Работа совершаемая при термодинамических процессах. Количество теплоты. Теплоемкость.

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.

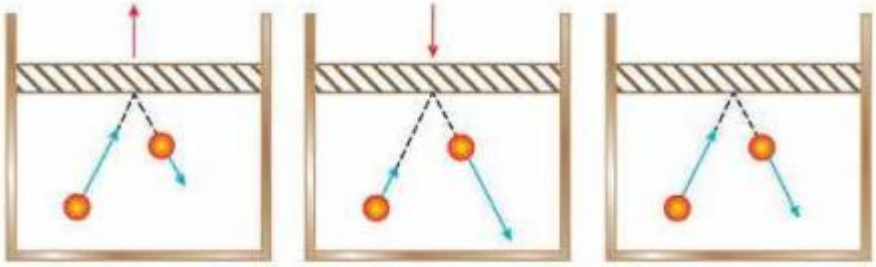


Рис. 34.1

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

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:

$$A = Fs\cos\alpha, \qquad (34.1)$$

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):

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

где ΔV — изменение объема газа.

. . .

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

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.

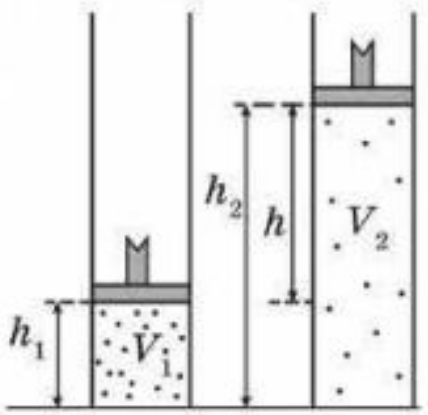


Рис. 34.2

Вычисление работы с помощью графика $p(V)$.

Формула (34.2) позволяет рассчитать работу, совершаемую 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 давлениям*. Докажем это на примере термодинамического процесса, график которого в координатах $p - V$ изображен на рисунке 34.4. Разобьем 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.

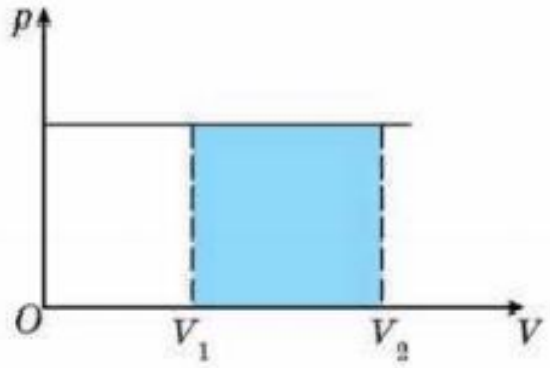


Рис. 34.3

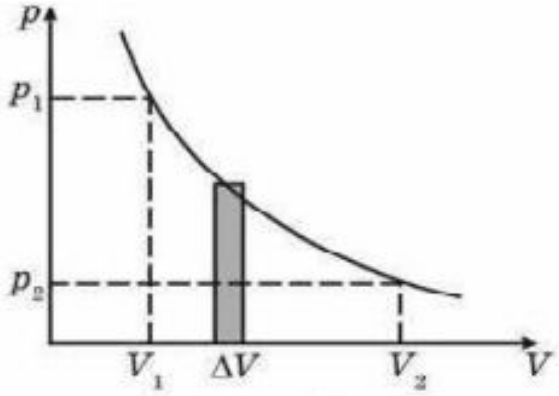
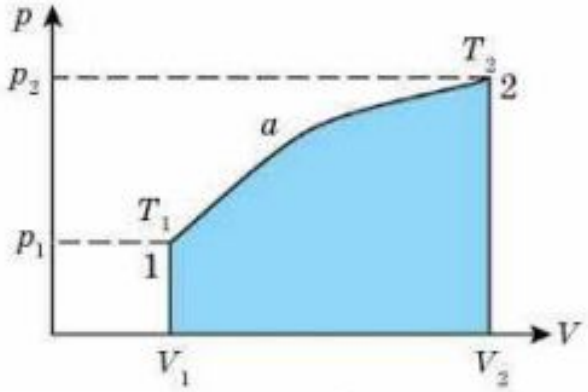
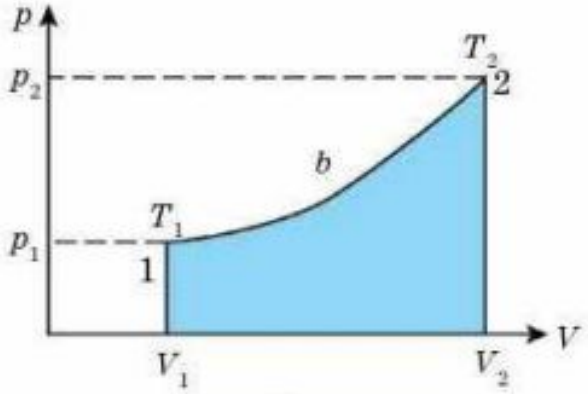


Рис. 34.4



а)



б)

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*.

. . .

Количество теплоты. Способы изменения внутренней энергии. Теплоемкость

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 нагретого 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 нагретого тела отдают молекулам холодного тела часть своей кинетической энергии. Это приводит к тому, что скорости молекул нагретого тела уменьшаются, а холодного — увеличиваются.

Количество теплоты и теплоемкость. Несмотря на то, что теория теплорода оказалась несостоятельной, 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 работа, 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

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:

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

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:

$$c = \frac{C}{M}, \tag{35.2}$$

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:

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

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:

$$Q = mc\Delta T = \frac{m}{M} C\Delta T. \tag{35.4}$$

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:

$$Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n = 0. \qquad (35.5)$$

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.

Письменно ответить на вопросы

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, совершаемую 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?
4. Какое явление называется *теплопередачей*?
5. Вспомните, какие виды теплопередачи существуют?
6. Что мы понимаем под количеством теплоты?
7. Почему нельзя говорить о количестве теплоты, запасенной системой?