

ляется неравенством

$$dS > \frac{\delta Q_{\text{неравн}}}{T}. \quad (3.11)$$

Чтобы обосновать это неравенство и установить такие фундаментальные широчайшие следствия этого неравенства, как теорема о возрастании энтропии, «принцип положительной» («принцип максимальной») работы и критерии термодинамического равновесия, мы должны прежде всего уточнить само разделение процессов на обратимые и необратимые.

В классических и позднейших произведениях по термодинамике мы не находим не подчиненного статистике безупречно строгого обоснования термодинамических неравенств, за исключением, пожалуй, того хода рассуждений, который был разработан Планком. Гиббс в своих термодинамических сочинениях без доказательств просто постулировал критерии равновесия. Термодинамические неравенства давно безоговорочно приняты всеми не потому, что они были строго доказаны в термодинамике, но потому, что к ним как к главному и важнейшему выводу, в отношении которого не оставалось возможности сомневаться, привело статистическое истолкование второго начала. Что же касается чисто термодинамических выводов неравенств из невозможности перпетуум-мобиле второго рода или из других достаточно широких формулировок второго начала, то, за исключением упомянутого доказательства Планка, они подчас оказывались настолько нестрогими, что многие авторы склонны были усматривать в этой части термодинамики неискрывимый логический изъян. Этим и объясняется, что в ряде солидных руководств, таких как термодинамика Буасса, отрицается возможность чисто термодинамического, не основанного на статистике, обоснования теоремы о возрастании энтропии.

Хотя доказательство, разработанное Планком (изложенное им в первой редакции в его известной книге «Термодинамика» и после работ Каратеодори — во второй редакции в статье, опубликованной в 1926 г.), оставляет у некоторых, в том числе и у меня, чувство неудовлетворенности своей громоздкостью и искусственностью построения, но, безусловно, большой заслугой Планка является то, что он, по-видимому, первый придал понятиям «обратимость» и «необратимость», которые постепенно сложились в предыдущем развитии термодинамики, ту определенность и философскую широту, от которых в значительной мере зависит успех логического развития второго начала.

Но наряду с представлением об обратимости и необратимости в предыдущем развитии термодинамики постепенно сложились еще понятия равновесности и неравновесности, квазистатичности и нестатичности процессов, стабильности и лабильности состояний, причем при ближайшем рассмотрении можно видеть, что и в отношении этих понятий пришло время подвести итог их постепенному оформлению и закрепить за некоторыми из них не вполне то содержание, к которому приучают нас недостаточно строгие руководства по термодинамике.

Излагая охарактеризованный круг вопросов, я буду лишен возможности ссылаться на авторитеты, хотя в понимании проблемы необратимости в общем я следую Планку. Сейчас ограничусь некоторыми определениями и кратким пояснением этих определений; более подробно те же понятия и некоторые, связанные с ними вопросы (в частности, обоснование нового определения равновесности процесса) будут рассмотрены в следующем разделе.

3.7. Обратимые и необратимые процессы

Часто понятие обратимости выводят из представления о равновесности или квазистатичности. Мне кажется, что это нерациональный подход к вопросу. Деление процессов на обратимые и необратимые вытекает непо-

средственно из содержания второго начала термодинамики. В таком духе оно и было дано Планком, но мне кажется, что нужно пойти дальше и более строго и определенно разграничить понятия обратимости и равновесности, так как обычное определение равновесности или квазистатичности процессов не дает возможности строго провести термодинамическое доказательство теоремы о возрастании энтропии в изолированной системе.

Из второго начала термодинамики (из невозможности некомпенсированного перехода тепла в работу) вытекает *невозможность* множества процессов, составной частью которых должен был бы явиться некомпенсированный переход тепла в работу. Таким образом, второе начало термодинамики побуждает нас разграничить многообразие мыслимых процессов, допускаемых первым началом, на две области: на область, которая складается из процессов, *возможных* и действительно происходящих, и на область процессов, которые можно лишь воображать, но которые в силу законов природы *невозможно* реализовать. Это влечет за собой деление всех процессов, которые могут происходить в действительности, на два класса: процессы *обратимые* и процессы *необратимые*.

Термин «обратимый» и «необратимый», строго говоря, относятся к процессу, испытываемому изолированной системой в целом.

Если изолированная система испытывает некоторый процесс, который символически обозначим так:

$$1 \rightarrow 2$$

(из состояния 1 система переходит в состояние 2), то может представиться два, и только два, случая. Во-первых, может оказаться, что осуществить обратный переход системы из 2 в 1 , не производя при этом никаких изменений в окружающих телах, невозможно вследствие того, что для этого надо было бы некомпенсированно превратить в работу некоторое количество тепла.

В этом случае испытанный изолированной системой процесс ($1 \rightarrow 2$) мы называем *необратимым*. Во-вторых может оказаться, что обратный переход системы из 2 в 1 возможен без каких бы то ни было изменений в окружающих телах. В этом случае испытанный изолированной системой процесс $1 \rightarrow 2$ мы называем *обратимым*.

Иначе говоря, любой процесс, переводящий изолированную систему из состояния 1 в состояние 2 , есть процесс *обратимый*, если процесс, имеющий единственным своим результатом возвращение системы из состояния 2 в 1 , *возможен*.

Любой процесс, переводящий изолированную систему из состояния 1 в состояние 2 , есть процесс *необратимый*, если процесс, имеющий единственным своим результатом возвращение системы из состояния 2 в 1 , *невозможен*. Здесь слова «единственным результатом» имеют смысл запрета каких бы то ни было изменений термодинамического состояния окружающих (не входящих в состав системы) тел.

Желая выяснить, обратим ли процесс $1 \rightarrow 2$ или необратим, и обсуждая с этой целью вопрос, возможно ли данную изолированную систему перевести обратно из состояния 2 в 1 без изменения в окружающих телах, надо иметь в виду, что никакие *энергетические* воздействия на систему, ни затраты работы, ни затраты тепла мы не имеем права осуществлять. Действительно, было бы бессмысленно пытаться вернуть систему из 2 в 1 посредством затраты (или отнятия) только работы или только тепла; это повлекло бы за собой изменение полной энергии системы, тогда как (по условию изолированности) состояния 2 и 1 изоэнергетичны. Следовательно, чтобы вернуть систему из 2 в 1 , надо одновременно с затратой работы отнимать от системы эквивалентное количество тепла или, сообщая тепло, отбирать работу. Но такого рода воздействие на систему запрещено, потому что, в чем бы конкретно оно ни заключалось, оно неизбежно связано с изменением состояния

тел (не входящих в систему), которые привлечены в качестве нагревателей или холодильников.

Таким образом, при обсуждении вопроса о возможности возвращения системы из 2 и 1 речь может идти только о такого рода воздействиях на систему, которые не связаны с затратой энергии и которые поэтому можно назвать воздействиями *конструктивными* (подобно задвиганию заслонок, отвертыванию крана, замыканию тока, устранению непроницаемых для тепла перегородок, сталкиванию тела, лежавшего на краю горизонтальной гладкой подставки, и т.д.).

Вышеприведенное определение необратимости — наиболее строгое. В то же время оно является наиболее рациональным и простым, что легко подтвердить анализом обычных примеров.

Первый пример — трение. При трении, какова бы ни была конкретная обстановка процесса, работа, направленная на преодоление сил трения, идет сначала на нагревание трущихся поверхностей, а затем благодаря теплоотдаче на нагревание глубже лежащих слоев — вещества трущихся тел и окружающих тел. Так как обратное некомпенсированное превращение тепла в работу невозможно, то всякий процесс, сопровождающийся трением, необратим.

Второй пример — теплоотдача при конечной разности температур. В этом случае, чтобы вернуть систему в исходное состояние без изменений в окружающих телах, надо было бы отнять теплоту у холодного тела, превратить ее некомпенсированно в работу, затратить полученную работу на увеличение внутренней энергии нагретого тела. Так как составной частью этого процесса должно было бы явиться некомпенсированное превращение тепла в работу, что невозможно, то и весь процесс в целом невозможен, а значит, процесс теплоотдачи при конечной разности температур необратим.

Третий пример — расширение газа в пустоту. В данном случае вопрос об обратимости сводится к тому, возможен ли процесс, единственный результат которого заключался бы в сжатии газа без изменения его внутренней энергии. На сжатие тела надо затратить работу; чтобы внутренняя энергия тела не увеличилась, надо отнять от него эквивалентное количество тепла; наконец, чтобы никаких изменений в окружающем мире не произошло, надо было бы эту отнятую у газа теплоту некомпенсированно превратить в работу, что невозможно. Значит, расширение газа в пустоту необратимо.

3.8. Равновесные и неравновесные процессы

Во введении в разделе о преимуществах статистики было отмечено, что термодинамическое содержание понятия равновесного состояния находится в некотором противоречии с выводами статистики. Абстрагируя (а именно, игнорируя флуктуации), в термодинамике считают, что тело находится в *равновесном состоянии, если все характеризующие его признаки (без влияния извне каких-либо процессов) во всех участках тела будут оставаться неизменными сколь угодно долго.*

В физике часто приходится рассматривать *стационарные состояния*. Понятие стационарности не совпадает с понятием равновесности. Понятие стационарности шире. Общим для этих понятий является требование, чтобы параметры, характеризующие состояние тела во всех его участках, оставались неизменными во времени. Если это требование соблюдено, мы уже имеем право назвать состояние стационарным. В частности, состояние называется стационарным тогда, когда эта неизменность параметров поддерживается протеканием какого-либо процесса, который извне воздействует на тело. Следовательно, легко может оказаться, что состояние является стационарным, но неравновесным. Например, кирпичная стена дома в случае установившейся холодной погоды может находиться в стационарном состоянии, если ее внутренняя поверхность получает в единицу времени такое же количест-