

### 1.1.6. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТАЛЬПИЯ

Первый закон (начало) термодинамики:

- это частный случай всеобщего закона сохранения и превращения энергии (середина XVIII в., М. В. Ломоносов);
- устанавливает количественные и эквивалентные зависимости взаимопревращения теплоты и работы в термодинамических процессах;
- не рассматривает пределы и условия этих взаимопревращений, т. е. не противоречит полному превращению теплоты в работу и наоборот;
- опыт свидетельствует, что вся механическая энергия может быть преобразована в тепловую, но не вся тепловая энергия может быть обращена в механическую.

Первый закон гласит: *все подведенное к рабочему телу тепло расходуется на изменение его внутренней энергии и совершение работы расширения.*

Математическое выражение 1-го закона термодинамики:

$$dq = du + dl = du + pdv, \quad (1.42)$$

где  $q$  — удельная теплота, Дж/кг;  $u$  — удельная внутренняя энергия, Дж/кг;  $l$  — удельная работа изменения объема, Дж/кг.

Отсюда видно, что невозможно создать *вечный двигатель первого рода*, т. е. двигатель, который позволял бы получать работу без энергетических затрат.

В 1843 г. английский физик Джоуль сформулировал на основании проведенных им экспериментов весьма важный закон идеальных газов: *«Внутренняя энергия идеального газа зависит лишь от его температуры»*, так как потенциальная энергия равна нулю (силы взаимодействия между молекулами отсутствуют). Температура идеального газа определяется внутренней кинетической энергией, а температура — параметр состояния термодинамической системы. Следовательно, *изменение внутренней энергии не зависит от вида процесса, а зависит только от начального и конечного состояний рабочего тела, которые определяются по его параметрам.*

Для вывода расчетного уравнения изменения внутренней энергии любого рабочего тела рассмотрим процесс подвода теплоты к рабочему телу массой 1 кг, заключенному в сосуд постоянного объема. В этом случае удельный объем тела не изменяется, поэтому не совершается работа изменения объема и вся подводимая теплота расходуется только на увеличение его внутренней энергии:

$$dq = du. \quad (1.42a)$$

Так как процесс изохорный, то

$$dq = c_v dT, \quad (1.42b)$$

где  $c_v$  — средняя удельная массовая изохорная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Следовательно,

$$du = c_v dT. \quad (1.43)$$

После интегрирования получим

$$u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1), \quad (1.43a)$$

где  $u_1, u_2$  — удельная внутренняя энергия в начале и в конце процесса, Дж/кг;  $T_2$  и  $T_1$  — начальная и конечная температура в термодинамическом процессе, К.

Подставив в уравнение (1.42) выражение

$$pdv = d(pv) - vdp,$$

получим

$$dq = du + d(pv) - vdp$$

или

$$dq = d(u + pv) - vdp. \quad (1.44)$$

С учетом обозначений

$$i = u + pv \quad (1.45)$$

получим

$$dq = di - vdp. \quad (1.46)$$

Величина  $i$  является новой *функцией состояния*, так как она определена значениями внутренней энергии  $u$ , давления  $p$  и удельного объема  $v$ . Эту величину называют



удельной энтальпией, Дж/кг — функцией состояния системы, равной сумме внутренней энергии  $u$  и работы ввода тела удельным объемом  $v$  в среду с давлением  $p$ . Уравнение (1.46) иногда называют второй формой первого закона термодинамики.

*Изменение удельной энтальпии в любом термодинамическом процессе определяется только начальным и конечным состоянием тела и не зависит от характера процесса.*

Физический смысл энтальпии можно пояснить на следующем примере (рис. 1.5).

Энергия системы  $E$  складывается из внутренней энергии рабочего тела  $U$  и потенциальной энергии  $Gy$  поршня с грузом в поле внешних сил:

$$E = U + Gy.$$

В условиях равновесия ( $G = pF$ ) эту функцию можно выразить через параметры тела

$$E = U + pFy = U + pV = I,$$

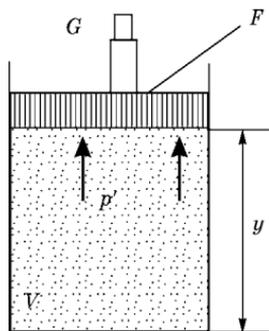
где  $I$  — энтальпия.

Получается, что  $E = I$ , т. е. энтальпию можно трактовать как *энергию расширенной системы*.

Из уравнения (1.46) следует, что если  $p = \text{const}$ , то

$$dq = di. \quad (1.46a)$$

Теплота, подведенная при *постоянном давлении*, идет только на изменение энтальпии данной системы. Это выражение часто используется в расчетах, так как огромное количество процессов подвода теплоты идет в теплоэнергетике при  $p = \text{const}$  (в паровых котлах, камерах сгорания газовых турбин, теплообменных аппаратах и т. д.).



**Рис. 1.5**  
К определению физического смысла энтальпии:

$G$  — вес груза;  $F$  — площадь поперечного сечения сосуда;  $V, p$  — объем и давление газа;  $y$  — высота.

Так как

$$di = du + d(pv) = c_v dT + R dT,$$

то

$$di = (c_v + R)dT.$$

В соответствии с законом Майера

$$c_v + R = c_p$$

получим

$$di = c_p dT. \quad (1.47)$$

Таким образом, изменение энтальпии идеального газа численно равно количеству теплоты, подводимой к газу в момент его нагревания при постоянном давлении.

### 1.1.7. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ

Если первый закон термодинамики показывает, на что расходуется подведенное к рабочему телу тепло, то второй закон устанавливает *направление самопроизвольных процессов* в природе и определяет *условия превращения теплоты в работу*. Согласно этому закону теплота в природе самопроизвольно переходит от более нагретых тел к менее нагретым.

В технике это реализуется в тепловых двигателях (рис. 1.6).

Все тепловые двигатели должны иметь:

- источник теплоты;

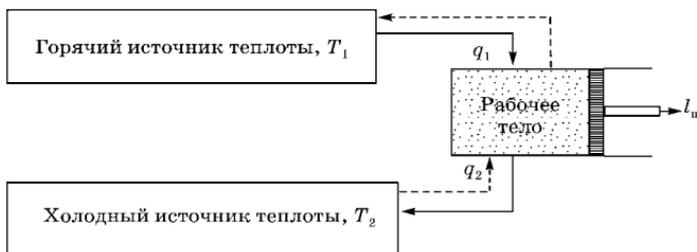


Рис. 1.6  
Принципиальная схема теплового двигателя