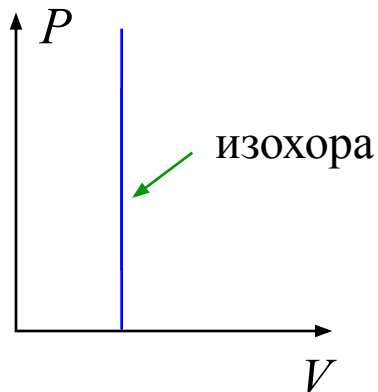


Процессы

Квазистатический или *квазиравновесный* процесс – бесконечно медленный процесс такой, что система всегда находится в состоянии равновесия.

Квазистатический процесс является *обратимым* – систему и внешние тела можно привести в исходное состояние через обратную последовательность состояний.

Изохорический процесс ($V = \text{const}$)

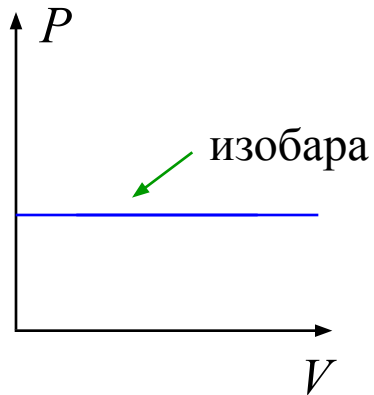


$$\frac{P}{T} = \text{const}$$

– закон Шарля

Процессы

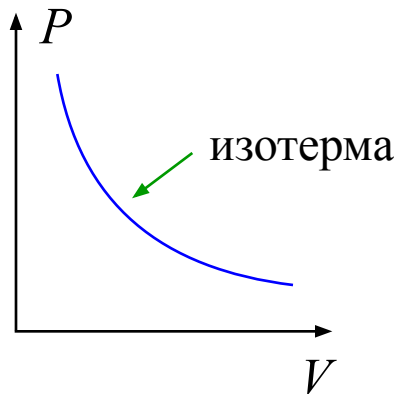
Изобарический процесс ($P = \text{const}$)



$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

– закон Гей-Люссака

Изотермический процесс ($T = \text{const}$)

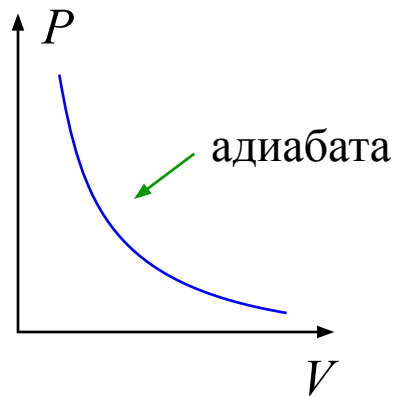


$$PV = \text{const}$$

– закон Бойля-Мариотта

Процессы

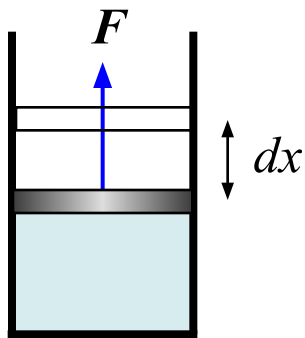
Адиабатический процесс (процесс без подвода и отвода тепла $\delta Q = 0$)



$$PV^\gamma = \text{const} \quad \text{— уравнение Пуассона (адиабаты)}$$

γ — показатель адиабаты

Работа газа



$$F = PS$$

$$\delta A = Fdx = PSdx \quad \longrightarrow$$

$$\delta A = PdV$$

Для конечного процесса

$$A = \int PdV$$

Первое начало термодинамики




Q – количество тепла, переданное газу

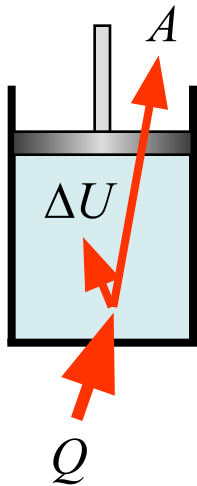
A' – работа, совершенная над газом

Первое начало термодинамики

По закону сохранения энергии

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

Если A – работа, совершенная газом то, с учетом $A' = -A$ 



$$Q = \Delta U + A$$

$$\delta Q = dU + \delta A$$

– первое начало термодинамики

Теплоемкость газа

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad - \text{теплоемкость}$$

$$\delta Q = dU + PdV \quad \longrightarrow \quad C = \frac{dU}{dT} + P \frac{dV}{dT}$$

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV \quad \left[U = U(V, T) \right]$$

$$C = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right] \frac{dV}{dT}$$

\longrightarrow теплоемкость есть функция процесса, из-за $\frac{dV}{dT}$

Теплоемкость газа

Изохорная теплоемкость $V = \text{const}$

$$\frac{dV}{dT} = 0$$



$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$$

Изобарная теплоемкость $P = \text{const}$

$$\frac{dV}{dT} = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$



$$C_P = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right] \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

$$C_P - C_V = \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + P \right] \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

Теплоемкость газа

Для идеального газа


$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = 0 \quad \text{— по закону Джоуля} \\ \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{R}{P} \quad \text{— для 1 моля} \end{array} \right. \quad \longrightarrow$$

$$C_P - C_V = R \quad \text{— уравнение Майера}$$

C_P, C_V — молярные теплоемкости

Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона

$$\delta Q = C_V dT + PdV = 0 \quad \left[dU = C_V dT \right]$$

$$dT = \frac{d(PV)}{R} = \frac{PdV + VdP}{R} \quad \left[PV = RT \right]$$


$$C_P P dV + C_V V dP = 0 \quad \longrightarrow \quad \left[\gamma = \frac{C_P}{C_V} \right]$$

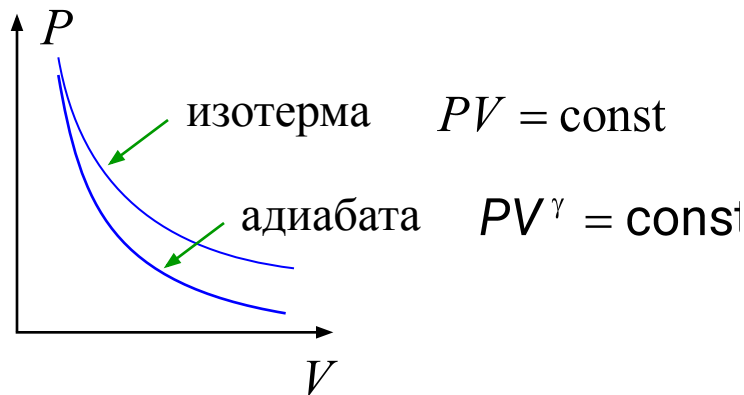
$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0 \quad \longrightarrow \quad \left[\text{если } C_V = \text{const} \right]$$

$PV^\gamma = \text{const}$

– уравнение Пуассона

γ – показатель адиабаты

Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона



$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} > 1$$

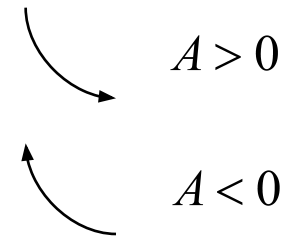
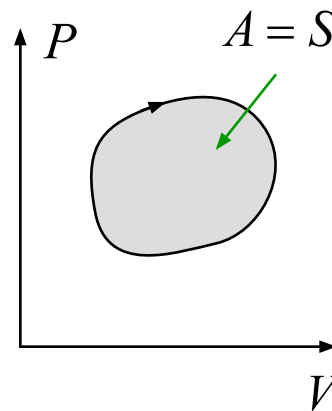
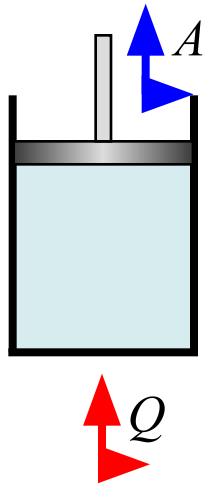
Из уравнения Менделеева-Клапейрона $PV = RT$ \Rightarrow

$$\left\{ \begin{array}{l} TV^{\gamma-1} = \text{const} \\ \frac{P^{\gamma-1}}{T^\gamma} = \text{const} \end{array} \right.$$

При адиабатическом сжатии газ нагревается,
при адиабатическом расширении – охлаждается

Второе начало термодинамики

Схема работы тепловой машины



$$\oint \delta Q = \oint dU + \oint \delta A$$

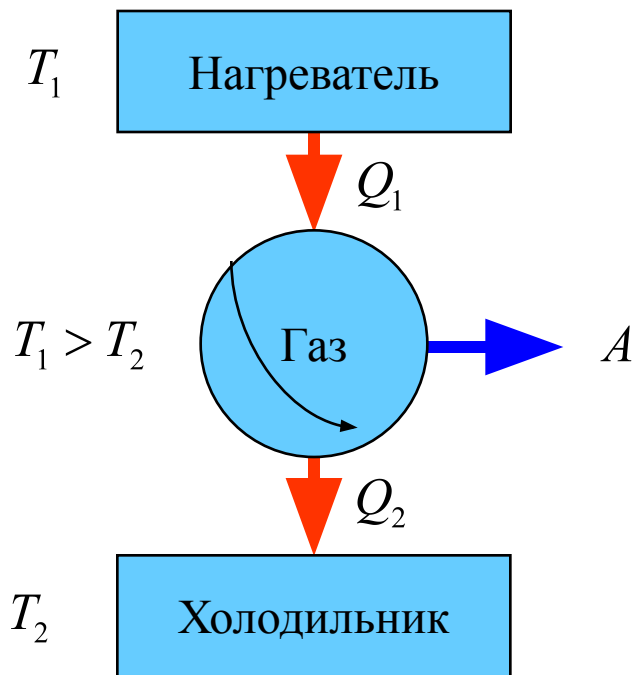
$$\oint dU = U_2 - U_1 = 0$$



$$Q = A$$

Второе начало термодинамики

Схема тепловой машины



$$A > 0, Q_1 > 0, Q_2 < 0$$

$$A = Q_1 + Q_2$$

$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

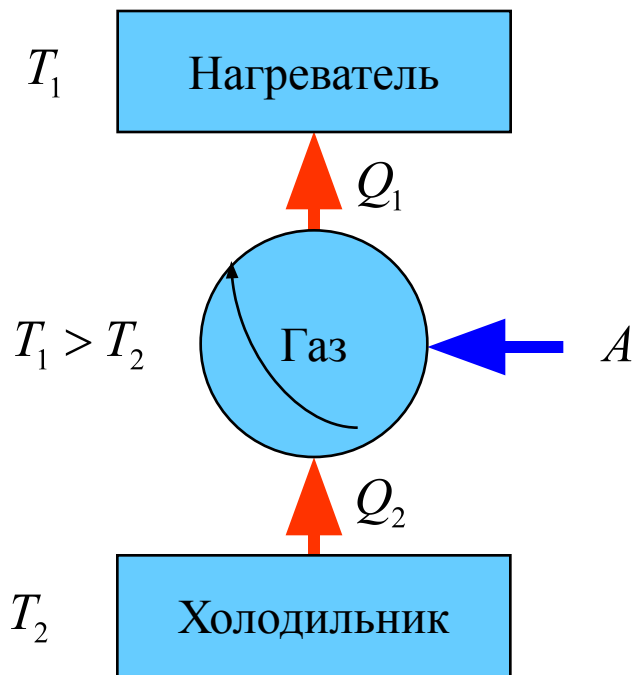
– КПД цикла

$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

– КПД тепловой машины

Второе начало термодинамики

Схема холодильной машины



$$A < 0, Q_1 < 0, Q_2 > 0$$

$$A = Q_1 + Q_2$$

$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

– КПД цикла

$$\eta' = -\frac{Q_2}{A}$$

– холодильный коэффициент

Второе начало термодинамики

Формулировки второго начала термодинамики

Невозможно создать вечный двигатель второго рода (В. Оствальд).

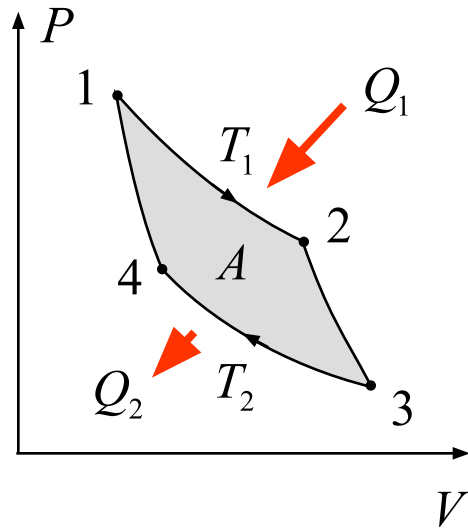
(т. е. невозможно создать двигатель, превращающий теплоту в работу в отсутствии холодильника)

КПД теплового двигателя $\eta < 1$

Теплота не может сама собой переходить от холодного тела к горячему (Р. Клаузиус).

Теплоту какого-либо тела невозможно превратить в работу, не производя никакого другого действия, кроме охлаждения этого тела (В. Томсон).

Цикл Карно и теорема Карно



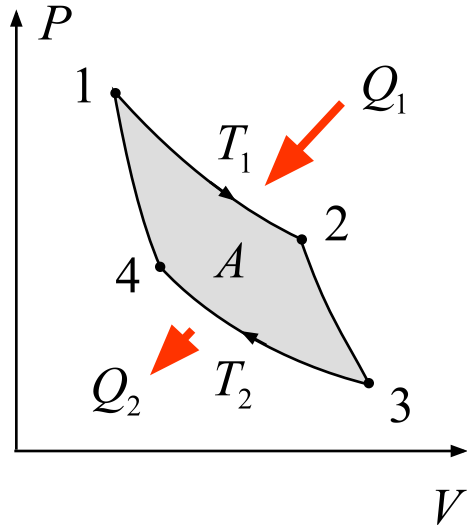
12, 34 – изотермы

23, 41 – адиабаты

Теорема Карно: КПД цикла Карно $\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = f(t_1, t_2)$

КПД цикла Карно, зависит только от температур t_1 и t_2 нагревателя и холодильника, но не зависит от устройства машины, а также от используемого рабочего вещества.

Цикл Карно и теорема Карно



Рабочее тело – идеальный газ

$$\delta Q = dU + PdV$$

При $T = \text{const}$, $dU = 0$ \Rightarrow

$$\delta Q = PdV = RT \frac{dV}{V} \quad \Rightarrow$$

$$Q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad Q_2 = RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3}$$

$$\eta = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{T_2 \overbrace{\ln(V_4/V_3)}^{=-1}}{T_1 \ln(V_2/V_1)} \quad \Rightarrow$$

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Энтропия

Для цикла Карно $\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \implies \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \implies$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad \left[\text{для цикла Карно} \right]$$

Для любого равновесного кругового процесса

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad \text{— равенство Клаузиуса}$$



существует функция состояния S — энтропия

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

Энтропия

Для равновесных процессов $\left[\delta Q = TdS \right]$

$$TdS = dU + pdV$$

– основное уравнение термодинамики

Для не равновесных процессов

При неравновесном процессе выделяется тепло внутреннего трения $\delta Q^* \geq 0$

$$dS = \frac{\delta Q + \delta Q^*}{T} \geq \frac{\delta Q}{T} \quad \Rightarrow$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

– неравенство Клаузиуса

$$TdS \geq dU + pdV$$

– основное неравенство термодинамики