

# Закон сохранения энергии для одноатомного идеального газа

**А. ШЕРОНОВ**

ВО ВСЕХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ выполняется закон сохранения энергии, или первый закон (первое начало) термодинамики, который удобно записывать в виде

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

Здесь  $Q$  – подведенное количество теплоты,  $A$  – совершенная термодинамической системой работа и  $\Delta U$  – изменение внутренней энергии системы.

Внутренняя энергия является функцией состояния термодинамической системы и для идеального газа зависит только от его температуры  $T$ . Для одного моля одноатомного газа она равна  $U = 3/2 RT$  (где  $R$  – универсальная газовая постоянная). Любое (как бесконечно малое, так и конечное по величине) изменение внутренней энергии определяется лишь разностью температур конечного и начального состояний:

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

и не зависит от способа перехода из начального состояния в конечное. Это остается справедливым и в том случае, когда газ переводится из начального равновесного состояния в конечное равновесное состояние в результате неравновесного необратимого процесса.

Напротив, работа  $A$ , которая совершается газом за счет подведенного тепла или изменения его внутренней энергии, зависит от пути перехода между двумя равновесными состояниями. Элементарная работа  $\Delta A$  в любом обратимом процессе по определению равна произведению давления  $p$  на малое изменение объема газа  $\Delta V$  в двух соседних равновесных состояниях этого процесса:  $\Delta A = p\Delta V$ .

При конечном изменении объема от  $V_1$  до  $V_2$  в обратимом процессе работа газа численно равна площади под кривой зависимости его давления от объема  $p(V)$ , ограниченной изохорами  $V_1$  и  $V_2$ , т.е.

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p(V)dV.$$

В задачах на расчет тепловых процессов с идеальным газом полезным оказывается введение понятия теплоемкости  $C$  газа в данном процессе:

$$\Delta Q = C\Delta T,$$

где  $\Delta T$  – малое изменение температуры газа при подведении к нему малого количества теплоты  $\Delta Q$ . Заметим, что введенная таким образом теплоемкость зависит от вида процесса  $p(V)$  и может менять свою величину и даже знак в ходе этого процесса.

Напомним теперь основные характеристики часто встречающихся процессов.

В изохорическом процессе нагрева или охлаждения газа работа газом (или внешними силами) не производится. Поэтому подведенное (или отведенное) количество теплоты  $Q$  равно изменению внутренней энергии газа:  $Q = \Delta U = 3/2 R\Delta T$  (для одного моля газа). Это соотношение оказывается верным для любого изменения температуры газа – как малого, так и конечного, поэтому соответствующая изохорическому процессу теплоемкость оказывается постоянной и для одного моля газа равной  $3/2 R$ . Она называется молярной теплоемкостью при постоянном объеме и обозначается  $C_V$ . Таким образом,

$$C_V = \frac{3}{2} R,$$

а внутренняя энергия идеального одноатомного газа оказывается равной

$$U = \frac{3}{2} RT = C_V T.$$

В адиабатическом процессе тепло к газу не подводится и не отводится от него. Работа газом (или над ним) совершается за счет изменения его внутренней энергии:  $A = -\Delta U = -3/2 R(T_2 - T_1)$ , где  $T_2$  и  $T_1$  – температуры в конечном и начальном состояниях. Это оказывается верным как для малого, так и для конечного изменения температуры газа, поэтому в адиабатическом процессе для элементарной работы имеет место равенство

$$\Delta A = p\Delta V = -C_V \Delta T,$$

где  $\Delta V$  и  $\Delta T$  – малые, по сравнению с первоначальными значениями, изменения объема и температуры газа. Теплоемкость в адиабатическом процессе, очевидно, равна нулю ( $\Delta Q = C\Delta T = 0$ ).

В изотермическом процессе подвода или отвода тепла внутренняя энергия газа не изменяется. При расширении одного моля газа от объема  $V_1$  до объема  $V_2$  газ совершает работу, которую можно найти, воспользовавшись уравнением состояния газа  $pV = RT$ :

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p(V)dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{RT}{V} dV = RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

По закону сохранения энергии, подведенное к газу количество теплоты равно совершенной газом работе:

$$Q = A.$$

При расширении газа  $A > 0$ , при сжатии  $A < 0$  (работа совершается внешними силами, тепло от газа отводится). Так как температура газа не изменяется ( $\Delta T = 0$ ), теплоемкость газа в изотермическом процессе оказывается бесконечно большой.

В изобарическом процессе нагрева с постоянным давлением  $p = p_0$  работа одного моля газа при расширении от объема  $V_1$  до объема  $V_2$  равна

$$A = p_0(V_2 - V_1) = R(T_2 - T_1).$$

Подведенное количество теплоты  $Q$  идет на совершение работы и на увеличение  $\Delta U = C_V(T_2 - T_1)$  внутренней энергии газа. Для нахождения теплоемкости  $C_p$  в изобарическом процессе воспользуемся уравнением процесса  $p = p_0$  и уравнением состояния  $pV = RT$ :

$$\begin{aligned} \Delta Q = C_p \Delta T = \Delta U + p\Delta V = \\ = C_V \Delta T + R\Delta T = (C_V + R)\Delta T. \end{aligned}$$