

## § 12.1. Круговые процессы. Цикл Карно

1. Прежде чем переходить к изложению второго закона термодинамики, необходимо рассмотреть круговые процессы. **Круговым процессом**, или **циклом**, называют такой процесс, в результате которого термодинамическое тело возвращается в исходное состояние. В диаграммах состояния  $p - V$ ,  $p - T$  и др. равновесные круговые процессы изображают в виде замкнутых кривых. Это связано с тем, что в любой диаграмме начальному и конечному состояниям (в рассматриваемом случае — началу и концу кругового процесса) соответствует одна и та же точка.

Круговые процессы лежат в основе всех тепловых машин: двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин, паровых и холодильных машин и т. д. Поэтому изучение свойств различных круговых процессов — одна из важнейших задач физики. Мы ограничимся установлением лишь некоторых общих закономерностей таких процессов.

2. Рассмотрим произвольный равновесный круговой процесс  $C_1 a C_2 b C_1$  (рис. 12.1), совершаемый идеальным газом. Его можно разбить на два процесса — расширение газа из состояния  $C_1$  в состояние  $C_2$  (процесс  $C_1 a C_2$ ) и сжатие газа из состояния  $C_2$  в состояние  $C_1$  (процесс  $C_2 b C_1$ ). При расширении газ совершает положительную работу  $A_1$ , которая, как показано в § 10.4, измеряется площадью фигуры  $V_1 C_1 a C_2 V_2$  на рис. 12.1. Наоборот, для сжатия газа внешние силы совершают положительную работу  $A_2' = -A_2$ , измеряемую площадью фигуры  $V_1 C_1 b C_2 V_2$ . Из рис. 12.1 видно, что  $A_1 > A_2'$ . Поэтому в целом за цикл газ совершает положительную работу  $A = A_1 + A_2 = A_1 - A_2'$ . Она измеряется заштрихованной на рис. 12.1 площадью, ограниченной кривой процесса  $C_1 a C_2 b C_1$ . Такой цикл называют **прямым**. Если бы круговой процесс протекал в обратном направлении (против часовой стрелки), то суммарная работа, совершаемая газом за цикл, оказалась бы отрицательной. Численно она также измерялась бы площадью  $C_1 a C_2 b C_1$ . Такой цикл называют **обратным**.

3. В § 10.1 было показано, что внутренняя энергия тела зависит только от его состояния. Поэтому

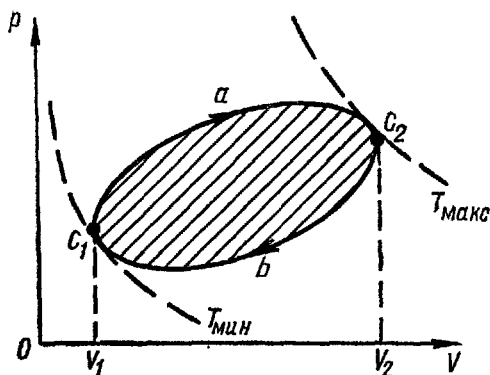


Рис. 12.1.

полное изменение внутренней энергии газа в результате кругового процесса равно нулю. Следовательно, по первому закону термодинамики имеем:

$$Q = \Delta U + A = A, \quad (12.1)$$

где  $Q$  — общее количество теплоты, сообщенной газу в круговом процессе,  $A$  — работа газа в этом процессе.

В прямом цикле  $A > 0$  и  $Q > 0$ , т. е. в прямом цикле газ совершает работу за счет сообщенной ему теплоты. Наоборот, в обратном цикле в а д г а з о м совершается работа  $A' = -A$  ( $A < 0$ ) и от него отводится эквивалентное ей количество теплоты. В тепловом двигателе рабочее тело <sup>1</sup> совершает прямой цикл, а в холодильной машине — обратный цикл.

4. В качестве примера кругового процесса рассмотрим цикл С. Карно. Этот цикл сыграл огромную роль в развитии термодинамики и теплотехники, так как позволил подойти к анализу коэффициентов полезного действия тепловых машин. Циклом Карно называют круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. На рис. 12.2 изображен прямой цикл Карно, состоящий из следующих четырех последовательных процессов:

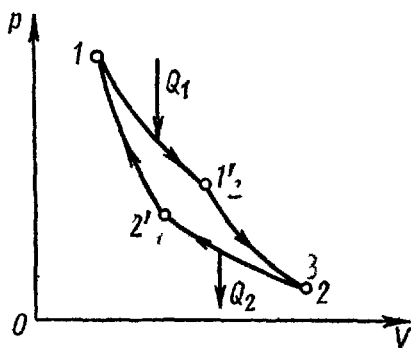


Рис. 12.2.

1—1' — изотермическое расширение при температуре  $T_1$  ( $T_1 = T_1$ ),

1'—2' — адиабатическое расширение,

2—2' — изотермическое сжатие при температуре  $T_2$  ( $T_2 = T_2$ ),

2'—1 — адиабатическое сжатие.

Практическое осуществление цикла Карно можно представить себе следующим образом. Некоторое количество газа заключено в цилиндре с подвижным поршнем. В процессе изотермического расширения 1—1' газ находится в тепловом контакте и равновесии с телом, имеющим температуру  $T_1$ . Таким телом может служить, например, большой резервуар с водой. Это тело называют нагревателем. В процессе 1—1' оно передает газу теплоту  $Q_1$  ( $Q_1 > 0$ ). Ясно, что теплоемкость нагревателя должна быть, строго говоря, бесконечно большой. В противном случае отдача газу теплоты  $Q_1$  вызвала бы понижение температуры нагревателя, а следовательно, и нарушение изотермичности процесса расширения газа. В процессе 1'—2' газ полностью теплоизолируют и его расширение продолжает происходить адиабатически. Это означает, что на участке 1'—2' газ разобщается с нагревателем и заключают в

<sup>1</sup> В термодинамике принято называть рабочим телом газ или какое-либо иное термодинамическое тело, которое совершает круговой процесс и обменивается энергией с другими телами.

адиабатическую оболочку. Например, цилиндр с газом покрывают толстым слоем войлока. Далее, на участке 2—2' газ вновь приводят в тепловой контакт с другим телом, имеющим температуру  $T_2$  ( $T_2 < T_1$ ). Это тело называют холодильником. В процессе 2—2' газ изотермически сжимается и передает холодильнику теплоту  $-Q_2$ <sup>1</sup>. Теплоемкость холодильника также должна быть бесконечно большой. В состоянии 2' газ вновь полностью теплоизолируют и адиабатически сжимают до первоначального состояния 1.

Найдем работу  $A$ , совершаемую идеальным газом в прямом равновесном цикле Карно. На основании уравнения (12.1)

$$A_1 = Q = Q_1 + Q_2 \quad (12.2)$$

или

$$A = Q_1 - |Q_2|. \quad (12.2')$$

Из выражения (10.14) для теплоты, сообщаемой идеальному газу в изотермическом процессе, и закона Бойля—Мариотта следует, что

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \frac{M}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_{1'}}{V_1} = \frac{M}{\mu} RT_1 \ln \frac{p_1}{p_{1'}} \\ Q_2 &= \frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_{2'}}{V_2} = \frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{p_2}{p_{2'}} \end{aligned} \right\} \quad (12.3)$$

Таким образом,

$$A = \frac{M}{\mu} R \left[ T_1 \ln \frac{p_1}{p_{1'}} + T_2 \ln \frac{p_2}{p_{2'}} \right]. \quad (12.3')$$

Покажем, что

$$\frac{p_1}{p_{1'}} = \frac{p_{2'}}{p_2}.$$

Для этого преобразуем отношение  $\frac{p_1}{p_{1'}}$  следующим образом:

$$\frac{p_1}{p_{1'}} = \frac{p_1}{p_{2'}} \cdot \frac{p_{2'}}{p_2} \cdot \frac{p_2}{p_{1'}}.$$

Заменим отношения давлений в адиабатических процессах сжатия  $\left(\frac{p_1}{p_{2'}}\right)$  и расширения  $\left(\frac{p_2}{p_{1'}}\right)$  через отношение температур по уравнению (10.18):

$$\frac{p_1}{p_{2'}} = \left(\frac{T_1}{T_{2'}}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad \text{и} \quad \frac{p_2}{p_{1'}} = \left(\frac{T_2}{T_{1'}}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}},$$

<sup>1</sup> Через  $Q_2$  обозначаем количество теплоты, получаемой газом от холодильника ( $Q_2 < 0$ )

тогда

$$\frac{p_1}{p_{1'}} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{x}{x-1}} \cdot \frac{p_{2'}}{p_2} \cdot \left(\frac{T_2}{T_{1'}}\right)^{\frac{x}{x-1}} = \frac{p_{2'}}{p_2}.$$

Поэтому формулу (12.3') можно привести к такому виду:

$$A = \frac{M}{\mu} R(T_1 - T_2) \ln \frac{p_1}{p_{1'}}. \quad (12.4)$$

5. Из формулы (12.2) видно, что  $A < Q_1$ , т. е. при совершении рабочим телом цикла Карно полезная работа меньше энергии, полученной от нагревателя. Часть этой энергии бесполезно передается холодильнику в форме теплоты. Этот результат справедлив для любого кругового процесса: работа  $A$ , совершаемая за цикл, всегда меньше величины  $Q_{\text{подв}}$  суммы всех количеств теплоты, переданных в рассматриваемом цикле рабочему телу и а г р е в а т е л я м и. Величину

$$\eta = \frac{A}{Q_{\text{подв}}} \quad (12.5)$$

называют **термическим коэффициентом полезного действия** теплового двигателя. Термический к. п. д. характеризует степень термодинамического совершенства и экономичности теплового двигателя. Он зависит от того, какой прямой цикл совершает рабочее тело. В качестве примера найдем термический к. п. д.  $\eta_{\text{к}}$  теплового двигателя, в котором идеальный газ совершает равновесный прямой цикл Карно. Для этого подставим в (12.5) выражения (12.3) и (12.4) для  $Q_{\text{подв}} = = Q_1$  и  $A = Q_1 + Q_2$ :

$$\eta_{\text{к}} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (12.6)$$

или

$$\eta_{\text{к}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (12.6')$$

Итак, искомый термический к. п. д. зависит только от отношения температур холодильника ( $T_2$ ) и нагревателя ( $T_1$ ).

6. В **обратном цикле Карно**, изображенном на рис. 12.3, теплота  $Q_1$  отводится от газа в процессе 1'—1 изотермического сжатия при температуре  $T_1$ , а теплота  $Q_2$  подводится к газу в процессе 2'—2 изотермического расширения при температуре  $T_2 < T_1$ . Следовательно,  $Q_1 < 0$ ,  $Q_2 > 0$  и работа, совершаемая газом за один цикл, отрицательна:  $A = (Q_1 + Q_2) < 0$ . Этот результат справедлив для любого обратного цикла. Из сказанного видно, что

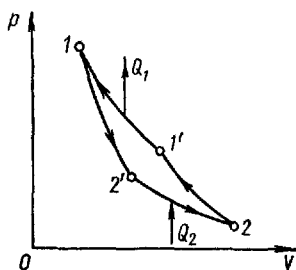


Рис. 12.3.

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,

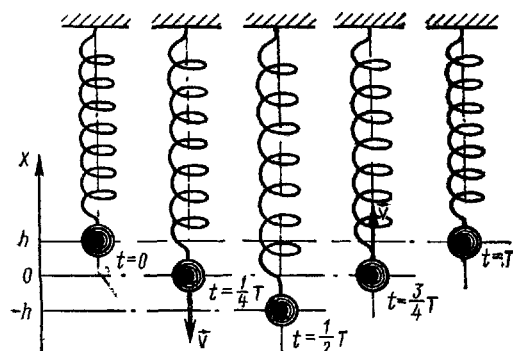


Рис. 12.4.

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,