

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.

Вследствие указанных причин в большинстве учебников физики и даже во многих курсах термодинамики можно встретить не имеющие никакого смысла фразы: «тепло есть вид энергии», «тепловая энергия», «запас тепла» и т. п. По аналогичным причинам во многих наших учебниках имеются столь же неграмотные заявления о том, что материя якобы может превратиться в энергию. Вот примеры таких традиционных ляпсусов:

А. Ф. И о ф ф е. «Курс физики», ч. I, 1927, стр. 73 и 33: «Теплота есть действительно один из видов энергии, ...теплота и работа одно и то же»; стр. 78: «Особые свойства тепловой энергии».

Р. А. М и л л и к е н. «Элементы физики», 1931, стр. 138 и др., рассуждения о «тепловой энергии»; стр. 136: «Энергия и материя могут переходить друг в друга».

О. Д. Х в о л ь с о н. «Курс физики», т. III, 1923, стр. 1: «Тепловая энергия есть кинетическая энергия молекул»; т. V, стр. 368: «Масса радия превращается в энергию»; О н ж е: «Физика наших дней», 1930, стр. 31: «Теплота есть кинетическая энергия молекул и атомов»; стр. 35: «Материя может превратиться в энергию».

К. Ш е ф е р. «Теория теплоты», ч. I, стр. 80: «Теплота есть вид энергии».

Н. А. К о л о с о в с к и й. «Химическая термодинамика», 1932, стр. 4: «Теплота представляет собой... энергию движения молекул»; стр. 49: «Материя (масса) представляет собой только особый вид энергии, и потому становится возможным говорить о взаимных превращениях материи и энергии».

Д. Л. Т а г е е в. «Краткий курс технической термодинамики», 1931, стр. 4: «Теплота тоже является особым видом энергии».

А. Ф. К а п у с т и н с к и й. «Термодинамика химических реакций», 1933, стр. 10: «Тепловой запас ...есть ...энергия движения частиц»; стр. 29: «Энергия ...движения ...частиц называется внутренней энергией...». Во втором издании (1935 г.) автор устраняет эту путаницу в понятиях и, между прочим, делает новый ляпсус, выдавая мою фразу о теплоте как форме передачи энергии за якобы сказанную Дюгемом. (Дюгем был плохим философом и плохим, хотя и плодовитым, термодинамиком, поэтому я с удовольствием отмечаю, что расхожусь с ним как в философских, так и в некоторых термодинамических взглядах.)

А. Б е р л и н е р. «Курс физики», т. I, вып. 2, 1935, стр. 103: «Теплота есть вид энергии».

В. А. М и х е л ь с о н. «Физика», 1930, стр. 187: «Тепловая энергия есть частный вид энергии механической».

Тот или иной автор, заметив подчас, что он напрасно назвал теплоту видом энергии, спешит дать пояснения, после которых делается просто невозможным понять, что же собственно, по мнению автора, представляет собой теплота. Например, Милликен в «Элементах физики» (русский перевод 1931 г.) на стр. 141 пишет: «Тепловая энергия, поглощаемая телом при переходе из твердого состояния в жидкое, уже не существует в жидкости в виде тепла. Эта энергия вообще прекратила свое существование как тепловая энергия». И тем не менее Милликен на протяжении всей книги говорит о «запасах тепла в теле» и включает в эти мнимые «запасы» и теплоту плавления, и теплоту парообразования. Вальтер и Реттингер в небольшой, но весьма распространенной среди техников книге «Термодинамика» (русский перевод 1923 г., стр. 7) уверяли читателя, будто теплота существует в двух состояниях — в кинетическом и потенциальном.

Число подобных примеров легко увеличить до нескольких десятков. К сожалению, правильная трактовка понятия тепла встречается в учебных руководствах реже, чем искаженная. Более или менее правильный подход к понятию тепла и к классификации видов энергии, пожалуй, представляет даже исключение.

Некоторые авторы ограничиваются сопоставлением понятий тепла, работы и энергии, но воздерживаются от прямого вывода из этого сопоставления. Например, А. Б. Млодзеевский в своей книге «Термодинамика и теория фаз» (1922, стр. 12) совершенно правильно подчеркивает, что «выражение — энергия есть функция состояния — есть не что иное, как другая формулировка закона сохранения энергии». Далее он поясняет, что теплота не является функцией состояния, но от прямого вывода из этого сопоставления, что, стало быть, теплоту нельзя рассматривать как вид энергии, он, к сожалению, воздерживается.

Как известно, по первому началу термодинамики (2.1) $Q = A + U_2 - U_1$. Зависимость работы A от «пути процесса» легко может быть иллюстрирована графически. Например, пусть тело производит работу вследствие равновесного расширения. Отложим на оси абсцисс объемы и на оси ординат — давления; тогда равновесный переход тела из некоторого состояния с энергией U_1 в другое с энергией U_2 можно, как известно, изобразить кривой, проведенной через промежуточные состояния тела. Площадь, ограниченная сверху этой кривой и с боков ординатами, проведенными через начальную и конечную точки, пропорциональна работе расширения тела $A = \int p dv$. Очевидно, что для разных кривых $p = f_1(v)$, $p = f_2(v)$, проведенных между заданными точками, указанные площади различны, т. е. различны работы. Но величина $(U_2 - U_1)$ одинакова для всех путей перехода: следовательно, по первому началу термодинамики, насколько различаются работы, настолько же различаются для разных путей перехода и теплоты. Итак, работа и тепло в одинаковой мере зависят от пути процесса, тогда как энергия не может зависеть от пути процесса (изменение энергии всецело определяется начальным и конечным состояниями тела).

Понимая, что теплота не есть вид энергии, но не желая вступать в конфликт с учебниками, где по небрежности (а иногда, пожалуй, и по незнанию) написано другое, некоторые авторы ищут выход в том, что вкладывают различное содержание в слова «вид» и «форма» энергии. При этом слово «форма» энергии они применяют почти как синоним слова «размерность» энергии. Например, Улих в своем курсе «Химической термодинамики» (перевод 1933 г., стр. 34), пишет: «Работу и тепло называют ... формами энергии и, так как можно отнять энергию от системы в виде работы и тепла, и в той же форме перенести ее в другие тела...». Улиху оставалось сделать всего лишь один шаг, чтобы правильно и отчетливо сказать, что теплота и работа представляют собой формы передачи энергии от одного тела к другому.

Что касается размерности, то, как известно, есть немало величин, имеющих одинаковую размерность, но весьма различный физический смысл. Если, например, скорость равномерно движущегося поезда разделить на время движения, то получится величина, имеющая размерность ускорения, но не являющаяся ускорением. Другой пример: энтропия имеет размерность теплоемкости, но не является теплоемкостью. Поэтому по меньшей мере смешно теплоту считать видом энергии на том лишь основании, что тепло, как и работа, имеет размерность энергии. Термин «размерность» общепринят, и нет смысла заменять его словом «форма»; это породило бы еще большую путаницу вследствие того, что многие авторы применяют выражения «виды энергии» и «формы энергии» как равнозначные.

Некоторые авторы, понимая, что трактовка тепла как вида энергии недопустима, подходят к определению понятия тепла с преувеличенной осторожностью, создавая этим видимость каких-то в действительности не существующих трудностей. Например, Эйкен в первом томе «Курса химической физики» (русский перевод 1935 г., стр. 86) пишет: «При более подробном рассмотрении оказывается, что мы в основном вовсе не знаем или по крайней мере не можем непосредственно точно определить, что именно следует понимать под «теплотой». Ведь подобно понятию температура понятие теплота

чуждо основным представлениям механики, которые обычно являются отправным пунктом... Рекомендуется сначала отказаться от определения понятия «теплота и вместо этого попытаться ответить с чисто экспериментальной точки зрения на ...вопрос: какими воздействиями можно вызвать изменение термического состояния». Далее (стр. 102) Эйкен дает по сути дела почти верное, но в некоторых отношениях неудачно сформулированное определение понятия тепла: «Изменение внутренней энергии системы никоим образом не связано только с сообщением или отнятием механической энергии, оно может происходить также и другим путем, например в результате перехода внутренней энергии от другой системы. *Та часть внутренней энергии, которая может быть перенесена особенно легко, и представляет собой то что мы до сих пор называли теплотой....* Поэтому в дальнейшем под теплотой, если даже это выражение будет применяться и неудачно, следует подразумевать не наличие совершенно определенного специального вида энергии (такое определение было бы совершенно неясным, и поэтому его следует по возможности избегать), но сообщенное телу (или отнятое от него) количество энергии, которое происходит непосредственно из запаса внутренней энергии какого-либо другого тела». Здесь неудачно сказано о «части внутренней энергии, которая может быть перенесена особенно легко». Помимо того, что понятие «легкости» переноса весьма туманно, Эйкен, как показывает заключительная фраза приведенной цитаты, видимо, и сам сознавал, что никакой такой определенной «части» внутренней энергии нет. Напрасно также Эйкен смягчает замечание, что определение тепла как вида энергии «было бы совершенно неясным»: оно просто было бы ошибочным. Но в общем Эйкен довольно близко подходит к правильному пониманию тепла как формы передачи энергии.

Многие авторы современных солидных руководств по термодинамике (например, Констамм, Планк, Льюис), касаясь понятия тепла, ограничиваются пояснениями феноменологического характера, из которых, однако, при внимательном чтении явствует, что под теплотой они разумеют не какой-либо вид энергии, а приток или отдачу энергии, происходящие не в форме работы.

Льюис и Рендэлл в книге «Термодинамика и свободная энергия химических веществ» (которая в русском переводе 1936 г. озаглавлена «Химическая термодинамика») раздел, посвященный теплоте и работе (стр. 37), начинают так: «Теплота и работа — два понятия, сыгравшие большую роль в развитии термодинамики, нередко вносящие много неопределенности и неясности в эту строго количественную науку. Мы не отказываемся от употребления этих понятий, хотя дать им исчерпывающее определение можно будет лишь в одной из следующих глав. (Это осталось несделанным.— К. П.) Ограничимся пока разъяснениями такого рода: если система теряет энергию путем лучеиспускания или теплопроводности, то она отдает теплоту, если же потеря энергии вызвана преодолением системой внешних механических сил, то система производит работу». К этому редактор перевода П. А. Ребиндер, ссылаясь на меня, добавляет: «Строго говоря, теплоту не следует рассматривать как *форму энергии*, а скорее как *форму передачи энергии*, в связи с тем, что *теплота и работа* не являются, в противоположность энергии, функциями состояния тела или системы, а зависят от пути перехода, связывающего начальное состояние с конечным, относясь, таким образом, не к состоянию, а к процессу».

Итак, приходится констатировать, что в учебных и в специальных руководствах с определением понятия «тепло» дело обстоит довольно неблагоприятно. Любопытно отметить, что даже терминологическая комиссия Академии наук СССР, работавшая под руководством академика С. А. Чаплыгина и Д. С. Лотге, уклонилась от определения терминов «теплота» и «работа». В 1937 г. Академией наук был издан объемистый (в 120 страниц) проект стандарта термодинамических терминов (Бюллетень XV). В предиде-

словии к нему (стр. 7) читаем: «В предлагаемый список терминов не включены термины — теплота и работа. По решению Комиссии определению этих терминов должна быть посвящена специальная работа, рассматривающая их в связи с другими фундаментальными научно-техническими терминами (энергия, масса, сила и т. д.)».

2.4. Историческая справка

Но почему же в учебной и специальной литературе существует такая путаница с понятием тепла? Какие причины породили путаницу? Чтобы правильно ответить на этот вопрос, нужно хотя бы бегло проследить историю возникновения этой путаницы.

Вплоть до середины прошлого столетия господствовала теория теплорода. Эта теория рассматривала теплоту как особое «весьма тонкое» вещество (флюид), которое обычными телами впитывается в большей или меньшей мере — в зависимости от температурных условий, подобно тому как вода впитывается губкой.

Во многих книгах можно встретить упоминание о теории теплорода как о теории, якобы столь недальновидной и немощной, что у читателя невольно возникает недоумение, как эта теория могла столь долго и упорно владеть умами ученых. В действительности, однако, теория теплорода для своего времени вовсе не была столь наивной, как она представляется нам теперь, когда мы привыкли рассматривать тепловые явления как род движения. Многие факты теория теплорода объясняла, казалось, столь просто и наглядно, что физикам трудно было нацело отказаться от этих объяснений и забыть их даже тогда, когда со всей очевидностью обнаружилось, что эти объяснения в корне ошибочны. В результате теория теплорода, уже будучи ниспровергнутой, продолжала влиять на умы физиков и в некоторой мере влияет и поныне, что сказывается в искаженной трактовке некоторых понятий, в которые после крушения теории теплорода надлежало влить совершенно новое содержание, но для обозначения которых сохранились термины, установленные еще теорией теплорода.

Можно привести немало примеров этого влияния некогда господствовавшей теории теплорода на принятую сейчас научную терминологию. Для обозначения теплового флюида, содержащегося в теле, служили два термина — «запас тепла» и «калорик». От второго из этих терминов произошли современные термины: калория, калориметры, калорические величины. Живучесть термина «запас тепла», утратившего какой бы то ни было смысл, была показана в вышеприведенных цитатах.

Тот факт, что различным по химической природе телам, взятым в одинаковой массе, надо, вообще говоря, сообщить различные количества тепла, чтобы нагреть их до одинаковой температуры, теория теплорода объясняла их неодинаковой восприимчивостью к теплороду. Здесь устанавливалась аналогия с неодинаковой способностью различных тел впитывать внутрь себя воду. Представлению о гигроскопичности тел в теории теплорода соответствовало понятие о их *теплоемкости*. Каждому преподавателю физики известно, что этот термин своей мнимой наглядностью только затрудняет понимание того факта, что всякое тело имеет множество разных по величине теплоемкостей: теплоемкость при неизменном объеме, при неизменном давлении, при неизменности любого параметра. Особенно же плохо то, что термин «теплоемкость» невольно влечет мысль на путь ложного представления о тепле, как о чем-то, что содержится в теле.

Факт нагревания тел при трении теория теплорода объясняла тем, что трение перемещает теплород из окружающей среды в трущиеся тела, причем предполагалось, что работа, затрачиваемая на трение, идет на перемещение теплорода с низкого температурного уровня на высокий. Работа, развиваемая паровыми машинами, объяснялась падением теплорода с высокого тем-