

при совершении рабочим телом обратного цикла можно переносить энергию в форме теплоты от холодного тела к горячему за счет совершения внешними силами соответствующей работы. Этот метод широко применяется в холодильной технике.

Холодильная машина будет тем более экономичной, чем меньше работа  $A' = -A$ , затрачиваемая извне на отвод от холодного тела теплоты  $Q_2$ . Из уравнений (12.2) и (12.5) имеем

$$Q_2 = A - Q_1 = A - \frac{A}{\eta} = -\frac{1-\eta}{\eta} A,$$

или

$$Q_2 = \frac{1-\eta}{\eta} A', \quad (12.7)$$

где  $\eta$  — термический к. п. д. точно такого же прямого цикла.

## § 12.2. Обратимые и необратимые процессы

1. Термодинамический процесс называют **обратимым**, если он допускает возвращение системы в первоначальное состояние без того, чтобы в окружающей среде остались какие-либо изменения.

Иными словами, процесс обратим, если при совершении его системой сначала в прямом, а затем в обратном направлении в исходные состояния возвращаются как сама система, так и все внешние тела, с которыми система взаимодействовала.

Всякий процесс, не удовлетворяющий этим условиям, называют **необратимым**. Необратимый процесс нельзя провести в обратном направлении так,

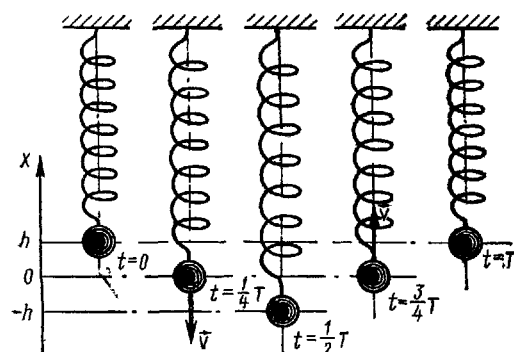


Рис. 12.4.

чтобы совершающая его система прошла через те же самые промежуточные состояния.

2. Примером обратимого процесса могут служить незатухающие колебания, совершаемые в вакууме телом, подвешенным на абсолютно упругой пружине. На рис. 12.4 изображены положения колеблющегося тела в различные моменты времени. Система тело и пружина — консервативная. Поэтому ее механические колебания не вызывают изменения энергии хаотического (теплового) движения частиц системы. Изменение состояния этой системы связано только с изменением ее конфигурации и скорости движения, которые, как видно из рис. 12.4,

полностью повторяются по истечении промежутка времени, равного периоду колебаний  $T$ .

В термодинамике доказано, что *необходимым и достаточным условием обратимости термодинамического процесса является его равновесность*.

Обратимый круговой процесс называют *обратимым циклом*. Например, в предыдущем параграфе были рассмотрены энергетические соотношения для обратимого цикла Карно, совершаемого идеальным газом.

3. Примером необратимого процесса может служить торможение тела вследствие трения. Если на движущееся в какой-либо среде тело не действуют другие силы, кроме сил трения, то скорость тела постепенно уменьшается и оно, в конце концов, останавливается. При этом энергия механического движения тела, как целого, расходуется на увеличение энергии теплового движения частиц тела и окружающей среды. Следовательно, за счет кинетической энергии тела  $W_k$  возрастает внутренняя энергия тела и среды, нагревающихся при трении ( $\Delta U = W_k$ ). Этот *прямой процесс* протекает совершенно *самопроизвольно*: для его осуществления не требуется протекания еще каких-либо процессов в окружающих телах. Иначе обстоит дело с обратным процессом. Для возвращения системы в исходное состояние необходимо, чтобы остановившееся тело вновь пришло в движение за счет соответствующего охлаждения его самого и окружающей среды. Опыты показывают, что хаотическое движение частиц тела не может самопроизвольно вызвать появление упорядоченного движения этих частиц как целого. Для осуществления такого процесса необходим дополнительный, так называемый *компенсирующий процесс*. Он должен заключаться в охлаждении тела и среды до первоначальной температуры, т. е. в отдаче ими холодильнику теплоты  $Q = W_k$  и в совершении над телом работы  $A' = W_k$ . Поэтому, хотя в результате прямого и обратного процессов система тело—среда и возвращается в исходное состояние, состояния внешних тел *изменяются*. Следовательно, *все процессы, сопровождающиеся трением, являются необратимыми*.

Процесс теплообмена между двумя телами, имеющими различную температуру, приводит к выравниванию средних энергий хаотического (теплового) движения частиц обоих тел. Энергия частиц более нагретого тела уменьшается, а энергия частиц более холодного тела увеличивается — температуры тел выравниваются. Этот процесс идет самопроизвольно, как только обеспечен тепловой контакт между телами. Иначе обстоит дело с обратным процессом — процессом нагревания одного тела за счет охлаждения другого, имевшего вначале такую же температуру, что и первое. Известно, что самопроизвольно такой процесс не происходит. Для его осуществления нужно использовать холодильную машину, работа которой неизбежно сопряжена с изменением состояния других, внешних, тел. Следовательно, *процесс теплообмена при конечной разности температур тоже является необратимым*.

Аналогично можно показать необратимость процессов растворения и диффузии.

4. Из рассмотренных примеров необратимых процессов видно, что все они в одном направлении протекают самопроизвольно, а для совершения каждого из этих процессов в обратном направлении необходимо, чтобы параллельно происходил какой-то другой, компенсирующий процесс. Все реальные процессы протекают не бесконечно медленно, а с конечной скоростью. Следовательно, они сопровождаются трением и теплообменом при конечной по величине разности между температурой рабочего тела и температурами нагревателей и холодильников. Поэтому, строго говоря, все реальные процессы необратимы. Однако во многих случаях эти процессы близки к равновесным и их можно приближенно рассматривать как обратимые процессы.

### § 12.3. Второй закон термодинамики

1 В предыдущем параграфе для доказательства необратимости процессов движения с трением и теплообмена при конечной разности между температурами тел мы вынуждены были сослаться на результаты опытов. Это не случайно. Дело в том, что для описания термодинамических процессов одного первого начала термодинамики недостаточно. Выражая всеобщий закон сохранения и превращения энергии, первое начало не позволяет определить направление протекания процессов. В самом деле, процесс самопроизвольной передачи энергии в форме теплоты от холодного тела к горячему ни в какой мере не противоречит первому закону термодинамики, если только уменьшение внутренней энергии первого тела равно энергии, полученной вторым. Однако при опускании раскаленного куска железа в холодную воду никогда не наблюдается явление дальнейшего нагревания железа за счет соответствующего охлаждения воды.

Далее, первое начало не исключает возможности такого процесса, единственным результатом которого было бы превращение теплоты, полученной от некоторого тела, в эквивалентную ей работу. Так, например, основываясь на первом начале, можно было бы попытаться построить периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет охлаждения одного источника теплоты (например, за счет внутренней энергии океанов). Такой двигатель называют **вечным двигателем второго рода**.

Обобщение огромного экспериментального материала привело к выводу о невозможности построения вечного двигателя второго рода. Этот вывод получил название **второго закона (начала) термодинамики**. Существует ряд различных по форме, но совершенно одинаковых по существу формулировок второго начала. Мы ограничимся следующими двумя:

а) *невозможен процесс, единственным результатом которого является превращение всей теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу;*