нагретого тела. В результате тепло Q перейдет от менее нагретого тела к телу более нагретому, и никаких других изменений не произойдет. Но это есть процесс Клаузиуса, а он невозможен. Получившееся противоречие и доказывает высказанное утверждение. При доказательстве мы использовали не только постулат Клаузиуса, но воспользовались также утверждением, что потенциальная энергия поднятого груза может быть целиком превращена в тепло. Это утверждение является следствием повседневных наблюдений, которые показывают, что при столкновении падающего груза с препятствием он в конце концов останавливается. Потенциальная энергия груза пропадает, зато появляется тепло. По первому принципу термодинамики количество этого тепла точно равно потерянной потенциальной энергии груза.

Таким образом, *постулаты Клаузиуса и Томсона — Планка эквивалентны.*

§ 29. Обратимые и необратимые процессы

1. Если в результате какого-либо процесса система переходит из состояния A в другое состояние B и если возможно вернуть ее хотя бы одним способом в исходное состояние A и притом так, чтобы во всех остальных телах не произошло никаких изменений, то этот процесс называется *обратимым*. Если же это сделать невозможно, то процесс называется *необратимым*. Примером необратимого процесса может служить переход тепла от более нагретого тела к телу менее нагретому при тепловом контакте этих тел. Необратимость такого процесса непосредственно следует из постулата Клаузиуса. Необратимым является процесс получения тепла путем трения. Его необратимость является непосредственным следствием постулата Томсона — Планка.

Если систему из конечного состояния B можно вернуть в исходное состояние A *безразлично каким способом*, не требуя, чтобы она обязательно проходила через ту же последовательность состояний, что и в прямом процессе $A \to B$, то такой процесс называют *обратимым в широком смысле слова*. Если же возможен обратный процесс $B \to A$, переводящий систему в исходное состояние A через ту же последовательность состояний, через которую прошла система в прямом процессе $A \to B$, то процесс $A \to B$ называется *обратимым в узком смысле слова*. Всякий процесс, обратимый в узком смысле, очевидно, обратим и в широком смысле слова.

2. *Все квазистатические процессы обратимы и притом в узком смысле слова.* В самом деле, квазистатический процесс есть бесконечно медленный процесс, состоящий из последовательности состояний равновесия, точнее, состояний, бесконечно мало отличающихся от равновесных. Если взять какое-либо равновесное состояние, то по самому определению равновесия в отсутствие внешних воздей-

ствий оно будет сохраняться неограниченно долго. Чтобы начался процесс, надо с помощью внешних воздействий нарушить равновесие, т. е. менять внешние параметры и температуру окружающей среды. Для квазистатичности процесса необходимо, чтобы эти изменения совершались настолько медленно, чтобы в каждый момент времени система находилась либо в равновесном состоянии, либо в состоянии, как угодно мало отличающемся от равновесного. В пределе получится идеализированный процесс, идущий с бесконечно малой скоростью и состоящий из последовательных состояний равновесия. С помощью таких процессов можно перевести систему из начального состояния A в конечное состояние B, отстоящее от начального как угодно далеко; для этого требуется только достаточно большое время. Если изменить знаки бесконечно малых приращений внешних параметров и температуры на противоположные, то система снова вернется в исходное состояние A, проходя в обратном порядке через состояния, бесконечно мало отличающиеся от состояний, через которые она проходила ранее. В пределе, когда прямой и обратный процессы сделаются строго равновесными, исчезнет и это бесконечно малое различие. При этом в результате прямого и обратного процесса в окружающих телах не произойдет никаких изменений, поскольку внешние параметры и температура окружающей среды вернутся в точности к своим исходным значениям. Таким образом, квазистатический процесс не только обратим вообще, но обратим в узком смысле слова. Это утверждение постоянно используется в термодинамике. В частности, *всякий квазистатический круговой процесс может происходить как в прямом, так и в обратном направлении.*

3. В качестве примера, иллюстрирующего приведенные рассуждения, рассмотрим адиабатически изолированную систему — газ в цилиндре с поршнем, который может в нем свободно перемещаться. Внешнее давление P можно осуществить, положив на поршень груз. Для того чтобы груз можно было увеличивать или уменьшать малыми порциями, предположим, что поршень нагружен мелким песком. Пусть газ адиабатически расширяется, переходя из начального равновесного состояния M в конечное равновесное состояние N (рис. 24). Этот процесс можно осуществить, снимая с поршня песчинку за песчинкой. Снимем сначала одну песчинку. Внешнее давление уменьшится, и газ расширится. Это расширение очень мало, и его трудно заметить. Но по существу оно представляет собой неравновесный процесс, сопровождающийся весьма сложными макроскопическими движениями газа. Однако в конце концов газ придет в состояние равновесия, и это состояние изобразится на графике точкой 1. Сняв вторую песчинку, заставим газ совершить второй

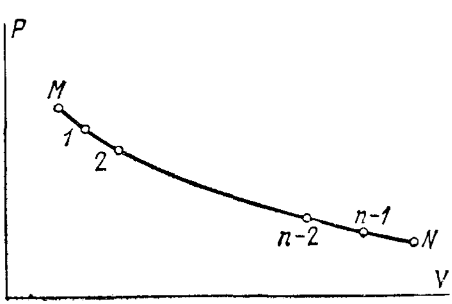

Рис. 24.

неравновесный процесс, переводящий его в равновесное состояние *2*. Повторив эту операцию n раз, переведем газ в конце концов в равновесное состояние N, пройдя при этом через конечное число $(n-1)$ равновесных состояний *1*, *2*, ..., $(n-1)$. Каждое из этих состояний получается из предыдущего путем малого, но неравновесного процесса, так что процесс $M \to N$ в целом является неравновесным.

Попытаемся теперь вернуть газ в исходное состояние M, последовательно нагружая поршень по одной песчинке. При этом мы пройдем через ту же конечную последовательность равновесных состояний $(n-1)$, $(n-2)$, ..., M, что и в прямом процессе. Однако промежуточные малые неравновесные процессы будут уже иными. Например, в обратном процессе $N \to (n-1)$ газ сжимается при несколько большем давлении (число песчинок на поршне больше на одну), чем в прямом процессе $(n-1) \to N$. Поэтому при обратном процессе над газом надо совершить несколько большую работу, чем в прямом процессе. Процесс $M \to N$, состоящий из конечного числа равновесных состояний, в целом является необратимым.

Допустим теперь, что вес песчинки неограниченно уменьшается, а общее число песчинок неограниченно растет, однако так, что общий вес песка остается неизменным. Тогда в пределе неравновесный процесс $M \to N$ перейдет в квазистатический процесс и изобразится непрерывной линией MN. Той же линией, но проходимой в противоположном направлении, изобразится и обратный процесс. Работа, совершаемая газом как в прямом, так и в обратном процессе, численно одна и та же и изображается площадью криволинейной трапеции, ограниченной сверху кривой MN. Для приведения газа в исходное состояние должна быть затрачена такая же работа, какую совершил сам газ при расширении. Ясно поэтому, что квазистатическое расширение газа, которое мы рассмотрели, есть процесс обратимый и притом в узком смысле слова.

ЗАДАЧИ

1. Моль идеального газа с постоянной теплоемкостью C_V заключен в цилиндр с адиабатическими стенками и поршнем, который может перемещаться в цилиндре без трения. Поршень находится под постоянным внешним давлением P_1. В некоторый момент времени внешнее давление скачкообразно уменьшают или увеличивают до P_2. (Этого можно достигнуть, снимая часть груза с поршня или добавляя новый груз.) В результате газ адиабатически изменяет свой объем. Вычислить температуру и объем газа после того как установится термодинамическое равновесие.

Решение. Тепло, полученное газом при адиабатическом расширении или сжатии, равно нулю. Работа, совершенная газом, $A = P_2\Delta V$, поэтому $\Delta U + P_2\Delta V = 0$. Так как $U = C_V T$, то отсюда находим

$$C_V(T_2 - T_1) + P_2(V_2 - V_1) = 0,$$

или

$$C_V(T_2 - T_1) + RT_2 = P_2V_1.$$

Следовательно,

$$T_2 = \frac{C_V T_1 + P_2 V_1}{C_P}, \tag{29.1}$$

$$V_2 = \frac{RT_2}{P_2}. \tag{29.2}$$

2. В предыдущей задаче после того как установилось состояние равновесия, давление газа снова меняют скачкообразно до первоначального значения P_1. Вычислить окончательную температуру T_3 и окончательный объем газа V_3, когда он опять придет в состояние термодинамического равновесия.

Решение. Используя решение предыдущей задачи, находим

$$T_3 = \frac{C_V T_2 + P_1 V_2}{C_P}, \quad V_3 = \frac{RT_3}{P_1}. \tag{29.3}$$

С помощью уравнения Клапейрона $PV = RT$ и соотношения Роберта Майера $C_P - C_V = R$ выражение для T_3 нетрудно преобразовать к виду

$$T_3 = T_1 + \frac{C_V}{C_P^2} \frac{V_1 (P_2 - P_1)^2}{P_2}. \tag{29.4}$$

Отсюда видно, что в результате обоих адиабатических процессов температура, а с ней и объем газа всегда возрастают. Если давление меняется бесконечно мало, то из (29.4) следует, что температура и объем меняются на бесконечно малые величины *второго порядка*. В первом порядке они остаются неизменными. Отсюда следует, что если адиабатически расширять газ, последовательно снимая с поршня бесконечно малые грузы, а затем снова положить эти грузы на поршень в обратном порядке, то температура и объем газа в конечном состоянии будут отличаться от их значений в исходном состоянии бесконечно мало. В пределе, когда величины последовательно снимаемых грузов стремятся к нулю, а их число к бесконечности, газ совершит конечный процесс, пройдя при сжатии в обратном порядке через ту же последовательность равновесных состояний, через которые он проходил при расширении.

§ 30. Цикл Карно и теорема Карно

1. Из различных круговых процессов особое значение в термодинамике имеет *круговой процесс* или *цикл Карно*. Это квазистатический процесс, в котором систему можно приводить в тепловой контакт с двумя тепловыми резервуарами, имеющими постоянные температуры T_1 и T_2. В дальнейшем предполагается, что $T_1 > T_2$. Тепловой резервуар с более высокой температурой T_1 называется *нагревателем*, а с более низкой температурой T_2 — *холодильником*. Цикл Карно заключается в следующем. Сначала система, имея температуру T_1, приводится в тепловой контакт с нагревателем. Затем, бесконечно медленно уменьшая внешнее давление, ее заставляют квазистатически расширяться по изотерме *12* (рис. 25). При

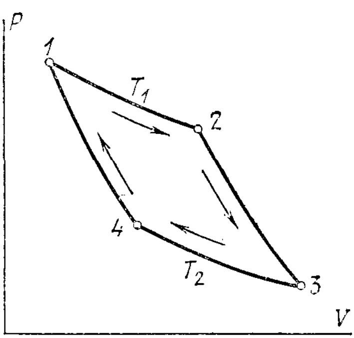

Рис. 25.

этом она заимствует тепло Q_1 от нагревателя и производит работу A_{12} против внешнего давления. После этого систему адиабатически изолируют и заставляют квазистатически расширяться по адиабате *23*, пока ее температура не достигнет температуры холодильника T_2. При адиабатическом расширении система также совершает некоторую работу A_{23} против внешнего давления. В состоянии *3* систему при-