

## § 78. Внутренняя энергия. Теплота и работа. Уравнение первого начала

Как уже было пояснено выше (§ 73), под внутренней энергией тела мы понимаем энергию движения и взаимодействия всех частиц тела, а также лучистую энергию, которая обеспечивает внутри тела состояние теплового равновесия. Применяя методы термодинамики, изменение внутренней энергии тела при переходе из одного состояния в другое *измеряют суммой работы, которую необходимо затратить, и тепла, которое необходимо сообщить телу, чтобы перевести это тело из начального состояния  $C_0$  в заданное состояние  $C$ .*

Понятно, что при суммировании работа и тепло должны быть выражены в одинаковых единицах: либо в единицах механических (эрг, джоуль, килограмметр и т. д.), либо в калориях.

Если тело неизменно продолжает пребывать в одном и том же равновесном состоянии, то само собой очевидно, что в это время никакой затраты энергии на него не производится. Но возьмем какое-либо тело и подвергнем его ряду каких угодно механических и термических воздействий. Спрашивается, примет ли внутренняя энергия этого тела первоначальное значение, когда мы вернем тело в исходное состояние. Спрашивается, иными словами, не может ли механическая и термическая обработка оставить такой «след» в теле, который заключался бы в изменении внутренней энергии тела

жит  $\frac{q_2}{M_2} N$  молекул и т. д. Следовательно, в 1 г заданной смеси находится

$$\left( \frac{q_1}{M_1} + \frac{q_2}{M_2} + \dots \right) N \text{ молекул.}$$

Пусть  $M$  есть средний молекулярный вес смеси. В 1 грамм-молекуле смеси содержится авогадрово число молекул, значит, число молекул в 1 г смеси равно  $\frac{N}{M}$ . Следовательно,

$$\frac{N}{M} = \left( \frac{q_1}{M_1} + \frac{q_2}{M_2} + \dots \right) N,$$

или

$$M = \frac{1}{\frac{q_1}{M_1} + \frac{q_2}{M_2} + \dots}, \quad (10)$$

где  $q_1 + q_2 + \dots = 1$ .

Например, для воздуха (состоящего по весу из 76% азота, 23% кислорода и 1% аргона):

$$M_{\text{возд}} = \frac{1}{\frac{0,76}{28} + \frac{0,23}{32} + \frac{0,01}{40}} = 28,9.$$

Полезно заметить, что согласно формуле (10) средний молекулярный вес химически неоднородного тела есть величина среднегармоническая, а не среднеарифметическая по отношению к молекулярным весам составляющих веществ (конечно, вычисляемая с учетом их количественного участия в составе смеси).

и больше не проявлялся бы ни в чем, т. е. не был бы связан с изменением численного значения всех остальных параметров, характеризующих термодинамическое состояние тела

Если бы затрата энергии на осуществление цикла оказалась не равной нулю, то мы вынуждены были бы, очевидно, сказать, что энергия затрачена «ни на что», так как состояние тела в конечном результате не изменилось. Иными словами, мы должны были бы признать, что энергия исчезла, или, если бы сумма затрат работы и тепла на выполнение цикла оказалась отрицательной, то должны были бы признать, что энергия возникла. Но ни то, ни другое, как гласит первое начало термодинамики, невозможно. Значит, *в сумме затрата тепла и работы на выполнение любого термодинамического цикла равна нулю*. Следовательно, внутренняя энергия тела в конце цикла приобретает первоначальное значение. Иначе говоря, *внутренняя энергия является однозначной функцией термодинамического состояния*.

Итак, если  $U$  есть внутренняя энергия тела и  $x, y, z, \dots$  — параметры, которые в совокупности однозначно характеризуют состояние тела, то  $U = f(x, y, z, \dots)$ . Здесь  $f$  есть символ однозначной функции. Вид функции  $f$  не может быть установлен с помощью одних лишь законов термодинамики. Он должен быть установлен опытным путем или посредством изучения молекулярной структуры тела.

Три величины — энергия, теплота и работа — имеют одинаковую размерность (могут быть измерены в одинаковых единицах), но понятия, которые скрываются за этими величинами, далеко не равнозначны.

Надо прежде всего провести грань раздела между понятием «энергия», с одной стороны, и более родственными друг другу понятиями «теплота» и «работа» — с другой.

Когда мы говорим о работе, мы имеем в виду или самый процесс с работы (т. е. процесс перемещения точек приложения некоторых сил), или же меру работы, т. е. количество энергии, передаваемой в форме работы от одного тела, совершающего работу, к другому телу, на изменение состояния которого эта работа расходуется. А когда мы говорим об энергии, то представляем себе запас возможной, но еще не осуществляющейся работы. Спрашивается, с чем должно быть связано представление о теплоте: с представлением о процессе передачи энергии, или с представлением о запасе энергии?

На этот вопрос надлежит дать ответ: о теплоте может идти речь только в том случае, когда имеется в виду процесс передачи энергии, и ни в коем случае под теплотой нельзя понимать какой-то запас энергии. Однако, как и в случае работы, термин «тепло» используется не только как основа для обозначения определенных процессов передачи энергии (теплоотдача, теплопоглощение, теплопередача, теплоизлучение и т. д.); термином «тепло» обозначают также

меру эффективности указанных процессов, т. е. количество энергии, переданной в форме тепла.

Встречающееся иногда неправильное сочетание понятия теплоты с «запасами» чего-то отражает влияние некогда господствовавшей теории теплорода, которая сохранившимися в физике образными, но малоудачными терминами («теплоемкость», «теплопроводность») направляет мысль по неверному пути.

К сожалению, в некоторых книгах можно встретить заявление, что теплота будто бы есть молекулярно-кинетическая энергия тела. В отождествлении теплоты с молекулярно-кинетической энергией скрыта невысказанная до конца, совершенно ошибочная мысль, что наибольшее количество тепла, которое может быть отдано телом при охлаждении, якобы равно энергии хаотического движения частиц тела. В действительности количество тепла, которое тело отдает при охлаждении, зависит в высокой мере от условий, в которых происходит охлаждение. Например, при конденсации газа отдача тепла происходит главным образом за счет убыли молекулярно-потенциальной энергии тела, а не за счет уменьшения запаса молекулярно-кинетической энергии.

В природе не существует никаких «запасов тепла». О теплоте не может быть и речи, когда нет процесса теплопередачи, подобно тому как в механике нельзя говорить о работе, когда нет процесса, заключающегося в перемещении точек приложения действующих сил. Следует помнить, что любой вид энергии является однозначной функцией состояния тела. Энергия не зависит от пути перехода тела из одного состояния в другое. Работа и теплота не являются видами энергии. *Процесс работы и «теплопроцесс» представляют собой две единственно возможные формы передачи энергии от одного тела к другому, а количество работы и количество тепла представляют собой меру энергии, переданной в двух различных, единственно возможных формах — в формах работы и тепла.*

Всегда, когда выполняется работа, имеется по меньшей мере два тела: одно, которое развивает силы, совершающие работу, и другое, к которому эти силы приложены. Первое тело, производящее работу, отдает энергию; второе тело, на которое работа направлена, получает энергию.

Точно так же всегда, когда проявляется теплота, имеется тоже по меньшей мере два тела: одно, которое отдает энергию, и другое, которое получает энергию.

Мерой энергии, переданной от одного тела к другому, служит в зависимости от формы перехода одна из двух эквивалентных друг другу величин: количество работы или количество тепла.

В чем состоит качественное различие понятий «теплота» и «работа»? В том, что *под количеством тепла понимают энергию, переданную совокупностью микрофизических процессов, которые регулируются законами статистики* (обмен энергии при соударении

молекул, излучение света и т. п.), тогда как *под количеством работы понимают энергию, передаваемую в макрофизическом процессе, где перемещение точек приложения сил доступно нашему непосредственному контролю.*

Для примера рассмотрим с указанной точки зрения конвекцию, т. е. перенос веществом любого вида энергии. Если конвекция каких-либо видов энергии (но только не внутренней энергии) производится перемещением тел достаточно крупных, чтобы имела возможность регулировать их движение, то этот процесс попадает под понятие работы, например перемещение наэлектризованного тела из одной системы наэлектризованных тел в другую, аналогичное перемещение намагниченного тела и т. д. Но если конвекция при отсутствии внешних сил протекает стихийно, как, например, в случае диффузии заряженных или намагниченных коллоидных частиц, то это есть перенос тепла. Внутренняя энергия тела является единственным видом энергии, имеющим статистическую основу, поэтому конвекция внутренней энергии всегда должна рассматриваться как перенос тепла.

Радиоволны представляют собой пример передачи энергии в форме работы, производимой отправительной станцией и направленной на возбуждение электрических токов в антенне приемной станции. Волны (или кванты) света представляют собой пример передачи энергии в форме тепла.

Применяя установленные выше понятия, нетрудно придать первому началу термодинамики вид уравнения. Для этого представим себе, что некоторое интересующее нас тело посредством каких-либо воздействий (безразлично каких) переводится из термодинамического состояния  $C_1$ , в котором его энергия была равна  $U_1$ , в новое состояние  $C_2$ , в котором его энергия делается равной  $U_2$ .

Энергия может быть сообщена телу или системе тел в двух единственно возможных формах: в форме работы и тепла. Значит, каковы бы ни были конкретные особенности процесса, можно утверждать, что *приращение полной энергии системы ( $U_2 - U_1$ ) заведомо должно быть равно сумме затраченной работы и сообщенного системе тепла.*

Взамен величины затрачиваемой работы введем величину, обратную по знаку, т. е. работу, выполняемую системой. Приведенное выше утверждение можно перефразировать следующим образом: *теплота, сообщаемая системе, расходуется на приращение энергии системы и на работу, выполняемую системой.*

Условимся, как обычно, приращение обозначать в целях сокращения письма символом  $\Delta$ :

$$\Delta U = U_2 - U_1.$$

Количество тепла, сообщенного системе в процессе перехода ее из состояния  $C_1$  в состояние  $C_2$ , обозначим буквой  $Q$ ; выполняемую

при этом системой работу обозначим буквой  $A$ . Тогда

$$Q = \Delta U + A. \quad (11)$$

Понятно, что все величины, входящие в уравнение (11), должны быть выражены в одних и тех же единицах энергии. Если бы мы имели в виду измерять теплоту  $Q$  и энергию  $U$  в калориях, тогда как  $A$  — в единицах работы, то в уравнении (11) мы должны были бы перед  $A$  поставить в виде множителя термический эквивалент единицы работы; такое начертание принято многими. Однако на практике такое начертание уравнений не имеет никаких преимуществ, так как нельзя заранее сказать, потребуется ли по существу задачи вести выкладки в калориях или, скажем, в джоулях.

Чтобы не обременять формулы лишними обозначениями, мы нигде не пишем символов термического эквивалента единицы работы и механического эквивалента единицы тепла, оставляя, таким образом, открытым вопрос, в каких именно единицах выражены  $Q$ ,  $U$  и  $A$  — в калориях или в единицах работы. Требуется только помнить, что для всех членов уравнения единица энергии при числовых выкладках должна быть взята одна и та же (если  $Q$  и  $U$  измерены в калориях, то и  $A$  должно быть выражено в калориях; если  $A$  измерено в джоулях, то и  $Q$  и  $U$  должны быть выражены в джоулях, и т. д.).

### § 79. Изобарная и изотермическая работа газа

Как было показано в § 76, в общем случае, когда при расширении тела давление изменяется, работу, производимую телом вследствие расширения, надо вычислять по формуле

$$A = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv.$$

Эта формула приобретает весьма простой вид, когда нагревание и связанное с ним расширение тела происходит изобарно, т. е. при неизменном давлении. В этом случае  $p$  как величину постоянную можно вынести за знак интеграла:

$$A_p = p(v_2 - v_1). \quad (12)$$

*Работа, производимая телом при изобарном расширении, равна произведению давления на приращение объема.*

Эту формулу чаще всего приходится применять для расчета работы, производимой телом при изменении агрегатного состояния — при кипении жидкостей, при плавлении; давление в этих случаях остается неизменным до тех пор, пока вся жидкость не выкипит или пока все твердое тело не расплавится.