

11.7 Круговые процессы

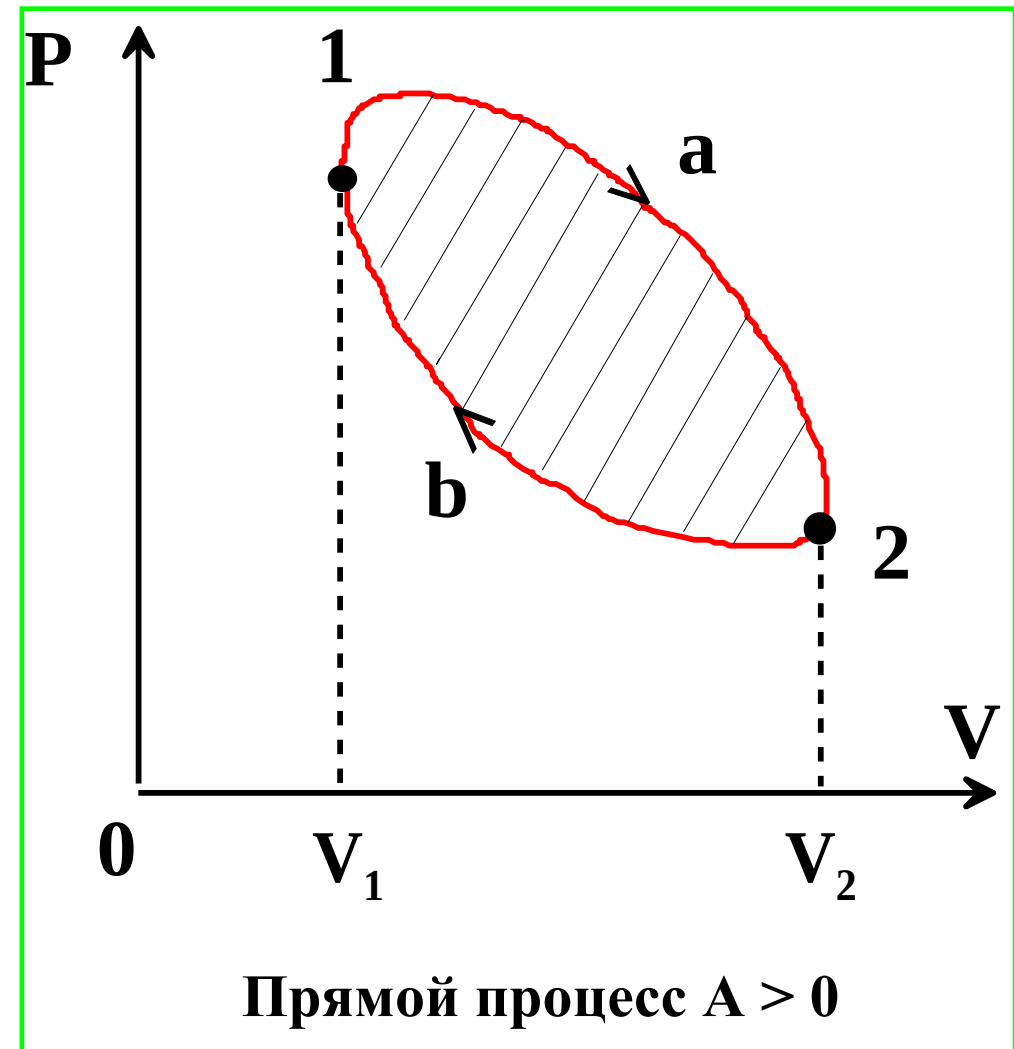
Круговым называется процесс, при котором термодинамическая система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное состояние.

На **P-V** диаграмме круговой процесс изображается **замкнутой кривой**. На верхнем участке **1-2 (a)** – газ расширяется (**dV > 0**) и совершает положительную работу

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV > 0$$

На нижнем участке **2-1 (b)** – газ сжимается (**dV < 0**) и совершает отрицательную работу

$$A_{21} = \int_{V_2}^{V_1} p dV < 0$$



Вся работа за круговой процесс равна площади, охватываемой замкнутой кривой

$$A = A_{12} + A_{21} > 0$$

Работа положительная, так как $A_{12} > |A_{21}|$

Прямые круговые процессы. Тепловая машина.

*Процесс, на котором совершается положительная работа называется **прямым**. На P-V диаграмме он протекает **по часовой стрелке**.*

Прямые процессы используются в тепловых машинах, совершающих работу за счет полученной **извне** теплоты.

При круговом процессе газ возвращается в исходное состояние, поэтому его *внутренняя энергия U не меняется.*

Из 1 - го начала термодинамики

$$Q = A + \Delta U = A$$

следует, что работа, совершаемая газом в круговом процессе, равна полученной им от внешних тел теплоте.

Найдем теплоту, полученную газом от внешних тел

на участке 1-2 (a) $Q_1 = A_{12} + (U_2 - U_1)$

на участке 2-1 (b) $Q_2 = A_{21} + (U_1 - U_2)$

Вся полученная газом теплота Q равна полной работе A газа на круговом процессе

$$A = A_{12} + A_{21} = Q_1 + Q_2 = Q$$

Теплота Q_2 , полученная газом от внешних тел на обратном участке $2-1$ (b), равна с обратным знаком теплоте Q'_2 , переданной газом внешним телам

$$Q_2 = - Q'_2$$

Поэтому можно записать $A = Q_1 - Q'_2 = Q$

Поскольку $A > 0$, то теплота Q_1 , полученная газом от внешних тел на участке $1-2$ (a), больше теплоты Q'_2 , отданной газом внешним телам на участке $2-1$ (b)

$$Q_1 = A + Q'_2 > Q'_2$$

Рассмотрим периодически действующий двигатель, многократно повторяющий круговой процесс. В ходе этих процессов он совершает работу за счет получаемой извне теплоты. Такой двигатель называется **тепловой машиной**.

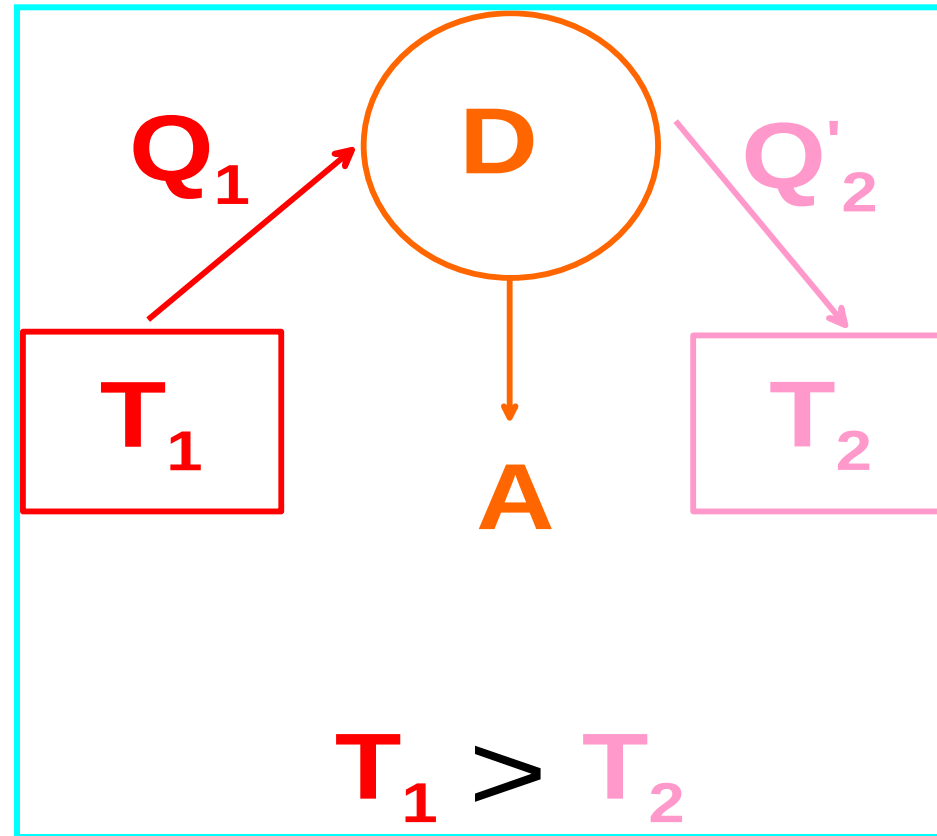
Тепловая машина тем эффективнее, чем большую долю полученной от внешних тел теплоты она превращает в работу.

Эта доля теплоты определяется **коэффициентом полезного действия η**

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2'}{Q_1} \quad (11.7.1)$$

Опыт показывает, что газ передает теплоту Q'_2 на обратном участке **2-1** любого теплового процесса, поэтому всегда

$$\eta < 1$$



Тепловой двигатель D совершает работу A , одновременно передавая теплоту Q'_2 от горячего тела с температурой T_1 к холодному телу с температурой T_2

Обратные круговые процессы. Холодильник.

Если во время процесса газ совершает отрицательную работу, то процесс называется обратным.

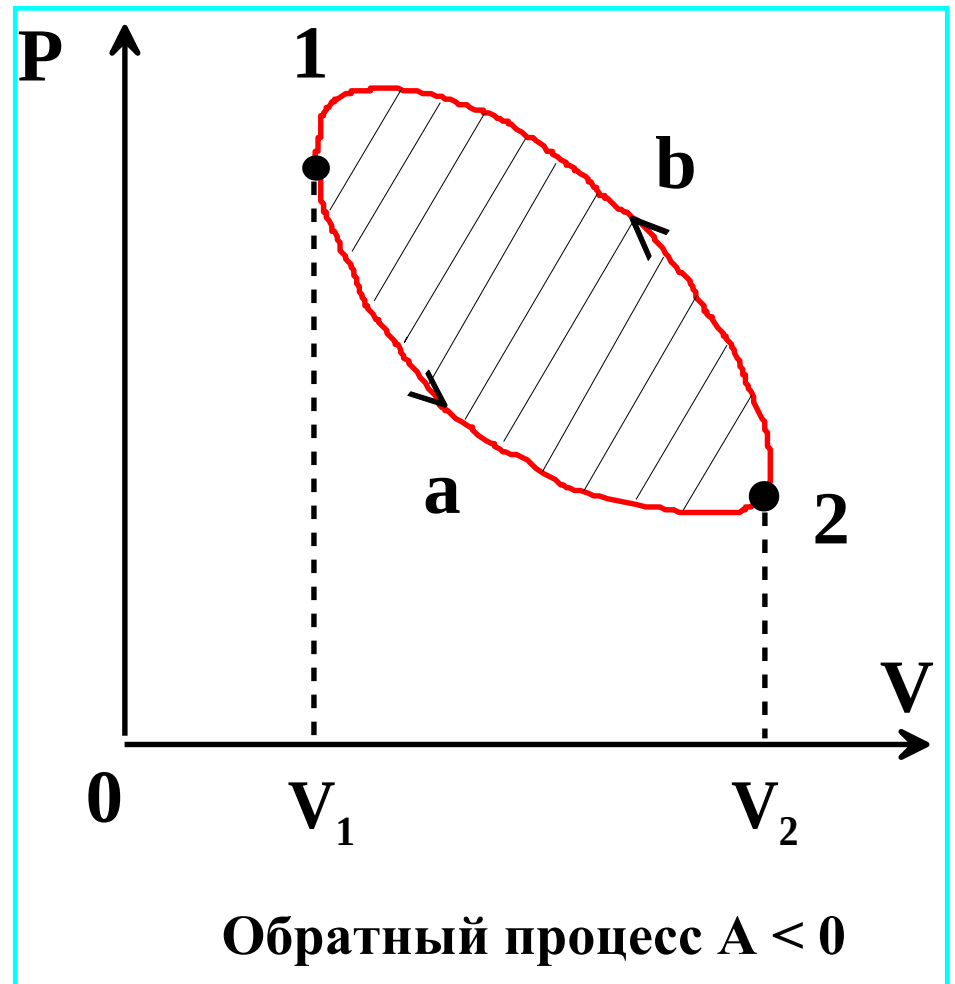
Обратный процесс на P - V диаграмме протекает *против часовой стрелки.*

Обратные процессы используются в холодильниках, в которых за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой.

При обратном процессе полная работа, совершенная газом отрицательная $A < 0$, а количество теплоты Q_1 , полученное газом от внешних тел на участке 1-2 (a) меньше теплоты Q'_2 , переданной газом внешним телам на обратном участке 2-1 (b)

$$Q_1 < Q'_2$$

Поэтому такая система выступает **холодильником**.



Эффективность холодильника определяется *холодильным коэффициентом*, равным отношению отнятой от внешнего тела теплоты Q_2 к работе A' внешних сил, затрачиваемой на приведение холодильника в действие

$$\text{холодильный коэффициент} = \frac{Q_2}{A'}$$

Работа внешних сил A' равна с обратным знаком работе газа A над внешними телами

$$A' = -A = -(Q_1 + Q_2) = Q'_1 - Q_2 = Q'_2 - Q_1$$

где $Q'_1 = -Q_1$ - количество теплоты, отданное газом внешним телам на участке 1-2 (а).

Поэтому холодильный коэффициент равен

$$\frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q'_2 - Q_1} = \frac{Q_2}{Q'_1 - Q_2} \quad (11.7.2)$$

11.8 Обратимые и необратимые процессы

*Термодинамический процесс называется **обратимым**, если при изменении направления процесса система проходит через те же самые состояния, что и при прямом процессе, но в обратной последовательности.*

При обратимом процессе после возвращения системы в исходное состояние ни в окружающей среде, ни в самой системе *не происходит никаких изменений*.

Процессы, не удовлетворяющие этим условиям являются *необратимыми*.

Все реальные процессы, протекающие в макросистемах, являются необратимыми.

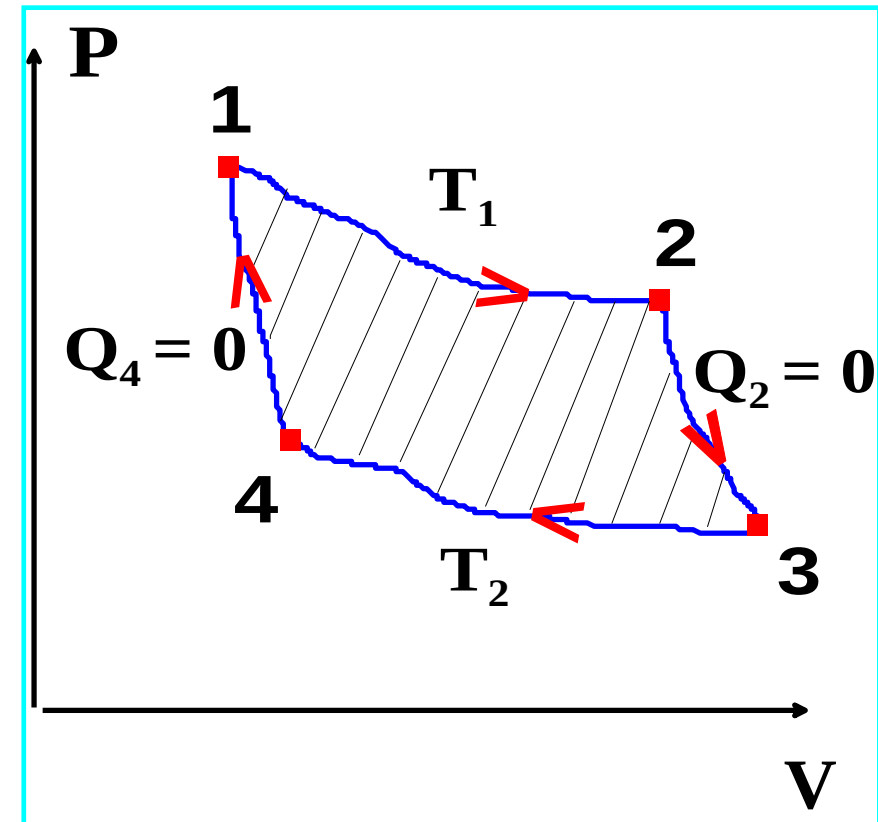
Любой равновесный процесс является обратимым,
так как в нем любое промежуточное состояние не зависит
от направления процесса.

11.9 Цикл Карно

Рассмотрим прямой обратимый процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. Такой цикл называется **циклом Карно**.

Найдем **КПД** цикла **Карно**. Для этого вычислим работу газа, совершенную в цикле.

- $1 \rightarrow 2$ *изотермическое расширение*
- $2 \rightarrow 3$ *адиабатическое расширение*
- $3 \rightarrow 4$ *изотермическое сжатие*
- $4 \rightarrow 1$ *адиабатическое сжатие*



Работа на отдельных участках цикла равна

$$A_{12} = Q_1 = \nu R T_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

$$A_{23} = U_{23} = -\nu c_V (T_2 - T_1)$$

$$A_{34} = Q_2 = -Q_2' = \nu R T_2 \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right)$$

$$A_{41} = U_{41} = -\nu c_V (T_1 - T_2)$$

Складывая, получаем полную работу газа в цикле Карно

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} =$$

$$= \nu R T_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) + \nu R T_2 \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right)$$

Тогда **КПД** цикла **Карно** равен

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2'}{Q_1} = \frac{\nu RT_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) + \nu RT_2 \ln \left(\frac{V_4}{V_3} \right)}{\nu RT_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)}$$

Учтем, что для адиабат имеют место равенства

$$2 \rightarrow 3 \quad T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

$$4 \rightarrow 1 \quad T_2 V_4^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1}$$

Исключая из них температуру, получаем

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

Подставляя последнее соотношение в формулу для **КПД**, окончательно находим

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (11.9.1)$$

Следовательно, **КПД** в цикле **Карно** зависит только от температур нагревателя T_1 и холодильника T_2 , но не зависит ни от устройства двигателя, ни от рода рабочего тела (газа).

*Чтобы повысить **КПД** надо увеличивать разность температур нагревателя и холодильника.*

Действительно, если $T_1 \gg T_2$, то $\eta \rightarrow 1$.

Сравнивая (11.9.1) с прежней формулой (11.7.1), получаем

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2'}{Q_1} \quad (11.9.2)$$

То есть отношение отданного в цикле **Карно** тепла от одного тела к полученному теплу другим телом, равно отношению температур этих тел.

Формула (11.9.2) положена в основу определения термодинамической шкалы температур.

Для необратимых процессов количество теплоты Q'_2 , отдаваемое рабочим телом (газом) внешним телам, увеличивается за счет трения, теплопроводности и т. д.

Поэтому для необратимых процессов имеет место неравенство

$$\frac{T_2}{T_1} < \frac{Q'_2}{Q_1} \rightarrow \eta_{\text{необр.}} = 1 - \frac{Q'_2}{Q_1} < \eta_{\text{обр.}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Следовательно, *КПД обратимого процесса максимален.*