

Эти опыты опять касались изучения эффекта Комптона. Он получил результаты совсем не те, которые были получены раньше в упоминавшихся опытах Боте и Гейгера. На этот раз многие из крупных ученых высказали предположение, что закон сохранения энергии не всегда применим, а значит, не может и претендовать на роль принципа, служащего основой нашего научного мировоззрения. Конечно, это привлекло внимание экспериментаторов, и на протяжении 1937 г. в четырех крупнейших лабораториях были тщательно поставлены опыты в целях проверки результатов Шенклэнда, причем во всех четырех лабораториях было обнаружено, что Шенклэнд в своих выводах неправ. Закон сохранения энергии опять восторжествовал.

2.2. Шесть формулировок первого начала

Несмотря на простоту первого и второго начал термодинамики, все их глубокое содержание нелегко высказать кратко и ясно. Об этом свидетельствует то, что разными авторами каждый из этих законов формулируется по-разному. Мне кажется, что обзор принципов термодинамики всего удобнее провести в форме сопоставления различных формулировок первого и второго начал термодинамики, высказанных разными авторами.

Что касается первого начала, то здесь можно выделить шесть наиболее удачных формулировок. Простейшей является такая формулировка: *невозможно возникновение или уничтожение энергии*. Однако глубокий смысл первого начала заключается не только в констатации сохранения энергии, но и в утверждении взаимопревращаемости всех видов энергии. Именно желая оттенить эту мысль, Энгельс формулирует философское содержание первого принципа термодинамики так: *любая форма движения способна и должна превращаться в любую другую форму движения*.

Часто первый принцип термодинамики формулируют следующим образом: *энергия является однозначной функцией состояния*.

Рассмотрим связь этой формулировки с предыдущими. Если тело неизменно пребывает в одном и том же состоянии, то само собой очевидно, что никакой затраты энергии на него не производится. Но подвергнем тело ряду каких угодно механических и тепловых воздействий, а затем возвратим тело также посредством механических и тепловых воздействий в его исходное термодинамическое состояние. Спрашивается, могут ли все эти произведенные на тело воздействия оставить в нем такой «след», который заключался бы в изменении энергии и больше не проявлялся бы ни в чем другом, т. е. не был связан с изменением хотя бы одного из параметров состояния (давления, плотности, температуры и т. д.).

Очевидно, что подобный «след» (заключающийся в изменении одной только энергии тела, без каких бы то ни было других проявлений) не может остаться, так как это и означало бы, что энергия или возникла, или же исчезла.

Следовательно, энергия, в частности внутренняя энергия, является однозначной функцией состояния $U = f(x, y, z, \dots)$. Здесь f есть символ однозначной функции, а x, y, z, \dots представляют собой полную систему параметров состояния тела.

Как известно, в простейшем случае, а именно в случае физически и химически однородного тела, полной системой параметров являются давление, объем (удельный или мольный) и температура. Поскольку, пользуясь уравнением состояния, каждый из этих трех параметров принципиально можно представить как функцию двух других, понятно, что в указанном простейшем случае и внутреннюю энергию можно представить как функцию только двух параметров, например давления и температуры. Но уравнение состояния по отношению к удельному объему тела не однозначно (при некоторых значениях давления и температуры могут сосуществовать две или три фазы). Поэтому, если внутреннюю энергию рассматривать как функцию *не*

полной системы параметров, например только двух параметров — давления и температуры, то эта функция из-за свойств уравнения состояния может оказаться неоднозначной.

Обратимся к четвертой важной формулировке первого начала: *перпетуум-мобиле первого рода невозможно*. Самоочевидна связь этой формулировки с предыдущей формулировкой, если учесть, что под перпетуум-мобиле мы понимаем машину, которая, повторяя произвольное число раз один и тот же процесс, была бы способна производить работу в количестве, большем, чем энергия, потребляемая этой машиной. Любопытно отметить, что французская академия наук еще в 1775 г. постановила не принимать больше к рассмотрению какие бы то ни было проекты перпетуум-мобиле первого рода. Тем не менее на протяжении 70 лет все еще не был осознан закон сохранения энергии и не было еще точно определено понятие энергии. Причина этого, конечно, крылась в том, что для «баланса» энергии при ее превращении из одного вида в другой не хватало (по вине господствовавшей тогда теории теплорода) представления о внутренней энергии тел.

С аналитической точки зрения большое преимущество имеет пятая формулировка первого начала: *бесконечно малое изменение внутренней энергии является полным дифференциалом*.

Если U есть энергия, то dU есть полный дифференциал, тогда как ни элемент работы δA , ни элемент тепла δQ не являются дифференциалами, потому что и теплота, и работа не являются функциями состояния, а представляют собой величины, зависящие от пути процесса.

Здесь уместно кратко остановиться на смысле понятий «работа» и «тепло». Поскольку мое определение понятия «тепло» вызвало, в печати дискуссию, в последующих разделах этой главы я постараюсь рассеять некоторые заблуждения, связанные с понятием «тепло», и подробнее осветить суть вопроса.

Теплота и работа являются двумя единственно возможными формами перехода энергии от одного тела к другому. Оба понятия — и работу, и тепло — мы должны связывать не с каким-то «запасом», но с процессом. Когда мы говорим о работе, мы представляем себе процесс перемещения точек приложения сил. Энергия тела, производящего работу, переходит к телу, на которое работа затрачивается. Аналогично, когда мы говорим о теплоте, мы всегда должны мыслить два тела: одно, которое отдает энергию в форме тепла, и другое, которое получает энергию в форме тепла.

В механике различают четыре формы передачи энергии: тяга, удар, волновая передача и конвекция. Для термодинамики эта механическая классификация форм передачи энергии совершенно несущественна. В термодинамике мы должны расчленять передаваемую энергию на две части: на тепло и работу. *Работа* — это в обобщенном термодинамическом понимании *любая макрофизическая форма передачи энергии*, тогда как *теплота* представляет собой *совокупность микрофизических процессов передачи энергии*.

Понятия «работа» и «тепло» имеют в термодинамике методическое значение, они отнюдь не определяют собой содержания термодинамики. Неправильно рассматривать термодинамику как науку о тепловых явлениях или тем паче о тепловой энергии, которая вообще не существует. Термодинамика есть наука, прилагающая основные принципы физики — закон сохранения и закон деградации энергии — ко всем процессам, имеющим молекулярно-статистическую основу, и приводящим к состоянию равновесия.

С указанным пониманием тепла и работы связана шестая формулировка первого начала: *сумма тепла и работы не зависит от пути процесса*.

Поскольку, по определению, энергия измеряется суммой сообщенного телу тепла и затраченной на тело работы, то понятно, что приведенная выше формулировка адекватна утверждению, что энергия есть однозначная функция состояния. Итак, если при переходе тела из некоторого состояния 1 в состояние 2 приращение энергии равно $U_2 - U_1$, сообщенная теплота

есть Q и затраченная работа есть \bar{A} , то

$$U_2 - U_1 = Q + \bar{A},$$

или, в дифференциальной форме,

$$dU = \delta Q + \delta \bar{A}.$$

Обычно в формулы термодинамики вводят работу A , производимую телом, которая, очевидно, численно равна работе \bar{A} , затрачиваемой на тело, и противоположна ей по знаку. В этом обычном обозначении

$$Q = \Delta U + A, \quad (2.1)$$

где

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

и, в дифференциальной форме,

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (2.2)$$

где dU — полный дифференциал энергии. Важно, что поскольку никакие ограничения не были упомянуты в рассмотренных формулировках, то, стало быть, написанное уравнение первого начала в равной мере справедливо как для равновесных, так и для неравновесных процессов.

2.3. Различные трактовки понятия тепла

В 1937 г. мной были опубликованы¹ две статьи по вопросам термодинамики. Обнаружилось, что некоторые читатели одно место в этих статьях сочли особо спорным. Я с настойчивостью утверждал, что теплота не есть вид энергии, хотя и представляет собой форму движения. Таким образом, оказался затронутым вопрос о различии понятий «форма движения» и «вид энергии», причем этот вопрос был выдвинут в отношении теплоты, которая в подавляющем большинстве курсов физики трактуется как вид энергии.

Предназначая свои статьи для специалистов по термодинамике, я считал, что не нужно пояснять, какие из высказанных мной взглядов являются новыми и какие не являются новыми. Это привело к недоразумениям. В частности, утверждение, что теплота не есть вид энергии, вызвало больше всего возражений, хотя это утверждение, во-первых, пожалуй, старше меня по возрасту и, во-вторых, представляет собой бесспорную истину.

Но почему же тогда во множестве книг пишут противоположное? Любая фраза, в которой о теплоте говорится как о виде энергии (кем бы ни была сказана эта фраза — учеником или академиком, физиком или философом), есть проявление некоторой неграмотности в современной терминологии. Не слишком ли сильно? Не обидно ли это для многих крупных ученых, называющих теплоту видом энергии? Нет, всем корректорам известно, что крупные ученые и философы нередко делают смешные орфографические ошибки. Между орфографической ошибкой и фразой «теплота есть вид энергии» имеется довольно далеко идущая аналогия. Часто и то и другое — следствие описки, небрежности, неряшливости. Бывает, что то и другое есть следствие незнания. Наконец, случается и так, что правила орфографии изменились и ошибки появляются от неумения отучиться писать по старинке. Точно так же некоторые ученые путают по старинке теплоту с внутренней энергией и, желая сказать, что внутренняя энергия есть один из видов энергии, говорят неграмотно, что теплота есть вид энергии.

¹ К. А. Путилов. Изв. АН СССР. Отд. матем. и естеств. наук, Секция хим., 1937, № 4, 701, 715.