

Г Л А В А V I I I

ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 31. Работа и теплота. Первое начало термодинамики

Еще более 200 лет тому назад М. В. Ломоносов в работе «Размышления о причине теплоты и холода» писал:

«Так как тела могут двигаться двояким движением — *общим*, при котором все тело непрерывно меняет свое место при покоящихся друг относительно друга частях, и *внутренним*, которое есть перемена места нечувствительных частиц материи, и так как при самом быстром общем движении часто не наблюдается теплоты, а при отсутствии такового движения наблюдается большая теплота, то очевидно, что *теплота состоит во внутреннем движении материи*».

Этим двум разным типам движения соответствуют различные формы энергии. Тело, движущееся как целое, например, с поступательной скоростью v , обладает механической энергией $E_{\text{мех}} = \frac{1}{2} Mv^2$.

При таком направленном движении все молекулы тела получают одну и ту же скорость v (рис. 2.40), и энергия механического движения $E_{\text{мех}}$ распределяется между молекулами одним-единственным способом — в данном случае равномерно. В более общем случае в механическую энергию следует включать и потенциальную энергию тела во внешнем поле (гравитационном, электрическом, магнитном).

Наряду с механической энергией направленного движения тело обладает внутренней энергией хаотического теплового движения, при котором скорости отдельных молекул и расстояния между ними различны и непрерывно изменяются (рис. 2.41). Величина внутренней энергии тела складывается из кинетической энергии хаотического движения молекул и потенциальной энергии их взаимного расположения



Рис. 2.40.

$$U = E_{\text{кин}} + E_{\text{вз}}. \quad (31.1)$$

Для идеального одноатомного газа, состоящего из N молекул, $E_{вз} = 0$ и, как было показано в § 18,

$$U = N \cdot \frac{3}{2} kT,$$

т. е. энергия молекулярного движения газа определяет его температуру. В отличие от механической энергии энергия теплового движения распределяется между отдельными молекулами хаотически, большим числом непрерывно сменяющих друг друга способов (т. е. одно макросостояние реализуется множеством непрерывно чередующихся микросостояний, см. § 16 и 17).

Эта совокупность непрерывно сменяющих друг друга микросостояний, отличающихся лишь внутренним перераспределением энергии между молекулами, характеризует определенное макроскопическое состояние всего тела в целом с определенной температурой T , объемом V и давлением p .

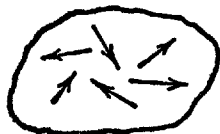


Рис. 2.41.

Величины T , V и p являются параметрами, характеризующими макроскопическое состояние всего тела. В случае твердых тел вместо объема параметром является совокупность его линейных размеров. При помещении тела во внешние

поля к этим параметрам добавляются характеристики этих полей, например высота поднятия тела над землей или напряженность электрических и магнитных полей.

При данном состоянии всего тела (под телом мы при этом понимаем как твердые тела, так и заключенные в сосудах жидкость и газ) оно обладает вполне определенными значениями механической $E_{мех}$ и внутренней U энергий. Если привести в соприкосновение два тела, то в процессе взаимодействия они смогут обмениваться энергией как в той, так и в другой форме. Этот обмен различными формами энергии характеризуется соответственно понятиями совершенной работы A и переданного тепла Q .

Например, вода, падающая на лопатки турбины, вращает последнюю. При этом оба эти тела обмениваются механической энергией. Механическая энергия, отданная водой, передается турбине в форме также механической энергии направленного движения турбины. При этом количество переданной механической энергии мы измеряем совершенной работой.

Таким образом, в этом случае *работа есть мера переданной другому телу или телам механической энергии.*

Следует твердо помнить, что *работа сама по себе не есть какая-либо особая форма энергии.*

В приведенном примере механическая энергия воды непосредственно превращается в механическую энергию турбины в процессе работы воды.

Энергией могут обладать лишь реальные материальные тела. В отрыве от материальных тел энергия существовать не может. Совершая *работу* над телом, мы меняем его *энергию*. Значит, можно говорить о запасе механической *энергии* тела, но не о запасе *работы* в этом теле.

Когда топочные газы обогревают паровой котел, они охлаждаются. При этом уменьшается интенсивность теплового движения молекул этих газов и тем самым их внутренняя энергия. В свою очередь вода в котле нагревается — возрастает энергия теплового движения молекул воды. При этом оба тела (газ и вода) *обмениваются* энергией своих внутренних тепловых движений. *Величину переданной энергии теплового движения молекул мы измеряем количеством теплоты.*

Следовательно, *теплота, так же как и работа, не является особой формой энергии. Тепло есть мера переданной телу или отданной им энергии хаотического молекулярного движения.* Поэтому *неправильной является встречающаяся иногда формулировка о «запасе тепла в теле».*

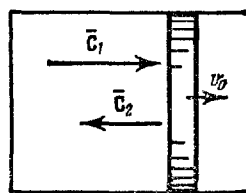


Рис. 2.42.

Энергия механического движения может превращаться в энергию теплового движения и обратно. Камень, падающий на землю, в момент удара отдает всю накопленную им кинетическую энергию, за счет чего оба тела нагреваются. При этом происходит переход механической энергии направленного поступательного движения камня в энергию хаотического теплового движения атомов обоих тел в строго эквивалентных количествах.

В качестве обратного примера можно рассмотреть расширяющийся газ, заключенный в сосуд с поршнем. Молекулы газа, движущиеся вправо с некоторой скоростью v_1 , ударяются о поршень, движущийся вправо с некоторой скоростью v_0 (рис. 2.42). При этом по законам соударений упругих тел (см. § 8, гл. II) они отлетают назад с меньшей скоростью:

$$v_2 = v_1 - 2v_0. \quad (31.2)$$

Таким образом, в процессе расширения газа его внутренняя энергия уменьшается вследствие превращения в механическую энергию движущегося поршня.

Можно без труда найти множество примеров превращения одной формы энергии в другую. Опыт показывает, что во всех приведенных и в других многочисленных примерах превращение механической энергии в тепловую и обратно совершается всегда в строго эквивалентных количествах. Поскольку тепловое движение есть, в конечном счете, тоже механическое движение отдельных молекул (только не направленное, а хаотическое), то при всех этих превращениях должен соблюдаться закон сохранения энергии с учетом энергии

не только внешних, но и внутренних движений. Такая общая формулировка этого закона носит название первого начала термодинамики.

Рассмотрим тело, в целом неподвижное (например, газ в цилиндре с подвижным поршнем), чтобы можно было пренебречь энергией его механического движения. Внутреннюю энергию теплового движения этого тела обозначим через U .

Дадим возможность телу обмениваться энергией с окружающими телами. При этом внутренняя энергия тела изменится на некоторую величину ΔU , которая в зависимости от обстоятельств может оказаться как положительной, так и отрицательной.

В процессе взаимодействия с рассматриваемым телом изменится интенсивность теплового движения молекул окружающих тел: эти тела охладятся или нагреются и, тем самым, передадут рассматриваемому телу некоторое количество теплоты ΔQ . Знак величины ΔQ будет указывать направление процесса теплообмена. Если окружающие тела будут нагреваться и отнимать от рассматриваемого тела энергию, то $\Delta Q < 0$.

При изменении внутренней энергии изменится состояние тела, оно будет расширяться или сжиматься и приведет в механическое движение окружающие его тела. Количество переданной окружающим телам энергии механического движения мы будем характеризовать *работой* ΔA , *совершенной рассматриваемым телом над окружающими его телами*. Работа ΔA также является величиной алгебраической и имеет знак. Если механическая энергия окружающих тел уменьшится, то $\Delta A < 0$, и мы говорим, что *окружающая среда совершила работу* — ΔA .

Подчеркнем принятое нами и чаще всего применяемое правило знаков. ΔQ *считается положительным, если тепло передается от окружающей среды данному телу*, т. е. за счет притока тепла ΔQ извне внутренняя энергия тела возрастает. Наоборот, ΔA *считается положительной, если тело производит механическую работу над окружающими телами*, т. е. за счет произведенной механической работы убывает внутренняя энергия тела.

Учитывая процессы теплообмена и совершения механической работы и правило знаков, мы можем окончательно записать закон сохранения энергии в виде

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta A. \quad (31.3)$$

*Изменение внутренней энергии тела ΔU равно разности сообщенного телу количества теплоты ΔQ и произведенной телом механической работы ΔA *).*

*) По поводу смысла символов Δ для работы и тепла см. примечание на стр. 35.

Закон (31.3) можно переписать и в таком виде:

$$\boxed{\Delta Q = \Delta U + \Delta A.} \quad (31.4)$$

Это и есть обычная математическая формулировка первого начала термодинамики:

Количество теплоты, сообщенное телу (ΔQ), идет на увеличение его внутренней энергии (ΔU) и на совершение телом работы (ΔA).

§ 32. Теплоемкость газа. Физический смысл универсальной газовой постоянной

Теплоемкость тела характеризуется количеством теплоты, необходимым для нагревания этого тела на один градус (кельвин), и измеряется в джоулях на градус (Дж/К *). Если для увеличения температуры тела на ΔT градусов необходимо сообщить ему ΔQ джоулей, то средняя теплоемкость тела в интервале ΔT определяется как

$$C_{\text{тела}} = \frac{\Delta Q}{\Delta T}. \quad (32.1)$$

Теплоемкость тела пропорциональна массе и зависит от вещества тела. Удельная теплоемкость $C_{\text{уд}}$ данного вещества (дерева, железа, бензина, воздуха и т. д.) характеризуется количеством теплоты, необходимым для нагревания 1 кг данного вещества на один градус, и измеряется в Дж/(кг·К). Удельная теплоемкость обычно слабо меняется с изменением температуры.

Для газов удобно пользоваться молярной теплоемкостью ($C_{\text{мол}}$ или просто C), характеризующейся количеством теплоты, нужным для нагревания одного киломоля данного вещества на один градус.

Очевидно, что

$$C_{\text{уд}} (\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})) \cdot \mu (\text{кг}/\text{кмоль}) = C (\text{Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})). \quad (32.2)$$

Поскольку в 1 киломоле любого газа содержится одинаковое число молекул, а средняя кинетическая энергия молекул не зависит от их массы, то можно ожидать, что молярные теплоемкости всех достаточно разреженных газов должны быть одинаковыми или по крайней мере подчиняться одинаковым закономерностям.

Теплоемкость тела существенно зависит от того, как меняется состояние тела в процессе нагревания. Рассмотрим для простоты идеальный одноатомный газ. Если мы будем нагревать газ, заключенный в замкнутом объеме, $V = \text{const}$ (рис. 2.43, а), то все под-

*) См. примечание на стр. 79.