоя. Однако лежащий на земле мяч никогда не может заново начать самостоятельно подпрыгивать, забрав от земли внутреннюю энергию.

3. Маятник, совершающий колебания, в конце концов останавливается — из-за столкновений с молекулами воздуха и трения в точке подвеса. Механическая энергия системы переходит во внутреннюю энергию воздуха, маятника и подвеса, однако, обратного превращения энергии без постороннего вмешательства никогда не происходит.

Все перечисленные процессы являются *необратимыми, в силу того, что они естественным образом, т. е. самопроизвольно происходят только в одном направлении*. Примеров подобной необратимости в природе можно привести неограниченно много. Поэтому мы можем

обобщить, что *практически все макроскопические процессы в природе являются необратимыми*.

Второй закон термодинамики. Следует отметить, что в рассмотренных нами примерах необратимых процессов энергетически допустимы и обратные процессы. То есть первый закон термодинамики не был бы нарушен, например, если бы мяч, лежащий на земле, забрав от земли тепло, поднялся на прежнюю высоту. Тот факт, что этого не происходит никогда, свидетельствует о недостаточности одного лишь первого закона термодинамики для объяснения невозможности протекания некоторых процессов в природе и порождает необходимость еще одного закона, который устанавливал бы направление возможных энергетических превращений в природе. Таким законом и является *второй закон термодинамики*. Он был установлен путем обобщения большого числа опытных фактов и не может быть выведен теоретически.

Существует несколько формулировок второго закона. Приведем формулировку немецкого ученого Р. Клаузиуса (1822—1888), касающуюся уже известного нам факта направленности теплопередачи:

Теплота не может самопроизвольно передаваться от холодного тела к горячему.

Невозможность создания вечного двигателя второго рода. Еще одна формулировка второго закона термодинамики вытекает из необходимости наличия охладителя в работе тепловой машины, о которой мы говорили в § 39. *Воображаемый механизм, превращающий все количество теплоты в работу, называется вечным двигателем второго рода.* Схематически он выглядел бы как на рисунке 41.1. Тогда второй закон термодинамики можно еще сформулировать следующим образом:

Вечный двигатель второго рода невозможен.

Несмотря на внешнее различие, обе формулировки второго закона термодинамики выражают ее сущность одинаково и являются равнозначными.

Обесценение энергии при необратимых процессах. В рассмотренных выше примерах необратимых процессов энергия всей системы сохраняется, однако происходит ухудшение ее качества — в том смысле, что часть этой энергии становится недоступной для превращения ее в механическую энергию. В самом деле, все виды энергии — механическая, электрическая, световая — могут самопроизвольно переходить в теплоту, в то время как превращения теплоты в другие виды энергии сами по себе происходить не могут.

Энтропия. Количественной мерой такого “обесценения” тепловой энергии служит важная в термодинамике физическая величина, называемая *энтропией* S . В процессах, происходящих в термодинами-



Рис. 41.1

ческих системах, интерес представляет не сама величина S , а только ее изменение ΔS при переходе системы из одного состояния в другое.

Изменение энтропии рассчитывается по формуле:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}, \quad (41.1)$$

где Q — количество теплоты, передаваемое телу, T — температура, при которой происходит теплопередача.

Из формулы (41.1) видно, что единица измерения энтропии — $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$.

Опыт и теория показывают, что *при необратимых процессах энтропия теплоизолированной системы может лишь возрастать*.

Расчет изменения энтропии. На примере некоторых необратимых процессов покажем, что энтропия системы действительно растет. Пусть требуется расплавить 1 кг льда, находящегося в комнате с постоянной температурой 20°C. Зная для льда его удельную теплоту плавления λ и температуру плавления $T_{\text{пл}}$, рассчитаем изменение энтропии системы “лед — комната”.

Увеличение энтропии льда равно:

$$\Delta S_{\text{л}} = \frac{m\lambda}{T_{\text{пл}}} = \frac{1 \times 3,35 \cdot 10^5}{273} = 1,23 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Уменьшение энтропии комнаты равно:

$$\Delta S_{\text{к}} = \frac{-m\lambda}{T_{\text{к}}} = \frac{-1 \times 3,35 \cdot 10^5}{293} = -1,14 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Следовательно, энтропия системы, рассчитываемая как сумма энтропий льда и комнаты, действительно возрастет:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{л}} + \Delta S_{\text{к}} = 1,23 \cdot 10^3 - 1,14 \cdot 10^3 = 90 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} > 0.$$

Энтропия и беспорядок. Физический смысл понятия энтропии раскрывается в статистической физике. При необратимых процессах вместе с энтропией растет и неупорядоченность в системе. Например, в рассмотренном выше примере роста энтропии при плавлении льда, строгий порядок в расположении атомов в кристаллической решетке льда сменяется на менее упорядоченное расположение атомов воды. В этом смысле энтропию можно рассматривать *как меру беспорядка системы*.



Вопросы для самоконтроля

1. В чем отличие обратимых и необратимых процессов?
2. Почему необратимы механические процессы?
3. Приведите примеры необратимых процессов в природе.
4. Какие формулировки второго закона термодинамики вы можете дать?
5. Что в термодинамике понимают под вечным двигателем второго рода?
6. Как рассчитывается разность энтропий?



Творческая мастерская

Наблюдайте

Отпустите мяч с некоторой высоты и проследите за тем, как при его соударениях с горизонтальной поверхностью механическая энергия переходит во внутреннюю энергию. Запрещает ли первый закон термодинамики обратное превращение внутренней энергии в механическую энергию мяча?

Экспериментируйте

Проведите опыт, свидетельствующий о том, что самопроизвольно тепло всегда переходит от более нагретого тела к менее нагретому.

Объясните

Объясните, что означает вечный двигатель второго рода. Почему невозможно его создать?

Анализируйте

В домашнем холодильнике тепло забирается от морозильной камеры и отдается более теплой кухне. Как это согласуется со вторым законом термодинамики о том, что тепло передается только в направлении от горячего тела к холодному?

Решайте

1. Найти прирост энтропии при плавлении 1 кг льда, находящегося при температуре 0°C.

(Ответ: 1227 Дж/К)

2. Найти изменение энтропии при испарении 5 л воды при температуре 100°C.

(Ответ: 30,3 кДж/К)

■3. Камень массой 10^3 кг при температуре 293 К падает со скалы высотой 125 м в озеро, температура воды в котором также 293 К. Считая, что вся кинетическая энергия камня при вхождении в воду превращается во внутреннюю энергию воды, найти изменение энтропии воды в озере.

(Ответ: 4,2 кДж/К)

Рефлексия

1. Понятны ли были цели, обозначенные в начале параграфа?
2. С какими терминами и понятиями вы встречались ранее?
3. Какая часть пройденного материала усвоена хорошо, а какая слабо? Нуждаетесь ли вы в дополнительном разъяснении темы? Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. Помогли ли вам задания "Творческой мастерской" в усвоении темы? В чем возникли наибольшие затруднения?
5. Какая информация заинтересовала вас особенно? Почему?

§ 42. Применение тепловых двигателей



Ключевые понятия: двигатель внутреннего сгорания, степень сжатия, двигатель Дизеля, газовые турбины, турбогенераторы и турбовинтовые двигатели.

На этом уроке вы: узнаете, как работают двигатель внутреннего сгорания и двигатель Дизеля; рассмотрите особенности паровой и газовой турбин, экологические аспекты использования тепловых двигателей.

Виды тепловых машин и их применение. Человечество проделало огромный путь в развитии тепловых двигателей. Современные устройства коренным образом отличаются от первых тепловых машин с КПД 8—12%. На смену паровым машинам пришли *двигатели внутреннего сгорания*, более удобные в работе и с более высоким КПД. После того, как были получены новые виды топлива (бензин и керосин), изобрели карбюраторный двигатель, в цилиндре которого происходит смешивание бензина с воздухом, и образовавшаяся горючая смесь, сгорая, сообщает рабочему телу тепло, увеличивая тем самым его внутреннюю энергию. Для поршневых двигателей внутреннего сгорания важной характеристикой, определяющей полноту сгорания топлива и значительно влияющей на КПД, является степень сжатия горючей смеси: $\varepsilon = \frac{V_2}{V_1}$, где V_2 и V_1 — объемы в начале и в конце сжатия. С увеличением степени сжатия возрастает начальная температура горючей смеси в конце такта сжатия, что способствует ее более полному сгоранию. У современных карбюраторных двигателей $\varepsilon \approx 8$. Дальнейшему повышению степени сжатия препятствует явление *детонации* (самовоспламенение) горючей смеси, происходящее еще до того, как поршень достигнет верхней мертвой точки. Все это оказывает разрушающее действие на цилиндр двигателя и снижает мощность и КПД. Для борьбы с этим явлением используют бензин со специальными антидетонационными присадками.

Двигатель Дизеля. Для дальнейшего повышения КПД двигателя внутреннего сгорания в 1892 г. немецкий инженер Рудольф Дизель (1858—1913) предложил использовать еще большие степени сжатия рабочего тела и расширения при постоянном давлении. Высокая степень сжатия достигается в двигателе Дизеля за счет того, что сжатию подвергается не горючая смесь, а воздух. По окончании такта сжатия в цилиндр впрыскивается горючее, для зажигания которого не требуется специального устройства, (например, свечи зажигания), так как при высокой степени адиабатного сжатия температура в цилиндре достигает 600—700°C. Этого достаточно, чтобы произошло воспламенение горючего. Современные дизельные двигатели имеют степень сжатия $\varepsilon \approx 16 — 21$ и КПД около 40%. Кроме того, дизельные двигатели работают на обедненной смеси, что приводит к более полному сгоранию

топлива и уменьшению токсичности выхлопных газов. Дизельные двигатели обладают гораздо большей мощностью, чем карбюраторные.

На современном этапе инженерная мысль снова вернулась к паровым турбинам, в которых привлекает сравнительная простота устройства, принцип действия и применение в качестве рабочего тела водяного пара. Работы в этой области привели к тому, что КПД паровых турбин достигает 40%. Паротурбинные двигатели широко применяются на водном транспорте и паротурбинных конденсационных электростанциях.

Газовые турбины. Мысль об устраниении топки и котла в тепловой машине с турбиной за счет перенесения места сжигания топлива в само рабочее тело привела к созданию *газовых турбин*. У них отсутствуют громоздкие паровые котлы и паровые турбины, а также поршни и механизмы, необходимые для преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное. Поэтому газотурбинный двигатель занимает примерно втрое меньше места, чем дизельный двигатель такой же мощности. Компактность и быстроходность в сочетании с большой мощностью позволили применять газотурбинные двигатели в авиации и на водном транспорте. Газовая турбина может быть использована как реактивный двигатель, так как воздух и продукты горения выбрасываются из нее с большой скоростью, создавая большую реактивную силу тяги. Поэтому эти реактивные двигатели используются в самолетах и теплоходах. Различают *турбореактивные* и *турбовинтовые двигатели*.

Применение тепловых двигателей в народном хозяйстве огромно. Одно только перечисление разных типов тепловых двигателей займет очень много места. Мы не представляем себе жизнь на Земле без миллионов автомобилей, автобусов, мотоциклов, тепловозов. На самолетах и вертолетах также установлены разнообразные тепловые двигатели (поршневые, турбореактивные, турбовинтовые и т. п.). Практически вся сельскохозяйственная техника (тракторы, комбайны, посевная техника) работает на тепловых двигателях. Невозможно представить себе современную космонавтику без ракетных двигателей. На тепловых электростанциях также используют тепловые машины.

Тепловые двигатели и загрязнение окружающей среды. К сожалению, применение тепловых двигателей отрицательно воздействует на окружающую нас среду. Это вызвано действием различных факторов, возникающих в результате сжигания углеводородного топлива в тепловых машинах.

Среди этих факторов основным является выброс в атмосферу углекислого газа. В настоящее время суммарное количество углекислого газа, ежегодно выбрасываемого в атмосферу всеми странами, превышает 30 млрд. т. Углекислый газ в атмосфере вызывает парниковый эффект, удерживая инфракрасное излучение нагретой Солнцем поверхности Земли. В результате этого происходит неуклонное повышение средней

температуры на Земле, что создает реальную угрозу глобального потепления, последствием которого станут таяние ледников, подъем уровня мирового океана и другие климатические изменения.

Кроме этого, сжигание топлива сопровождается потреблением большого количества кислорода, содержащегося в атмосфере. В промышленно развитых странах тепловые двигатели уже сегодня потребляют кислорода больше, чем его производят растения.

И, наконец, из-за неполного сгорания топлива в тепловых двигателях воздух загрязняется золой, азотными и серными соединениями. Антидетонационные присадки, добавляемые к транспортному топливу, приводят к значительному повышению концентрации свинца в атмосфере.

В настоящее время основные усилия стран в борьбе против загрязнения атмосферы направлены на сокращение выбросов CO₂. В развитых европейских странах уже в ближайшее десятилетие запланировано введение полного запрета на продажу автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями, а вместо них эти государства выделяют своим гражданам субсидии при покупке электромобилей.

Помимо транспорта, источниками загрязнения являются также промышленные предприятия и предприятия топливно-энергетического комплекса. Перевод этих предприятий на возобновляемые источники энергии, такие как ветровые и солнечные электростанции, и постепенный отказ от тепловых электростанций будет способствовать сохранению благоприятной окружающей среды.

В перспективе, в связи с истощением мировых запасов органического топлива, а также в связи с ухудшением экологической ситуации в мире, тепловые двигатели должны постепенно уступить свое место более экологичным источникам энергии. Последним научно-техническим достижениям разных стран в сфере возобновляемых источников энергии была посвящена международная выставка ЭКСПО-2017 “Энергия будущего” в нашей столице.



Вопросы для самоконтроля

1. Какие виды тепловых двигателей вы знаете? В чем их преимущества друг перед другом? Каковы их недостатки?
2. Каковы проблемы и перспективы развития тепловых машин?

Примеры решения задач

1. Определить количество теплоты, необходимое для перевода одного моля одноатомного идеального газа из состояния 1 в состояние 3 по пути 1–2–3 (рис. 42.1). В состоянии 1 температура газа $T_1 = 300$ К.

Решение. Задачу легко решить, если мы рассчитаем количество теплоты в процессе 1–2–3 как сумму количеств теплоты на изобарном 1–2 и изохорном 2–3 участках. На участке 1–2 количество теплоты, сообщенное газу, можно определить по формуле:

$$Q_{1-2} = vC_p(T_2 - T_1) = v \frac{5}{2} R(T_2 - T_1).$$

Здесь мы учли, что для одноатомного газа $C_p = \frac{5}{2} R$. Температуру T_2 в состоянии 2 найдем по закону Гей-Люссака: $\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_2}{V_1}$, из которого $T_2 = T_1 \frac{V_2}{V_1} = 300 \cdot 2 = 600$ К. Тогда $Q_{1-2} = 1 \cdot 2,5 \cdot 8,31(600 - 300) = 6233$ Дж. На изохорном участке 2–3 количество теплоты находится по формуле:

$$Q_{1-2} = vC_V(T_2 - T_1) = v \frac{3}{2} R(T_3 - T_2),$$

так как для одноатомного газа $C_V = \frac{3}{2} R$. Температуру T_3 в состоянии 3 найдем по закону Шарля: $\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3}$, из которого $T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2} = 600 \cdot 2 = 1200$ К. Тогда $Q_{2-3} = 1 \cdot 1,5 \cdot 8,31(1200 - 600) = 7479$ Дж.

Количество теплоты на всем участке 1–2–3 равно $Q_{1-3} = Q_{1-2} + Q_{2-3} = 6233 + 7479 = 13712$ Дж = 13,7 кДж.

2. Одноатомный идеальный газ совершает круговой процесс 1–2–3–1, график которого в координатах p – V , изображен на рисунке 42.2. Определите КПД цикла.

Решение. Вычислим КПД цикла по формуле:

$\eta = \frac{A}{Q_1}$, где A — суммарная работа, совершенная газом за цикл. Q_1 — количество теплоты, сообщенного газу во время

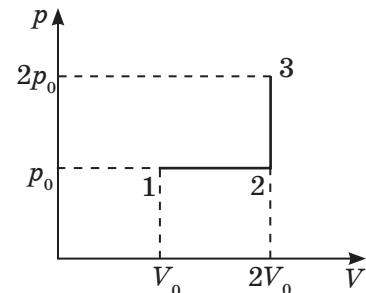


Рис. 42.1

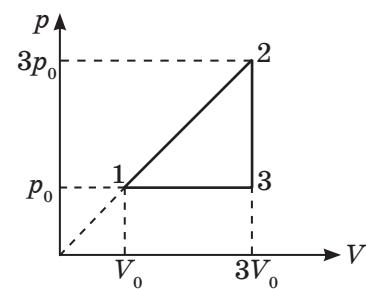


Рис. 42.2

цикла. Работу A легко рассчитать через площадь треугольника 123. $A = \frac{1}{2}(3p_0 - p_0)(3V_0 - V_0) = 2p_0V_0$. Теплота газу сообщается лишь на участке 1—2 и ее можно рассчитать, применяя первый закон термодинамики для этого участка: $Q_1 = Q_{1-2} = A_{1-2} + \Delta U_{1-2}$. Работа A_{1-2} рассчитывается через площадь трапеции $V_0 - 1 - 2 - 3V_0$ и равна $A_{1-2} = \frac{1}{2}(3p_0 + p_0)(3V_0 - V_0) = 4p_0V_0$. Изменение внутренней энергии $\Delta U_{1-2} = \frac{3}{2}vR(T_2 - T_1) = \frac{3}{2}(9p_0V_0 - p_0V_0) = 12p_0V_0$. Здесь мы воспользовались уравнением состояния идеального газа и заменили произведение vRT на pV . Таким образом, теплота $Q_1 = 4p_0V_0 + 12p_0V_0 = 16p_0V_0$. Следовательно, для КПД цикла получаем:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{2p_0V_0}{16p_0V_0} = \frac{1}{8} \approx 0,125 = 12,5\%$$

3. Один моль некоторого идеального газа изобарно нагрели на 72 К, сообщив ему количество тепла 1,60 кДж. Найти изменение его внутренней энергии и величину γ .

Решение. Первый закон термодинамики для изобарного процесса имеет форму $Q = \Delta U + A$. Отсюда следует, что $\Delta U = Q - A$. Работа одного моля газа при изобарном процессе выражается формулой $A = R\Delta T$. Следовательно, $\Delta U = Q - R\Delta T = 1,60 \cdot 10^3 - 8,31 \cdot 72 = 1,00 \cdot 10^3$ Дж.

При изобарном процессе количество теплоты, сообщаемой 1 моль газа, рассчитывается по формуле $Q = C_p \Delta T$. По определению $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$. Умножим числитель и знаменатель на ΔT . Тогда получим

$$\gamma = \frac{C_p \Delta T}{C_V \Delta T} = \frac{Q}{\frac{i}{2}R\Delta T} = \frac{Q}{\Delta U} = \frac{1,60 \cdot 10^3}{1,00 \cdot 10^3} = 1,6.$$

4. При адиабатном сжатии кислорода массой 20 г его внутренняя энергия увеличилась на 8 кДж и температура повысилась до 900 К. найти: 1) повышение температуры; 2) конечное давление газа, если начальное давление 200 кПа.

Решение. 1) Изменение внутренней энергии кислорода определяется по формуле: $\Delta U = \frac{5}{2} \cdot \frac{m}{M} R\Delta T$. Отсюда

$$\Delta T = \frac{2M\Delta U}{5mR} = \frac{2 \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^3}{5 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31} = 616 \text{ К.}$$

2) Для адиабатного процесса выполняется уравнение Пуассона $p_1V_1^\gamma = p_2V_2^\gamma$. Из уравнения состояния идеального газа найдем объем

газа $V = \frac{mRT}{pM}$ и подставим его в уравнение адиабатного процесса. Тогда уравнение Пуассона запишется в таком виде: $p_1^{1-\gamma} T_1^\gamma = p_2^{1-\gamma} T_2^\gamma$. Возведем

обе части уравнения в степень $\frac{1}{1-\gamma}$. Тогда получим: $p_1 T_1^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = p_2 T_2^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}$.

Отсюда: $p_2 = p_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = 2 \cdot 10^5 \left(\frac{900 - 616}{900} \right)^{\frac{1,4}{1-1,4}} = 11,3 \cdot 10^6$ Па. В расчетах

мы взяли $\gamma = 1,4$, так как кислород — двухатомный газ.

5. 1 моль идеального двухатомного газа совершают цикл Карно. Температура нагревателя 400 К. Найти КПД цикла, если при адиабатном сжатии газа затрачивается работа 2,0 кДж.

Решение. Первый закон термодинамики для адиабатного процесса ($Q = 0$) записывается в виде $A = -\Delta U$. По условию задачи работа газа отрицательна, т. е. $A = \Delta U$. Изменение внутренней энергии двухатомного газа определим по формуле $\Delta U = \frac{5}{2} v R \Delta T$. Отсюда $\Delta T = \frac{2 \Delta U}{5 v R} = \frac{2 A}{5 v R} = -\frac{2 \cdot 2,0 \cdot 10^3}{5 \cdot 1 \cdot 8,31} = 96$ К. Следовательно, КПД цикла Карно равен $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\Delta T}{T_1} = \frac{96}{400} \approx 24\%$.



Творческая мастерская

Наблюдайте

Понаблюдайте за работой двигателя автомобиля. Что является нагревателем, рабочим веществом и холодильником в двигателе внутреннего сгорания?

Анализируйте

В какое время — жаркое или прохладное — КПД одного и того же двигателя автомобиля будет больше?

Решайте

1. Двигатель мотороллера развивает мощность 3,31 кВт при скорости 58 км/ч. Какой путь проедет мотороллер, если у него в бензобаке 3,2 л бензина? КПД двигателя 20%.

(Ответ: 100 км)

2. Двигатель реактивного самолета с КПД 20% при полете со скоростью 1800 км/ч развивает силу тяги 88,2 кН. Определить расход керосина за 1 ч полета и разви- ваемую мощность.

(Ответ: 18,4 т; $4,41 \cdot 10^4$ кВт)



Рефлексия

1. Понятны ли были цели, обозначенные в начале параграфа?
2. С какими терминами и понятиями вы встречались ранее?
3. Какая часть пройденного материала усвоена хорошо, а какая слабо? Нуждается ли вы в дополнительном разъяснении темы? Что необходимо сделать, чтобы ликвидировать этот пробел?
4. Помогли ли вам задания “Творческой мастерской” в усвоении темы? В чем возникли наибольшие затруднения?
5. Какая информация заинтересовала вас особенно? Почему?



САМОЕ ВАЖНОЕ

Самое важное в главе

8

Макроскопические тела обладают внутренней энергией, равной сумме кинетической энергии хаотичного движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия. Внутренняя энергия является однозначной функцией температуры тела: $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$.

Изменить внутреннюю энергию системы можно с помощью теплопередачи или совершением работы над системой. Энергия, переданная телу в ходе теплопередачи, называется *количество теплоты*.

Термодинамические процессы подчиняются первому закону термодинамики, представляющему собой закон сохранения энергии для тепловых процессов: *количество теплоты, переданное газу, идет на совершение газом работы и на изменение его внутренней энергии*:

$$Q = A + \Delta U.$$

Работа, совершаемая газом, зависит от процесса, в котором участвует газ: а) изобарный процесс $A = p\Delta V$; б) изохорный $A = 0$; в) изотермический $A = Q$.

Работу, которую совершает газ в ходе произвольного процесса, можно найти как площадь фигуры, ограниченную графиком $p(V)$, осью OV и перпендикулярами на ось OV .

Количество теплоты, получаемое газом, также зависит от процесса, в котором участвует газ: а) изохорный $Q = \Delta U$; б) изотермический $Q = A$; в) изобарный $Q = A + \Delta U$.

Адиабатный процесс — это процесс, протекающий без теплообмена. Для этого процесса справедливо: $Q = 0$ и $A = -\Delta U$, т. е. работа совершается газом за счет убыли внутренней энергии.

При обмене теплотой в изолированной системе без совершения работы выполняется уравнение теплового баланса: $Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0$, где Q_1, Q_2, Q_3 — количества теплоты, полученные или отданые телами, участвующими в теплообмене.

Второй закон термодинамики: теплота самопроизвольно передается от тел более горячих к телам более холодным.

Тепловые двигатели — это двигатели, превращающие внутреннюю энергию рабочего тела в механическую работу.

КПД теплового двигателя — это отношение суммарной работы, совершенной двигателем за один цикл к количеству теплоты, подводимой к газу в течение цикла:

$$\eta = \frac{A}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}.$$