

совершаемых системой на всех малых участках процесса 1—2:

$$A_{1-2} = \int_1^2 \delta A.$$

4. Выражение для работы, совершаемой простой системой при изменении ее объема, проще всего получить на примере расширения (или сжатия) газа. Пусть газ заключен в цилиндр с подвижным, невесомым поршнем площадью  $S$  (рис. 10.1). Обозначим через  $p_{\text{внеш}}$  давление, производимое на поршень и газ внешней средой. Тогда сила, с которой внешняя среда действует на поршень,  $F_{\text{внеш}} = p_{\text{внеш}} \cdot S$ . При перемещении поршня вверх на малое расстояние  $dx$  газ совершает над внешней средой («против внешнего давления») элементарную работу

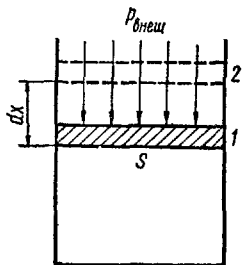


Рис. 10.1.

$$\delta A = F_{\text{внеш}} \cdot dx = p_{\text{внеш}} \cdot dV, \quad (10.5)$$

где  $dV = S \cdot dx$  — изменение объема газа. Если процесс изменения объема газа — квазистатический, то в каждый момент времени газ находится в состоянии термодинамического равновесия, а его давление  $p = p_{\text{внеш}}$ . Поэтому элементарная работа газа в квазистатическом (равновесном) процессе

$$\delta A = p \cdot dV. \quad (10.5')$$

Давление газа  $p$  всегда положительно. Поэтому при расширении ( $dV > 0$ ) газ совершает положительную работу ( $\delta A > 0$ ). При сжатии газа  $dV < 0$  и  $\delta A < 0$ , т. е. в этом случае положительную работу над газом должны совершать силы внешнего давления. Формула (10.5) справедлива не только для газа или жидкости, но также и для твердого тела при его расширении или сжатии под влиянием внешнего давления, равномерно распределенного по всей поверхности тела.

## § 10.4. Графическое изображение термодинамических процессов и работы

1. Для изучения и сравнения различных термодинамических процессов их удобно изображать графически. Зная уравнение состояния данного термодинамического тела и решив его относительно  $T$ , можно любой паре значений  $p$  и  $V$  сопоставить определенное значение третьего параметра состояния — температуры  $T$ . Поэтому для графического описания процесса достаточно указать, как изменятся при этом два параметра, например, давление и объем тела.

В двумерной системе координат, осями которой служат давление и объем, зависимость  $p$  от  $V$  в процессе изображается некоторой кривой (рис. 10.2). Точки  $C_1(p_1, V_1)$  и  $C_2(p_2, V_2)$  характеризуют начальное и конечное состояния тела, а кривая изображает рассматриваемый термодинамический процесс.

Помимо наиболее распространенной диаграммы ( $p - V$ ), употребляются также диаграммы ( $p - T$ ) и ( $V - T$ ). Важно отметить, что графически можно изображать только равновесные процессы.

2. Все реальные процессы протекают с конечной скоростью и потому неравновесны. В качестве примера рассмотрим сжатие газа в цилиндре с подвижным поршнем (рис. 10.1). Пока поршень неподвижен, газ находится в равновесии с окружающей средой. Давление, температура и плотность газа во всех частях объема цилиндра одинаковы. Картина изменяется, как только поршень начинает перемещаться под действием внешних сил. Из курса средней школы известно, что изменения давления в газе распространяются со скоростью звука (довольно большой, но все же конечной). Поэтому при движении поршня вниз под ним образуется область повышенного давления. Равенство давлений во всех частях объема газа нарушается и притом тем сильнее, чем быстрее движется поршень. Такое состояние газа является неравновесным, так как не может сколько-нибудь долго сохраняться после остановки поршня. Следовательно, описываемый процесс сжатия газа является неравновесным.

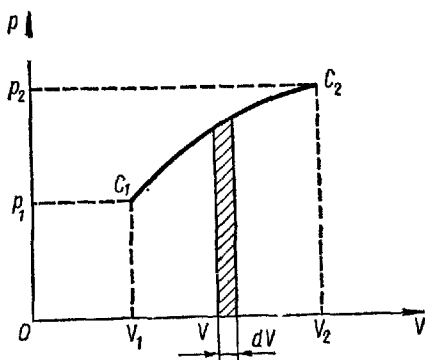


Рис. 10.2.

В случае неравновесных процессов не имеет смысла говорить о давлении и температуре всего тела, так как они будут различны в разных его частях. Поэтому неравновесные процессы нельзя изображать графически.

Однако в ряде случаев неравновесностью реальных процессов можно пренебречь. Так, например, в рассмотренном выше примере сжатия газа это можно сделать, если скорость движения поршня во много раз меньше скорости звука в газе, а размеры цилиндра невелики.

3. Диаграмма ( $p - V$ ) позволяет дать графическую интерпретацию элементарной работы  $\delta A = pdV$ , совершаемой системой в равновесном процессе. Из рис. 10.2 видно, что  $\delta A$  измеряется площадью заштрихованного прямоугольника, которая с точностью до малых второго порядка малости равна площади соответствующей криволинейной трапеции, ограниченной линией процесса  $C_1C_2$ . Работа, совершаемая системой за весь процесс  $C_1C_2$ ,

$$A_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} pdV$$

измеряется площадью, ограниченной на рис. 10.2 осью абсцисс, линией  $C_1C_2$  и двумя пунктирными вертикальными прямыми  $V = V_1$  и  $V = V_2$ .

Таким образом, понятно, что работа  $A_{1-2}$  зависит не только от начального и конечного состояний системы ( $C_1$  и  $C_2$ ), но и от того, как осуществляется процесс перехода и, соответственно, какова кривая  $C_1C_2$ , изображающая этот процесс в диаграмме ( $p - V$ ).

Работа системы в процессах, изображенных на рис. 10.3 кривыми  $C_1L_2C_2$ ,  $C_1L_1C_2$  и  $C_1L_3C_2$  измеряется разными по величине площадями, так что

$$A_{L_2} > A_{L_1} > A_{L_3}$$

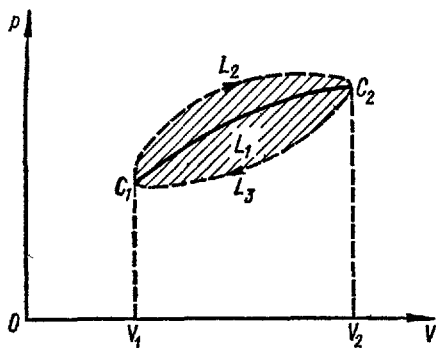


Рис. 10.3.

Если процесс совершался по замкнутой кривой  $C_1L_2C_2L_3C_1$  так, что после его завершения система возвратилась в первоначальное состояние, то полная работа системы в этом процессе не равна нулю. В результате сложения положительной работы, совершаемой системой в процессе расширения  $C_1L_2C_2$  и отрицательной работы, совершаемой системой в процессе сжатия  $C_2L_3C_1$ , получается результирующая положительная работа, измеряемая за-

штрихованной на рис. 10.3 площадью.

4. Из уравнения (10.3) видно, что  $Q_{1-2}$  так же, как и работа  $A_{1-2}$ , является функцией не только начального и конечного состояний системы, но и вида процесса. Для перевода системы из одного состояния в другое ей нужно сообщить разное количество теплоты в зависимости от вида термодинамического процесса. Это подтверждает сказанное в § 10.2.

### § 10.5. Теплоемкость вещества. Изопроцессы идеального газа

1. Для характеристики тепловых свойств тел в термодинамике широко пользуются понятием теплоемкости. **Теплоемкостью тела** называют отношение количества сообщаемой ему теплоты  $\delta Q$  к соответствующему изменению  $dT$  температуры тела. Эксперименты и теоретические расчеты показывают, что теплоемкость тела зависит от его химического состава, массы и термодинамического состояния (например, от температуры), а также, что особенно важно подчеркнуть, — от вида процесса изменения состояния тела при сообщении ему теплоты  $\delta Q$ . В этом мы убедимся дальше на примере идеальных газов.