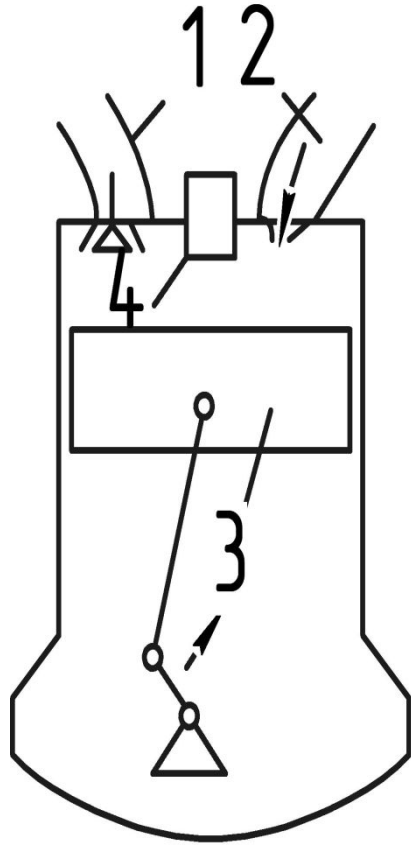
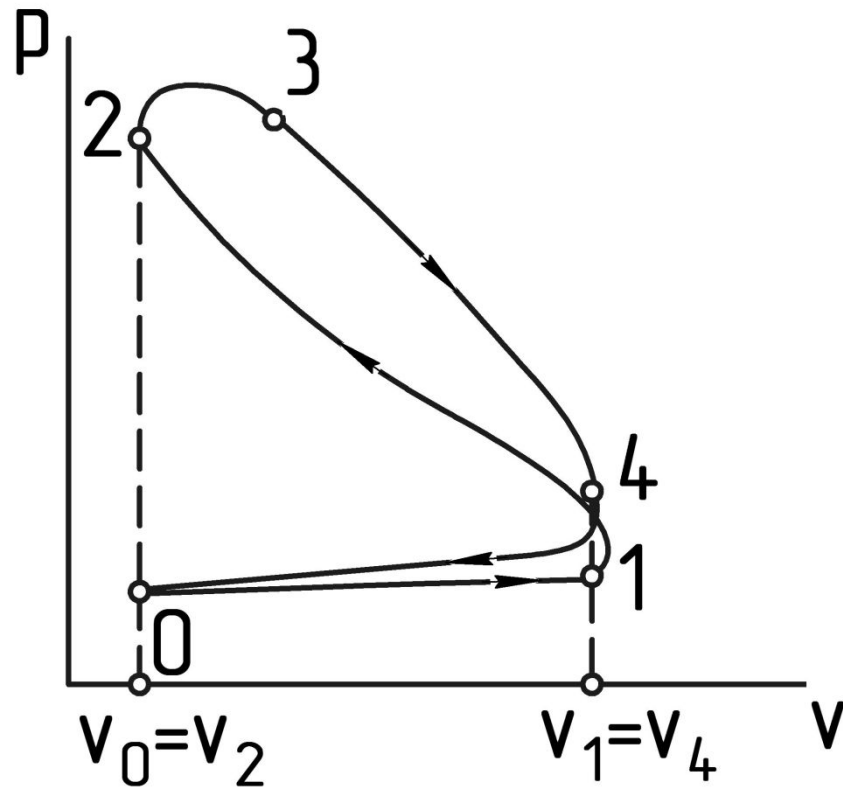


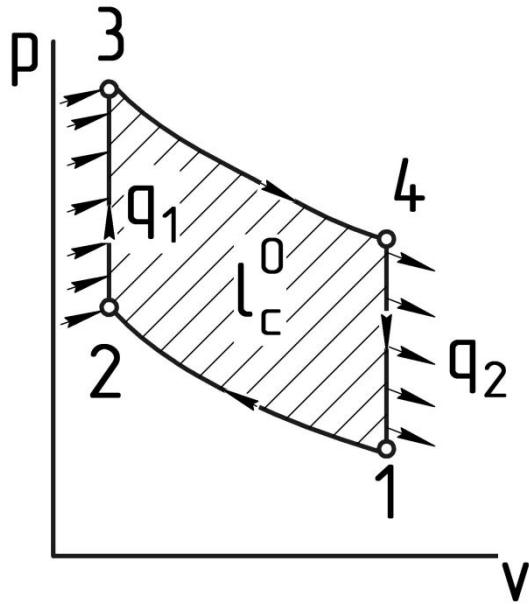
ЦИКЛЫ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ



Индикаторная диаграмма цикла ДВС



Циклы с изохорным подводом теплоты (цикл Отто)



Термический КПД цикла Отто

$$\eta_t^0 = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

Адиабатное сжатие 1-2

$$T_2 = T_1(v_1/v_2)^{k-1} = T_1\varepsilon^{k-1}$$

Здесь $\varepsilon = v_1/v_2$ - степень сжатия

изохорный подвод теплоты $T_3 = T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right) = T_2\lambda = T_1\varepsilon^{k-1}\lambda$

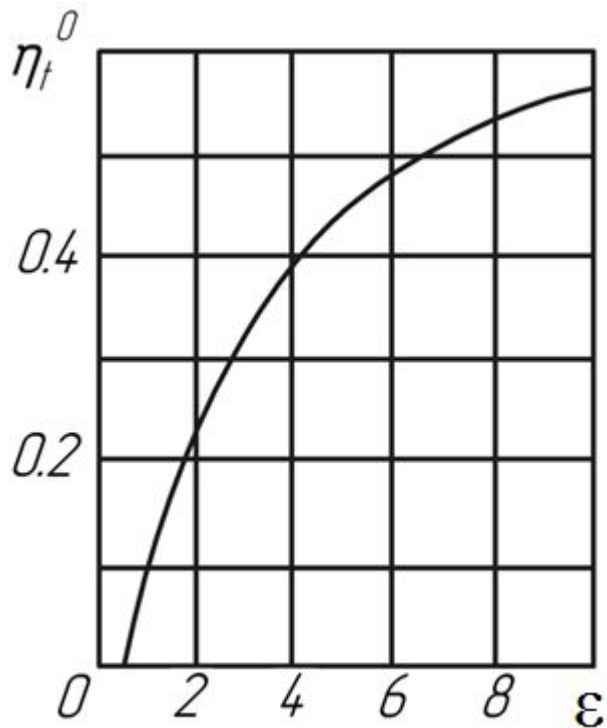
$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$ - степень повышения давления

Рабочий ход

$$T_4 = T_3 \left[1/\varepsilon^{k-1} \right] = T_1 \lambda$$

термический КПД цикла Отто

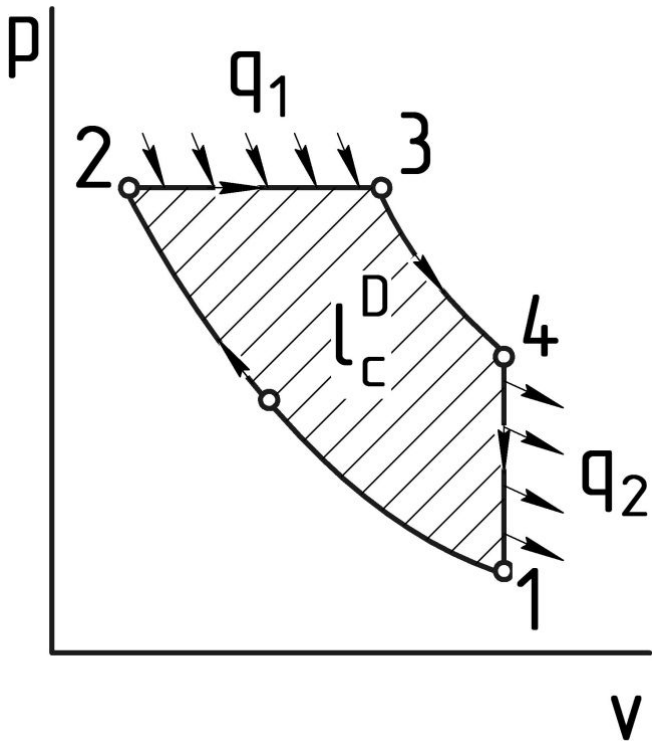
$$\eta_t^O = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$



Полезная работа цикла Отто

$$l_c^O = q_1 \eta_t^O = c_v T_1 \varepsilon^{k-1} (\lambda - 1) \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right),$$

Цикл с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля)



Термический КПД цикла Дизеля

$$\eta_t^D = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)}$$

температуры узловых точек цикла

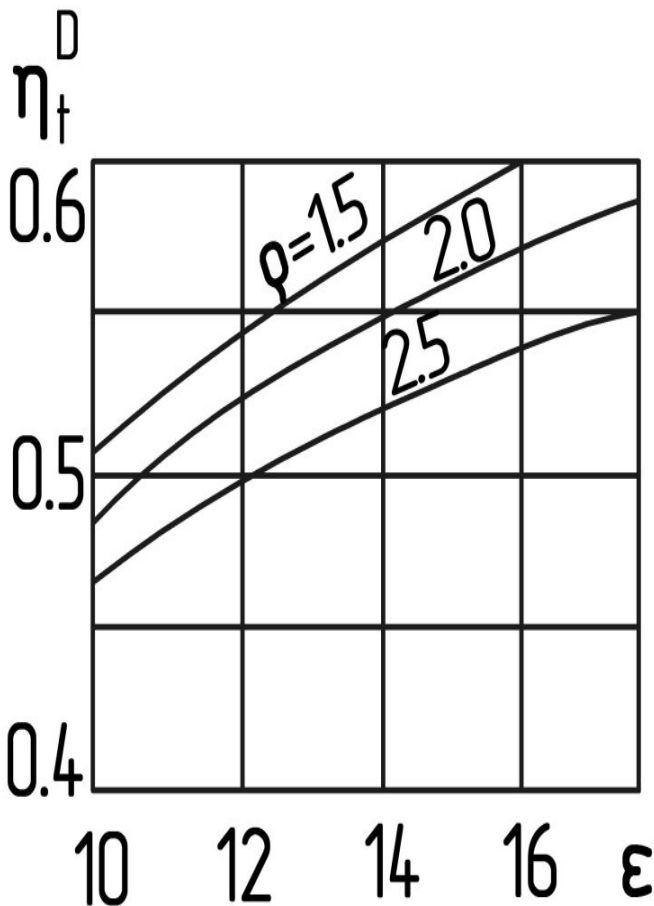
$$T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}$$

$$T_3 = T_2 \left(\frac{v_3}{v_2} \right) = T_2 \rho = T_1 \varepsilon^{k-1} \rho,$$

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} \quad \text{— степень предварительного расширения}$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = T_3 \delta^{k-1},$$

$$\delta = \frac{v_3}{v_4} \quad - \text{степень адиабатного расширения} \quad \delta = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

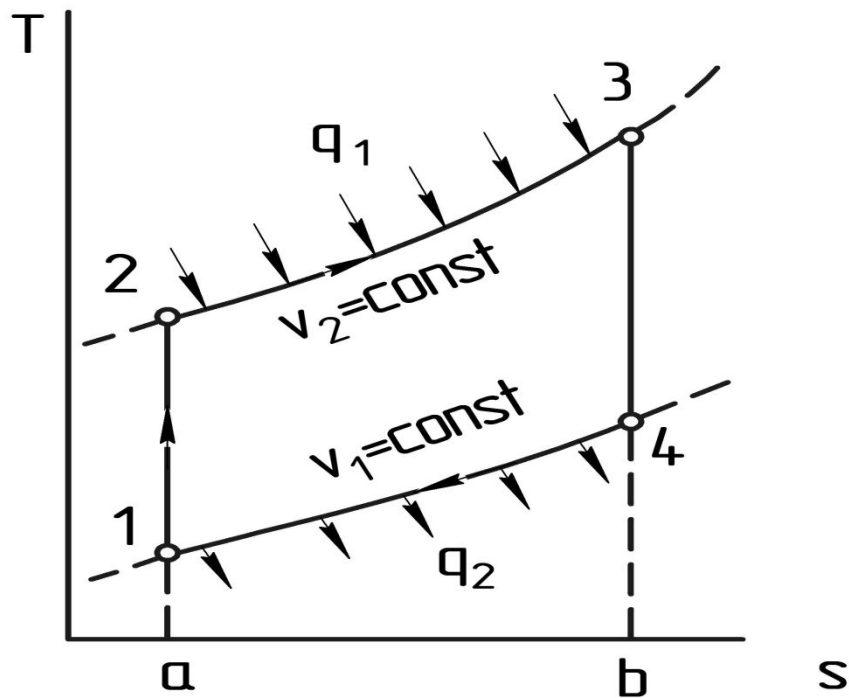


$$T_4 = \frac{T_1 \varepsilon^{k-1} \rho^{k-1}}{\varepsilon^{k-1}} = T_1 \rho^{k-1}.$$

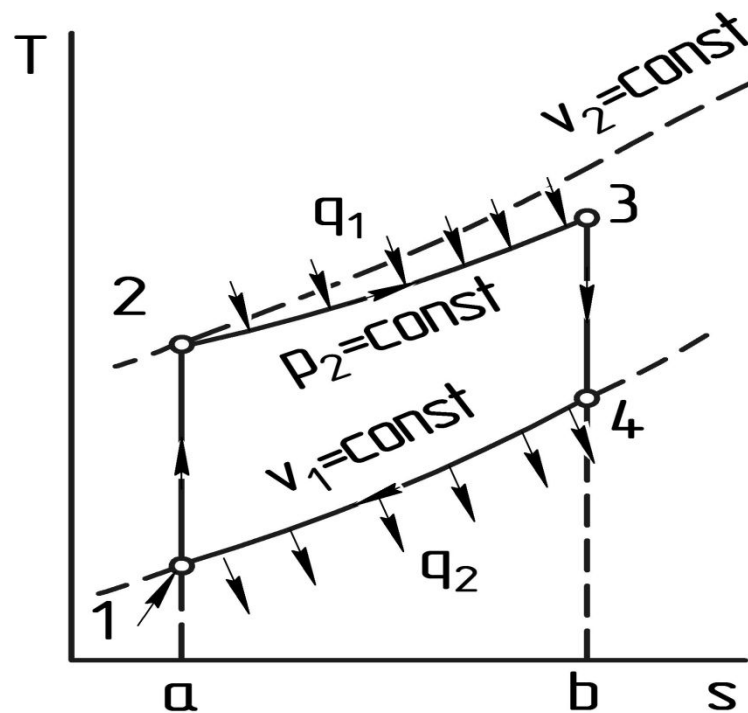
$$\eta_t^D = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \varepsilon^{k-1} (\rho - 1)}.$$

$$l_c^D = q_1 \eta_t^D = c_p T_1 \varepsilon^{k-1} (\rho - 1) \left(1 - \frac{1}{k \varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{\rho - 1} \right).$$

Сравнение эффективности циклов ДВС



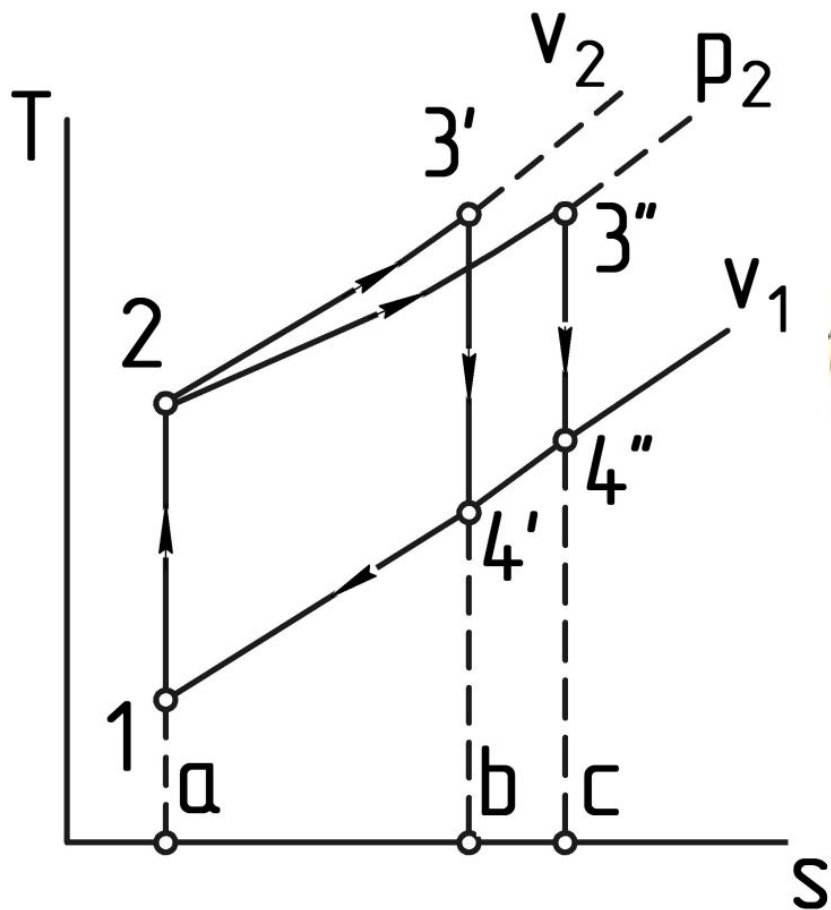
цикл Отто



цикл Дизеля

1. $T_1 = idem, q_1 = idem$

одна и та же степень сжатия $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$



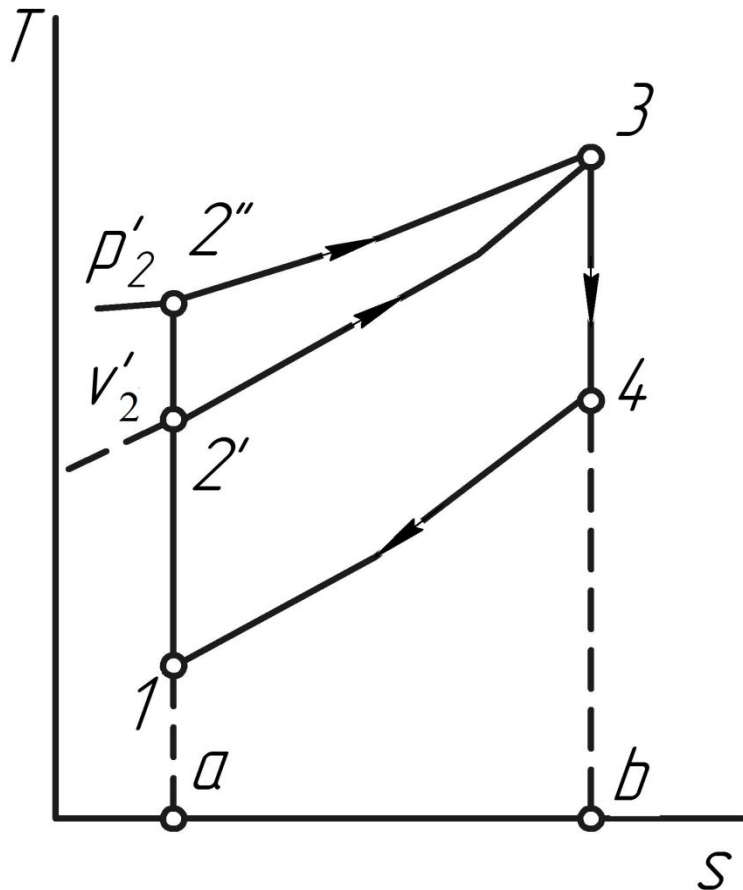
$$q_1^O = q_1^D$$

$$\eta_t^O = 1 - \frac{\text{пл. } a14'b}{\text{пл. } a23'b}; \eta_t^D = 1 - \frac{\text{пл. } a14''c}{\text{пл. } a23''c}$$

пл. $a23'b = \text{пл. } a23''c$,
 пл. $a14b < \text{пл. } a14''c$

$$\eta_t^O > \eta_t^D$$

2. $T_3 = idem, q_3 = idem$



$$\eta_t^O = 1 - \frac{пл. a14b}{пл. a2'3b}; \eta_t^D = 1 - \frac{пл. a14b}{пл. a2''3b}$$

пл. a14b в обоих случаях одинакова

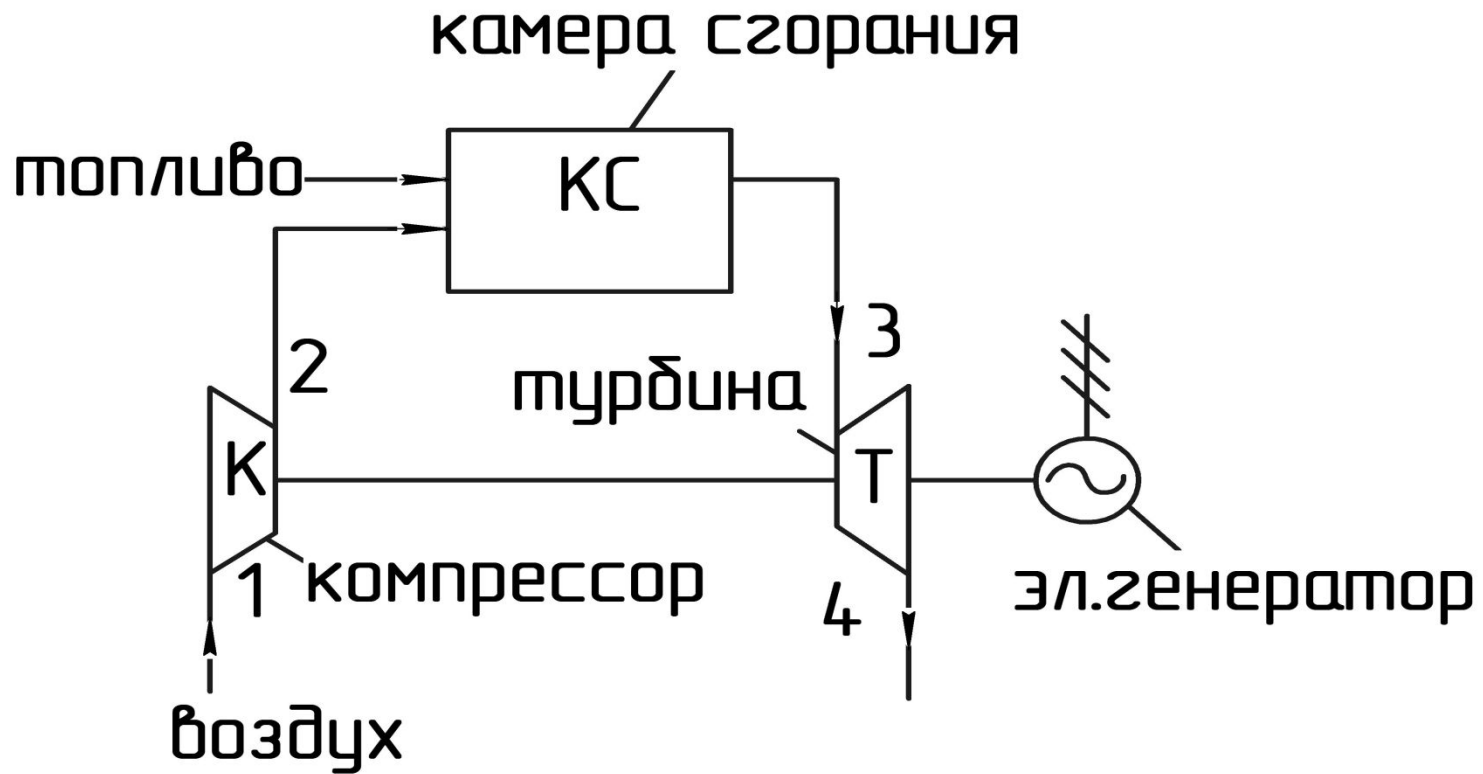
пл. a2'3b (цикл Отто) меньше

пл. a2''3b (цикл Дизеля)

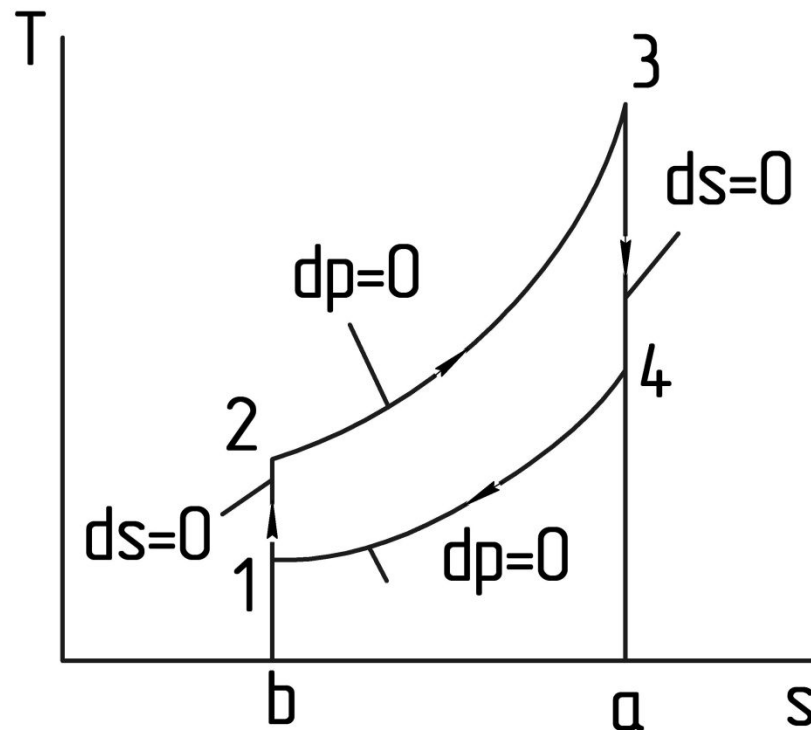
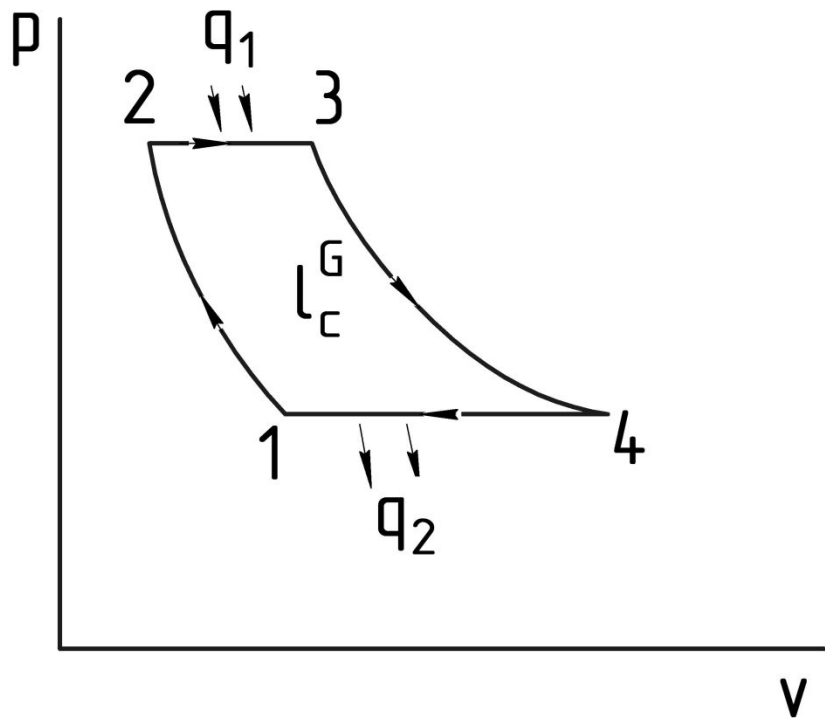
$$\eta_t^O < \eta_t^D$$

ЦИКЛЫ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Схема и цикл с изобарным подводом теплоты



цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты (цикл Брайтона)



Термический КПД цикла Брайтона

$$\eta_t^G = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

Используя уравнения адиабат (1-2 и 3-4) и изобар (2-3 и 4-1), получим

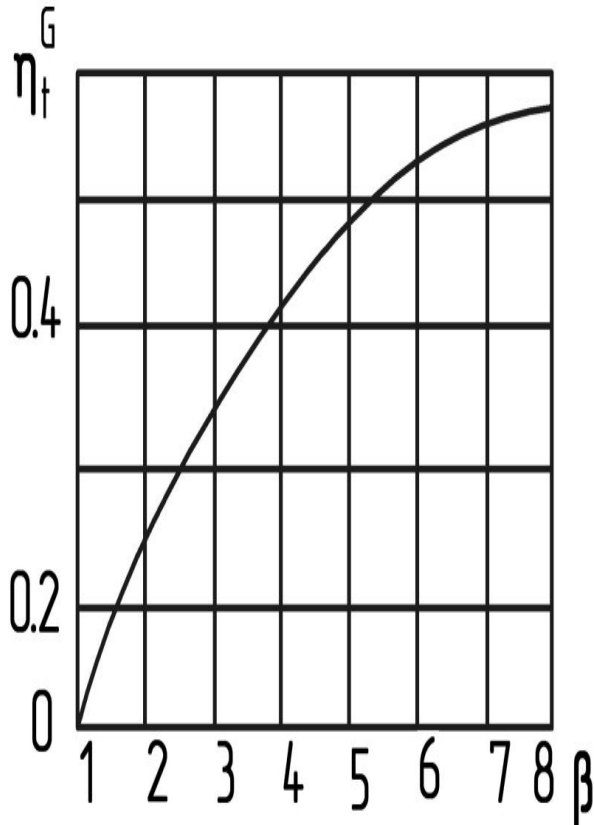
$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}},$$

$$\beta = \frac{p_2}{p_1}$$

степень повышения давления при адиабатном сжатии

$$T_3 = T_2 \frac{v_3}{v_2} = T_2 \rho = T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}} \rho; \quad T_4 = T_3 \beta^{\frac{1-k}{k}} = T_1 \rho,$$

Термический КПД цикла Брайтона



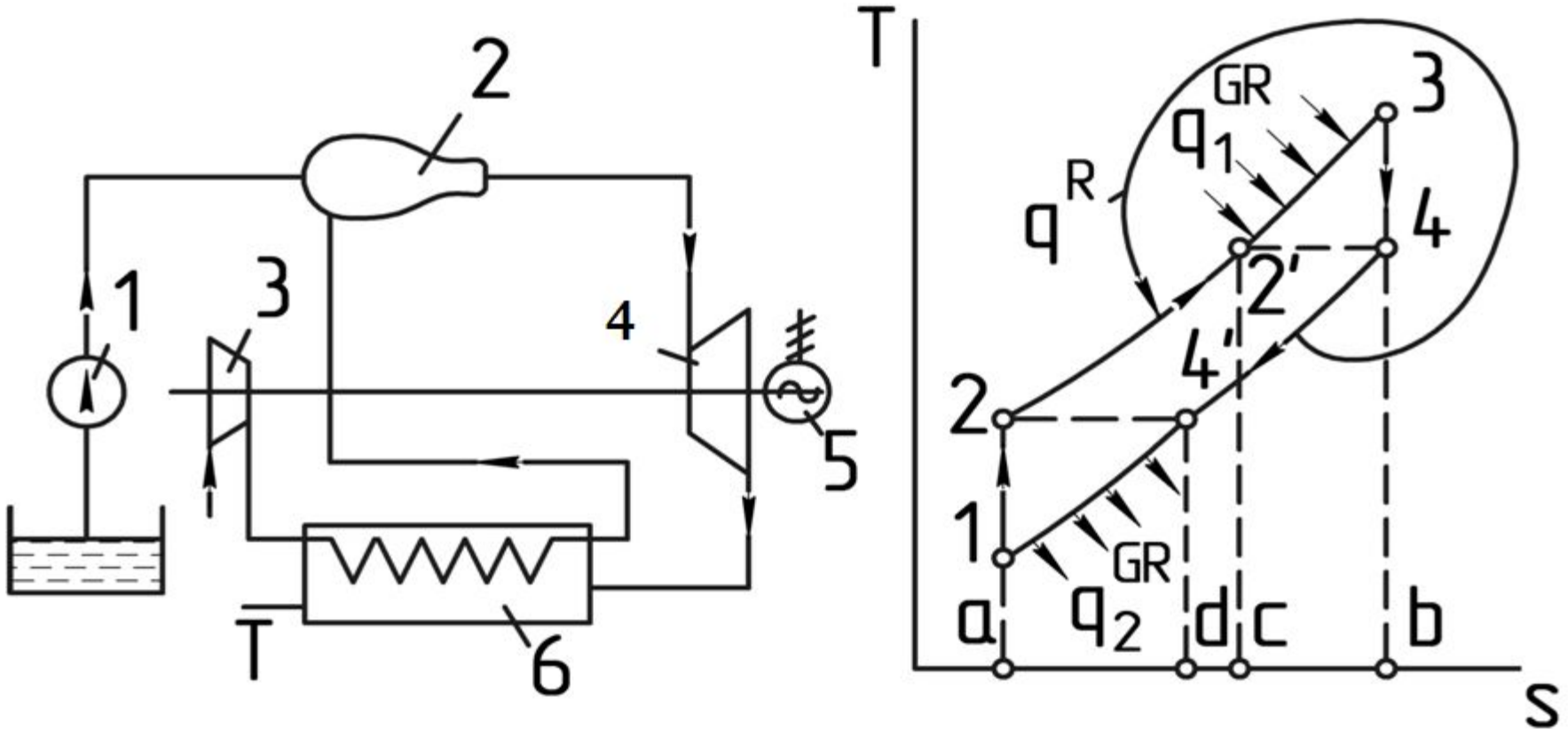
$$\eta_t^G = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},$$

степень сжатия газа

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \beta^{\frac{1}{k}}$$

$$l_t^G = q_1 \eta_t^G = c_p T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}} (\rho - 1) \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right).$$

Регенеративный цикл ГТУ



Термический КПД регенеративного цикла ГТУ

$$\eta_t^{GR} = 1 - \frac{q_2^{GR}}{q_1^{GR}} = 1 - \frac{c_p(T'_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T'_2)} = 1 - \frac{T'_4 - T_1}{T_3 - T'_2}.$$

В случае полной регенерации теплоты $T'_2 = T_4$; $T'_4 = T_2$

$$\eta_t^{GR} = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = \frac{T_1}{T_4} \cdot \frac{\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - 1}{\left(\frac{T_3}{T_4}\right) - 1}$$

Но в адиабатных процессах 1-2 и 3-4

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \beta^{\frac{k-1}{k}},$$

Термический КПД регенеративного цикла ГТУ

в изобарных процессах 2-3 и 4-1 $p_3 = p_2, p_4 = p_1$, поэтому $\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$

$$\eta_t^{GR} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\frac{T_4}{T_1}} = 1 - \frac{1}{\frac{T_4}{T_2} \cdot \frac{T_2}{T_1}} = 1 - \frac{1}{\gamma_{max} \beta^{\frac{k-1}{k}}}$$

степень подогрева воздуха за счет регенерации $\gamma_{max} = \frac{T_4}{T_1} > 1$

$$\eta_t^{GR} > \eta_t^G$$

Эффективность реальных циклов

внутренний КПД $\eta_i = \frac{l^r}{q_1}$

$$\eta_i = \frac{l^r l}{l q_1} = \frac{l^r}{l} \eta_t = \eta_{oi} \eta_t$$

$\eta_{oi} = \frac{l^r}{l}$ -внутренний относительный КПД

согласно первому началу $l = \oint p dv = - \oint v dp = l_{T,}$

Эффективность реальных циклов

в цикле ГТУ действительная техническая работа

$$l_T^r = l_{T3-4}^r - l_{T1-2}^r$$

Поскольку $l_{T3-4}^r > 0$ $l_{T1-2}^r < 0$

$$l_T^r = l_{T3-4}^r - |l_{T1-2}^r|$$

Величины l_{T3-4}^r l_{T1-2}^r свяжем с технической работой

обратимых процессов расширения и сжатия l_{T3-4} l_{T1-2}

$$l_{T3-4}^r = \eta_{oi3-4} \cdot l_{T3-4} = \eta_{oi3-4} (h_3 - h_4);$$

Эффективность реальных циклов

$$l_{T1-2}^r = \frac{l_{T1-2}}{\eta_{oi1-2}} = \frac{h_2 - h_1}{\eta_{oi1-2}}$$

$\eta_{oi3-4}, \eta_{oi1-2}$ — относительные внутренние КПД турбины и компрессора

$$\eta_{oi3-4} < 1 \quad \eta_{oi1-2} < 1$$

$$l_{T3-4}^r < l_{T3-4}, \quad l_{T1-2}^r > l_{T1-2}$$

η_{oi}^G — для всего цикла ГТУ

$$\eta_{oi}^G = \frac{\eta_{oi3-4}(h_3 - h_4) - \frac{h_2 - h_1}{\eta_{oi1-2}}}{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)} = \frac{\eta_{oi3-4}(T_3 - T_4) - \frac{T_2 - T_1}{\eta_{oi1-2}}}{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}$$

Эффективность реальных циклов

$$\eta_{oi3-4} = \eta_{oi1-2} \approx 0,9 \quad \beta=8 \quad \eta_t^G = 0,448 \quad \eta_{oi}^G = 0,665$$

$$\eta_i^G = 0,448 \cdot 0,665 = 0,298$$

эффективный КПД

$$\eta_e^G = \eta_{oi}^G \eta_t^G \prod_{j=1}^n \eta_j = \eta_i^G \prod_{j=1}^n \eta_j \quad \eta_e^G = 0,27$$

для ДВС, работающего по циклу Отто

$$\eta_{oi}^O = \frac{\eta_{oi3-4}(e_3 - e_4) - \frac{e_2 - e_1}{\eta_{oi1-2}}}{(e_3 - e_4) - (e_2 - e_1)} = \frac{\eta_{oi3-4}(T_3 - T_4) - \frac{T_2 - T_1}{\eta_{oi1-2}}}{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}$$

$\eta_{oi3-4}, \eta_{oi1-2}$ - относительные внутренние КПД процессов расширения и сжатия рабочего тела в цилиндре, соответственно

Для ДВС со степенью сжатия $\varepsilon = 8$ при $\eta_{oi3-4} \approx \eta_{oi1-2} \approx 0,85$

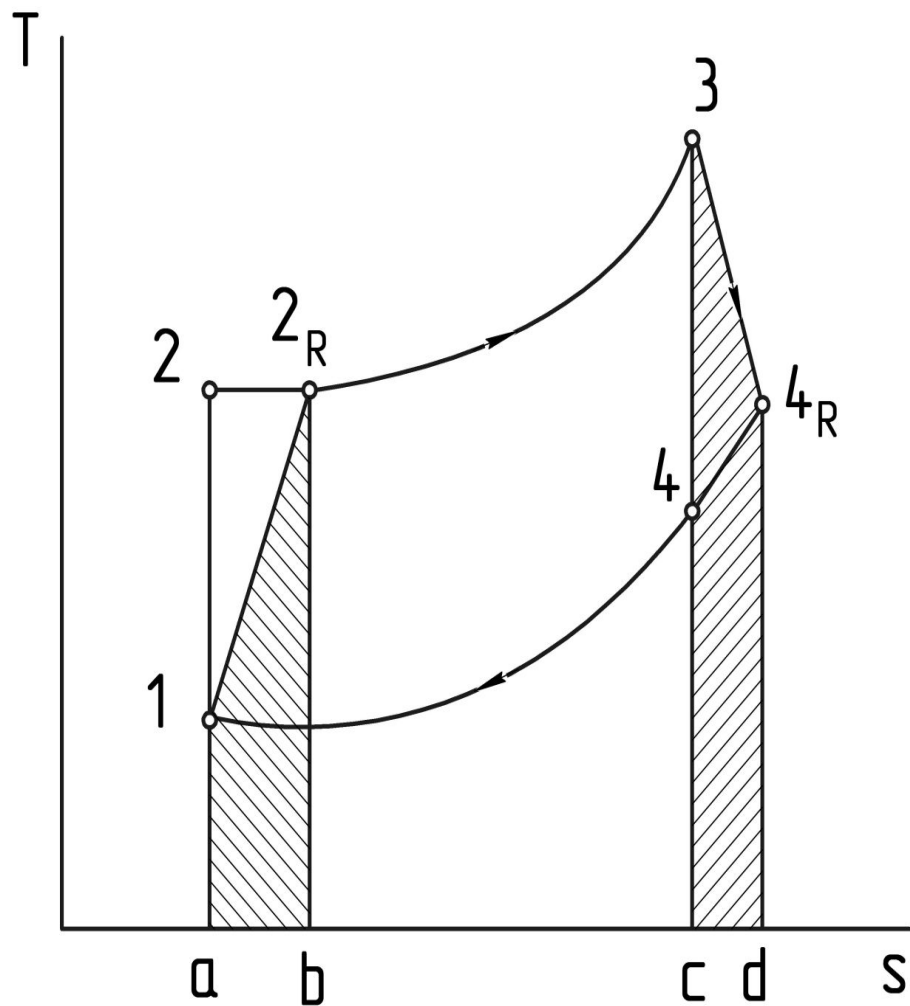
получаем $\eta_{oi}^0 = 0,62$ $\eta_t^0 = 0,565$

откуда $\eta_e^0 = 0,28 \dots 0,31$

Эффективный КПД цикла Дизеля при $\varepsilon = 14$ получаем

$$\eta_e^D \approx 0,30 \dots 0,34$$

Необратимость меняет ход процессов расширения и сжатия на диаграммах состояний



циклы ГТУ

-обратимый 12341

-необратимый (реальный)

12_R34_R1

Эффективность реальных циклов

Зависимости носят универсальный характер и могут быть, в частности, использованы для оценки эффективности циклов паросиловых установок

В формулах для относительного внутреннего КПД должны стоять **ТОЛЬКО** значения энтальпии и внутренней энергии

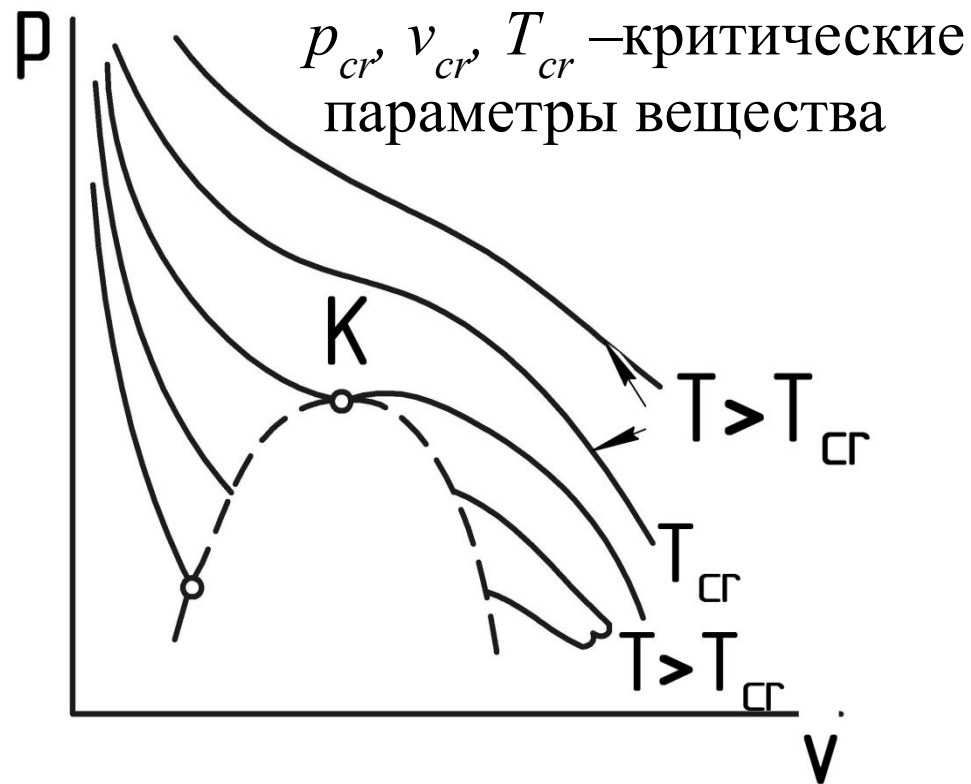
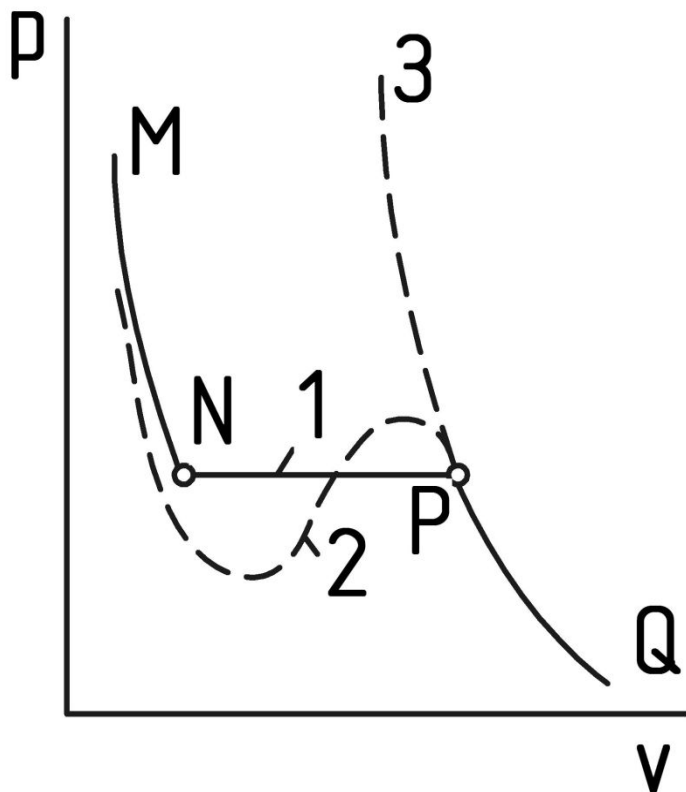
$$\Delta h = c_p \Delta T, \quad \Delta e = c_v \Delta T$$

ТЕРМОДИНАМИКА РЕАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛ

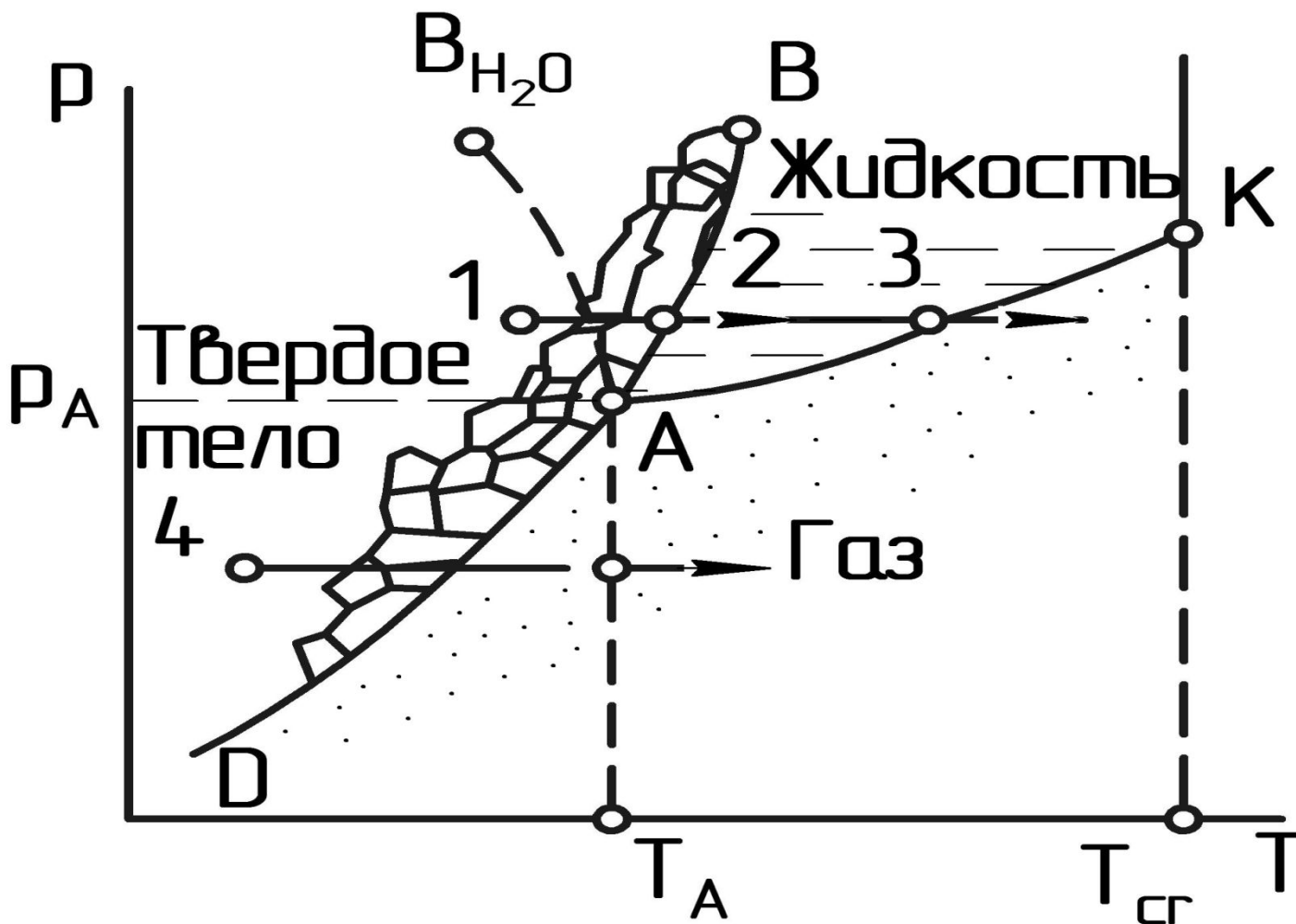
Уравнение состояния реальных газов

Уравнение Ван-дер-Ваальса $\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$

Точка **К** - критическая точка



Изменение агрегатного состояния вещества



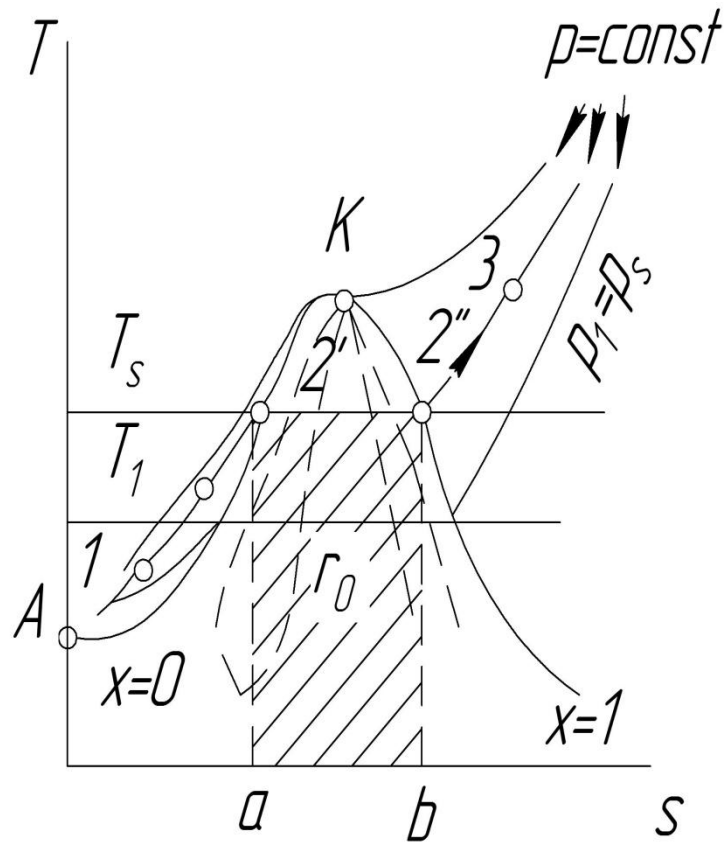
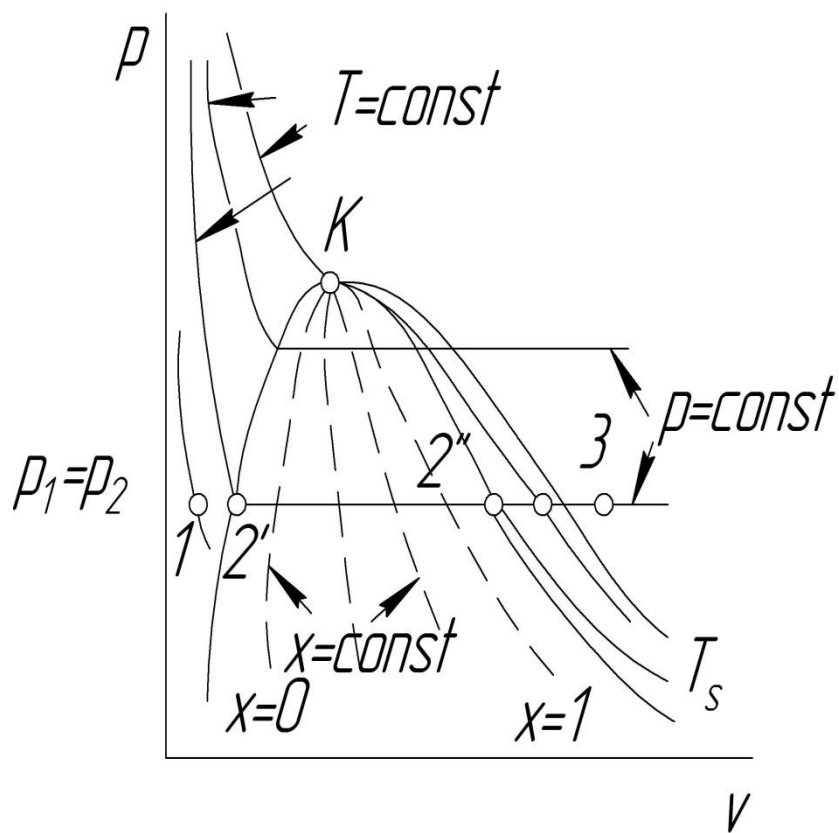
Для воды

$p_A = 0,00061$ МПа;

$v_A = 0,001$ м³/кг;

$t_A = 0,01$ °С

Диаграммы и таблицы состояний



$$x = \frac{m''}{m'' + m'}$$

Диаграммы и таблицы состояний

$$q = \Delta h + l_T \quad \rightarrow \quad q = \Delta h$$

$$q_{1-2'} = h'_{2'} - h_1; \quad q_{2'-2''} = r = h''_{2''} - h'_{2'}; \quad q_{2''-3} = h_3 - h''_{2''}.$$

удельный объем в точке со степенью сухости пара x

$$v_x = v' + x(v'' - v').$$

Аналогично:

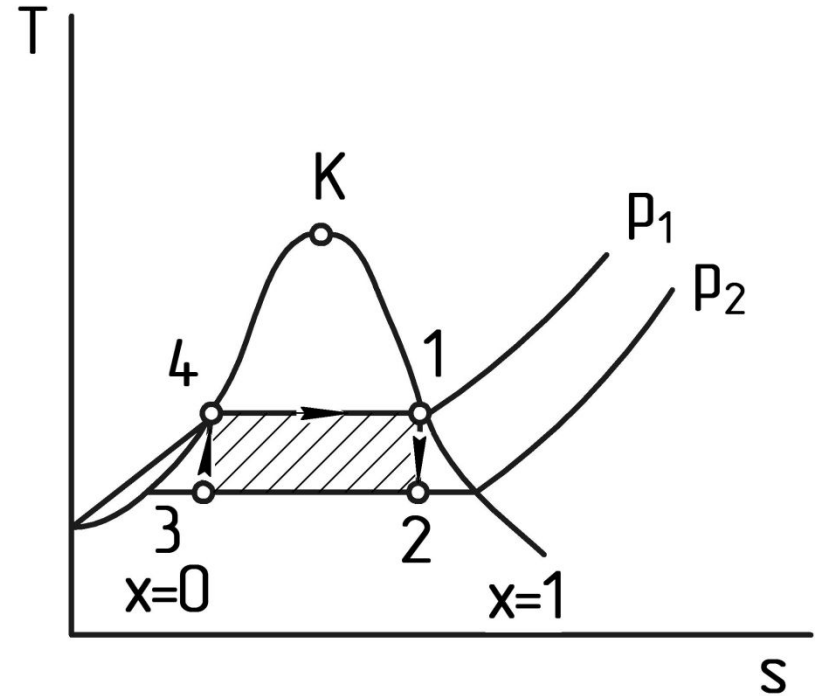
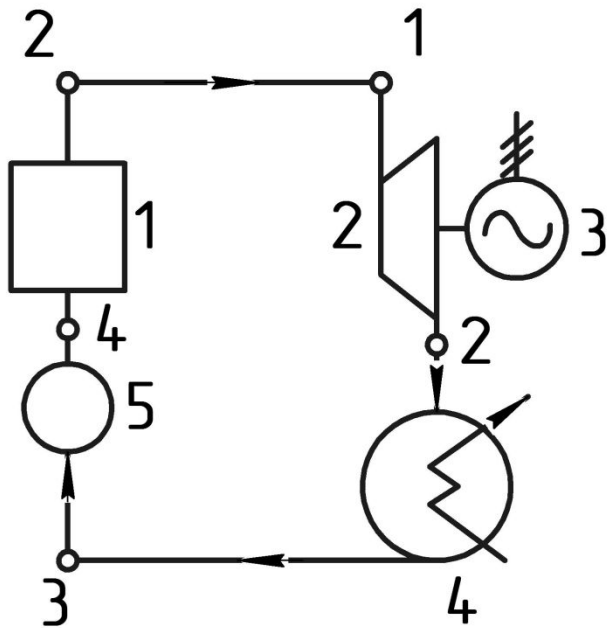
$$h_x = h' + x(h'' - h') = h' + rx;$$

$$e_x = e' + x(e'' - e');$$

$$s_x = s' + x(s'' - s').$$

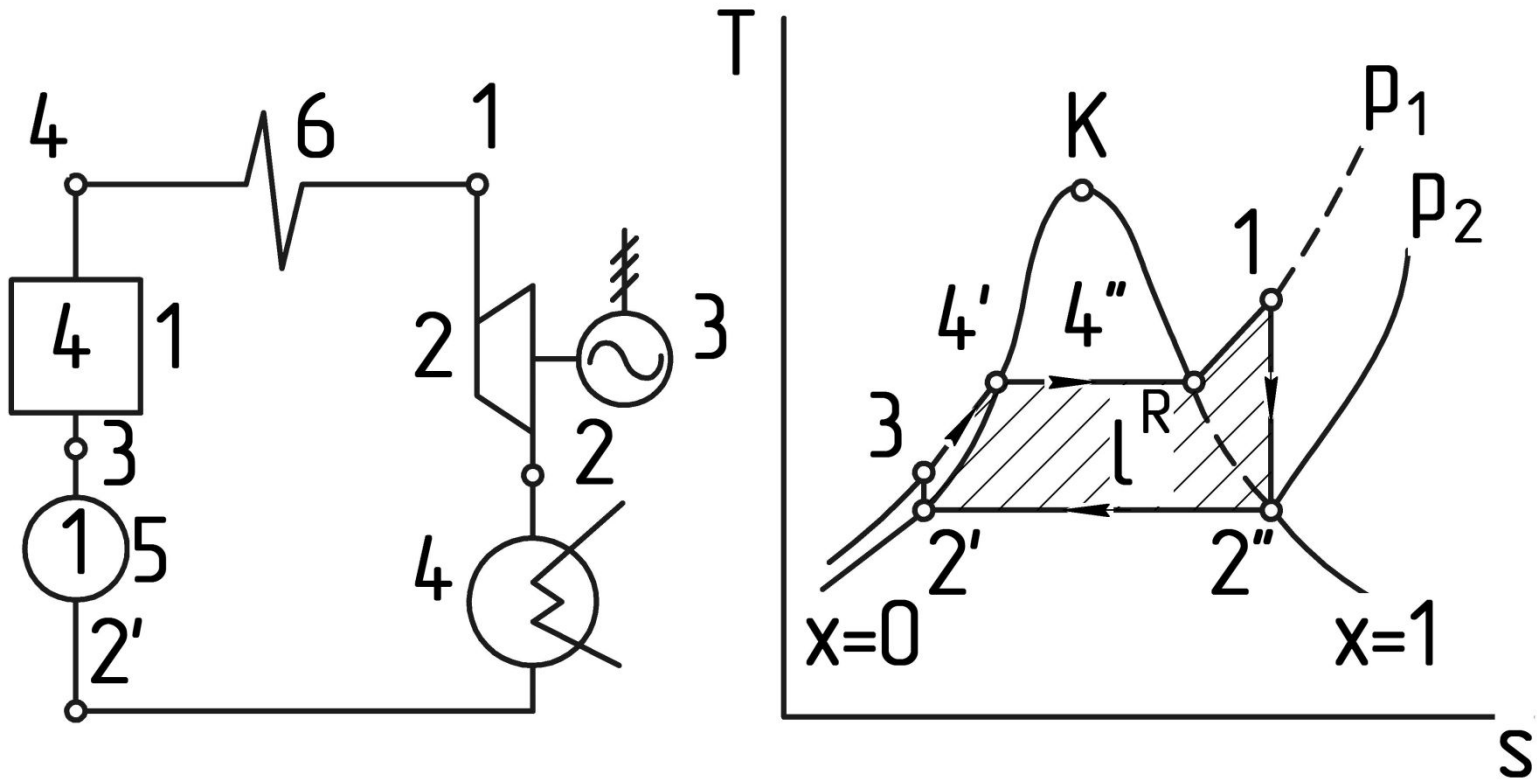
ЦИКЛЫ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Паровой цикл Карно



$$\eta_t^c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Цикл Ренкина (Rankine W.J.M.)

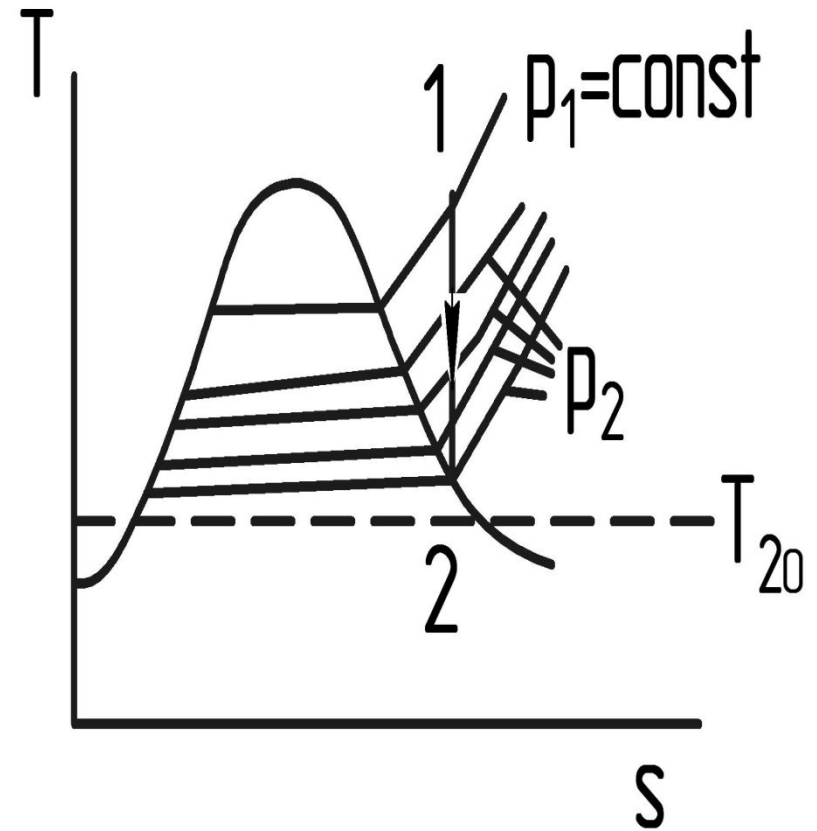
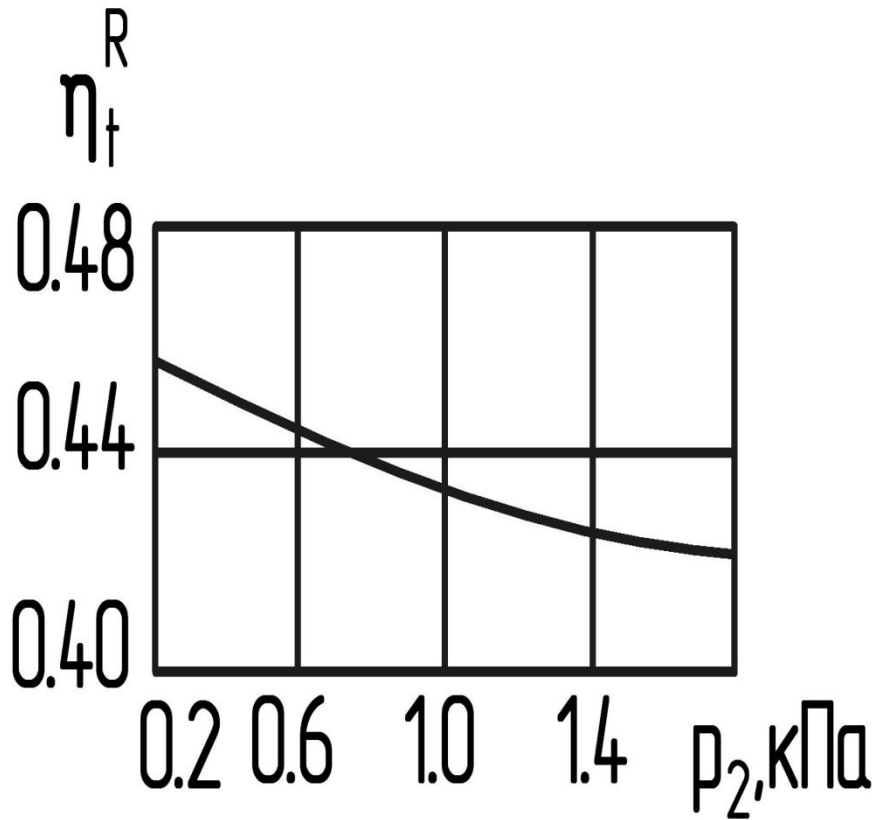


работа цикла

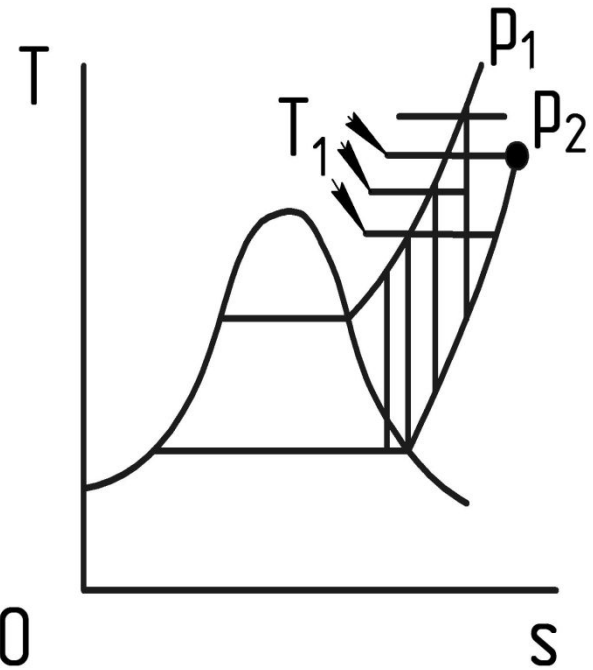
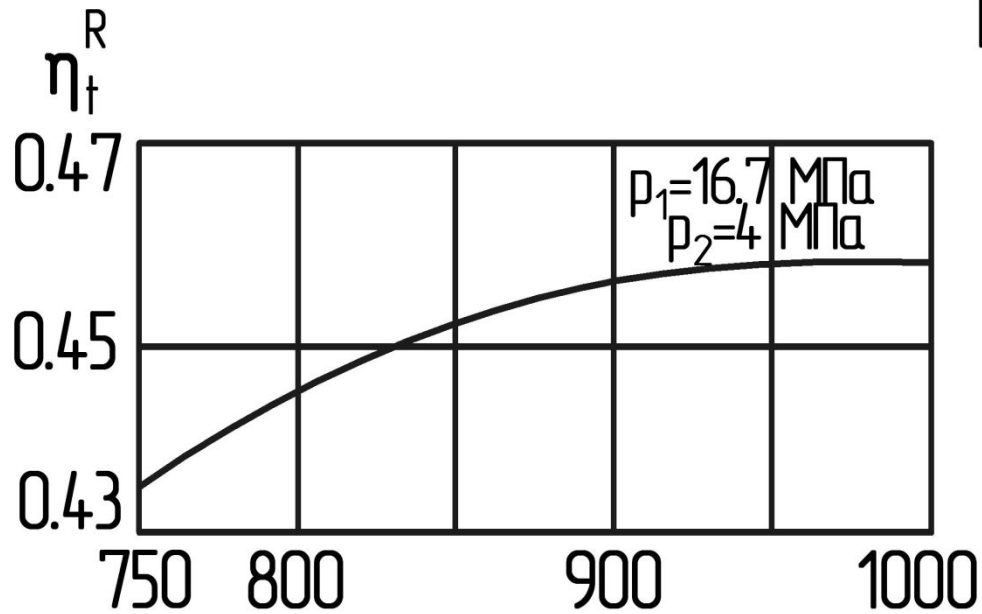
$$l^R = l_T^R = h_1 - h_2$$

$$\eta_t^R = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{h_2'' - h_2'}{h_1 - h_2}$$

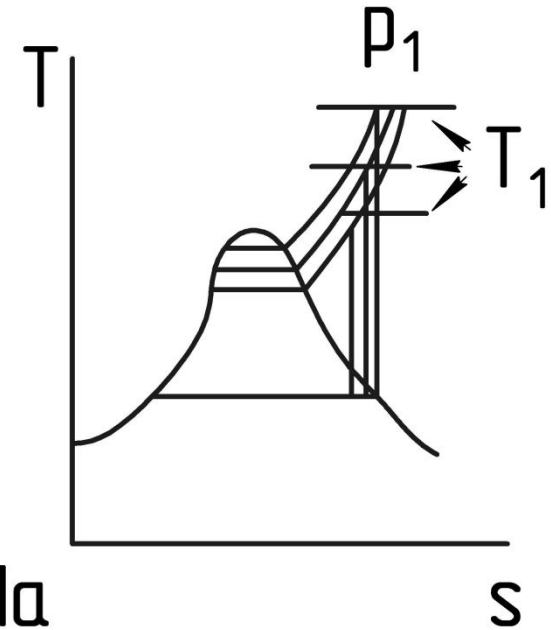
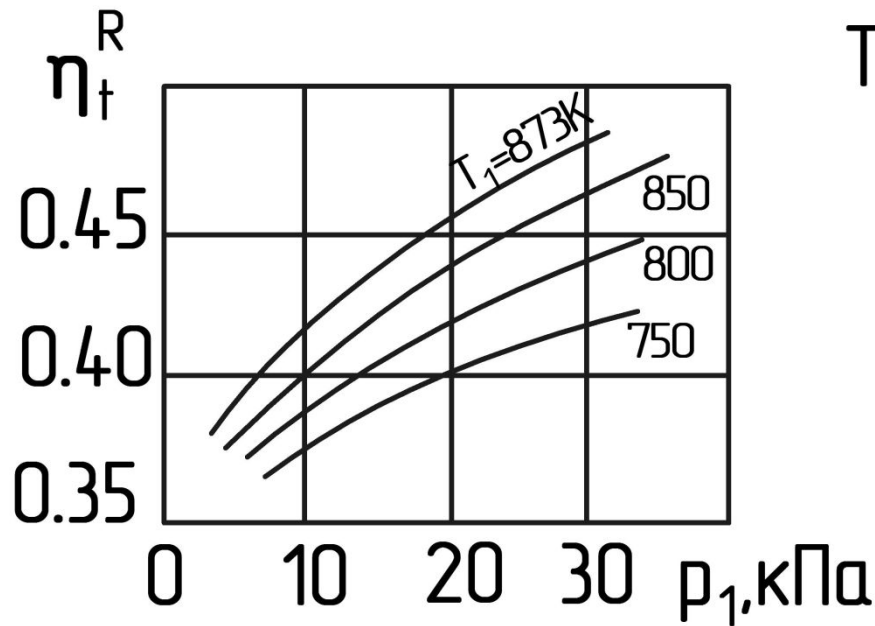
Цикл Ренкина (Rankine W.J.M.)



Цикл Ренкина (Rankine W.J.M.)



Цикл Ренкина (Rankine W.J.M.)

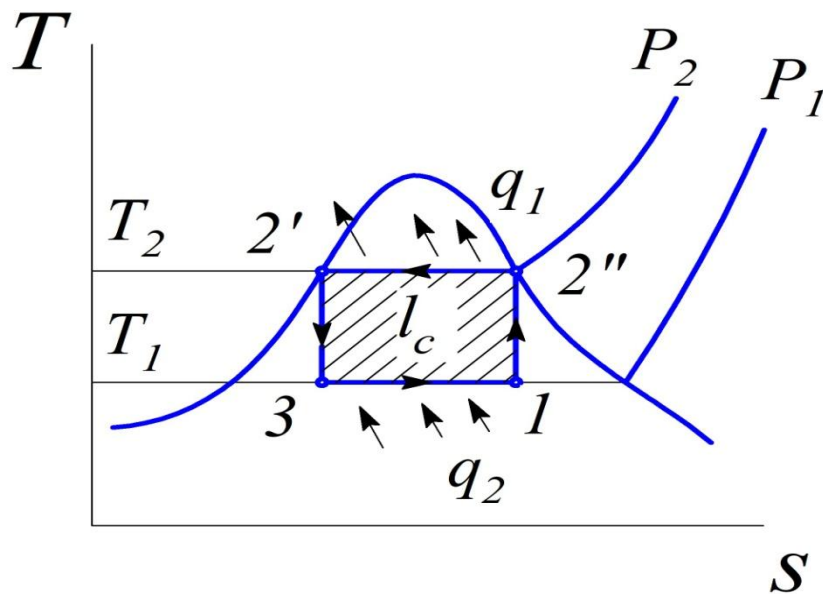
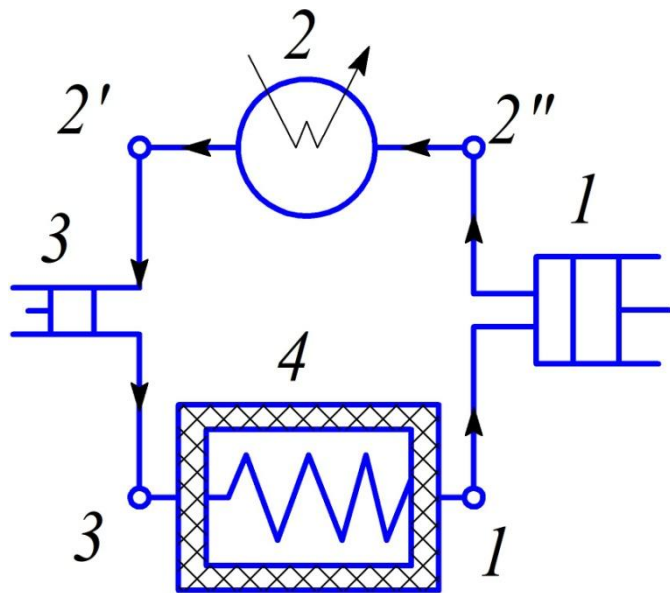


$$\eta_{oi}^R = \frac{\eta_{oi1-2} (h_1 - h_2) - \frac{h_3 - h_2}{\eta_{oi3-2'}}}{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_2')}$$

$$\eta_e^R = \eta_{oi}^R \eta_t^R \prod_{j=1}^n \eta_j$$

ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН И ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Обратный цикл Карно



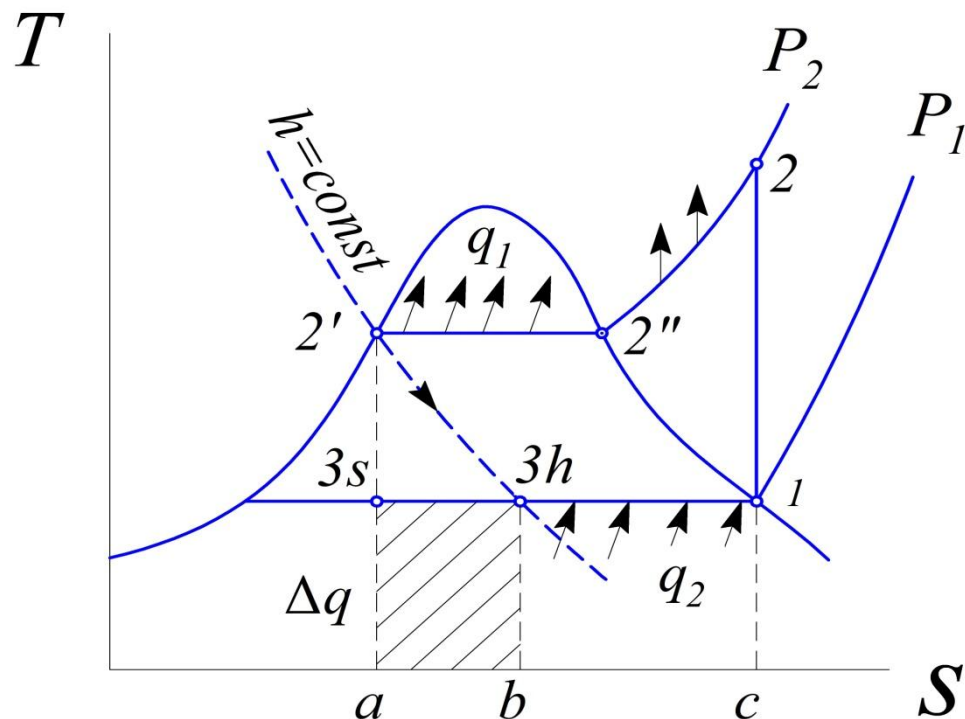
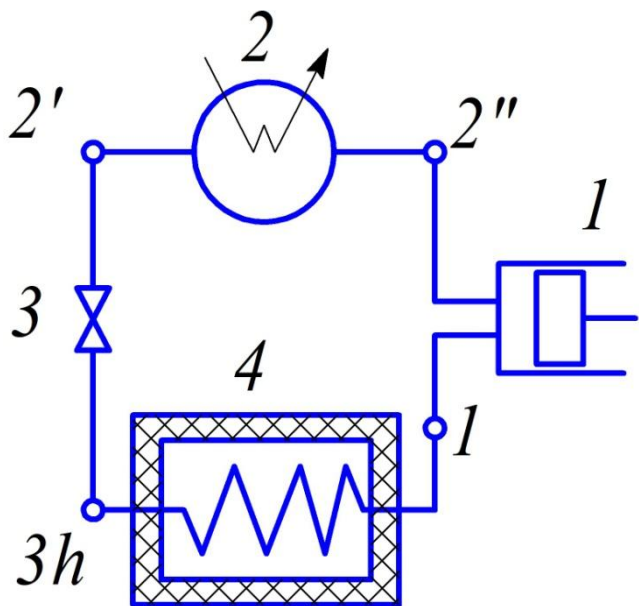
холодный коэффициент

$$\varepsilon = -\frac{q_2}{l_c} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}$$

Для обратного обратимого цикла Карно

$$\varepsilon^c = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{1}{\left(\frac{T_1}{T_2}\right) - 1}$$

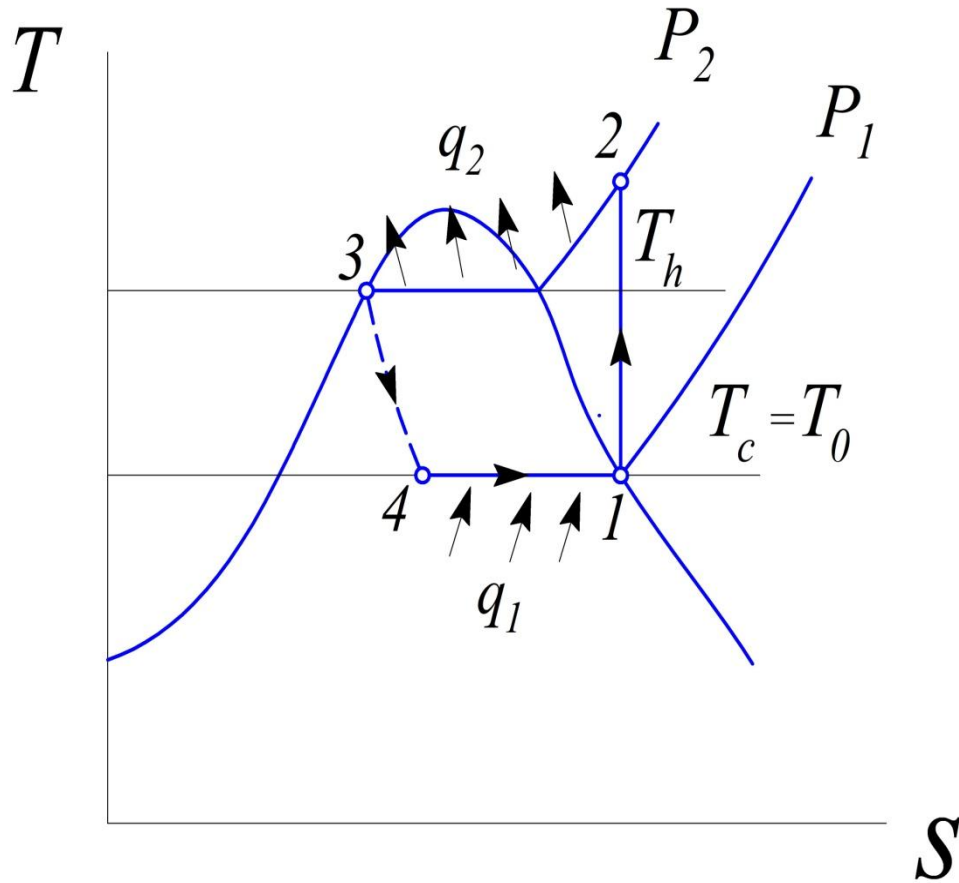
Цикл парокompрессионной холодильной машины с перегревом пара и дросселированием



Холодильный коэффициент парокompрессионной ХМ с перегревом пара и дросселированием

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_{3h}}{h_2 - h_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_2 - h_1}$$

Цикл теплового насоса



отопительный коэффициент

$$\Psi = \frac{q_1}{l_c} = \frac{q_2 + l_c}{l_c} = \varepsilon + 1$$

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Основные понятия и определения

давление $p = p_a + p_w$

$p_w < p_s$ влажный воздух называют **ненасыщенным**

Условие $p_w = p_s$ определяет **насыщенное** состояние влажного воздуха, а температура воздуха в момент насыщения называется температурой точки росы t_d

Абсолютной влажностью называют количество водяного пара (кг), содержащееся в 1 м^3 влажного воздуха

$$D = \frac{m_w}{V_w} = \frac{m_w}{V} = \rho_w$$

Относительной влажностью воздуха назовем отношение реально существующей абсолютной его влажности D к максимально возможной абсолютной его влажности D_{\max} при той же температуре.

$$D_{\max} = \rho_s$$

$$\varphi = \frac{D}{\rho_s} = \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad \rho_w = \frac{p_w}{R_w T}; \quad \rho_s = \frac{p_s}{R_w T} \quad \varphi = \frac{p_w}{p_s},$$

относительная влажность определяется отношением парциального давления водяного пара к давлению насыщения при данной температуре

Поскольку $\rho_w \leq \rho_s$ во всех случаях $\varphi \leq 1$

влажностное содержание

$$d = \frac{m_w}{m_a} = \frac{\rho_w}{\rho_a}$$

$$d = \frac{\mu_a p_w}{\mu_w p_a} = \frac{28,96 p_w}{18,016(p_a - p_w)} = 0,622 \frac{p_w}{p_a - p_w}$$

$$d_s = 0,622 \frac{p_s}{p - p_s};$$

$$\Delta t = t_{dt} - t_{wt}$$

Изобарная теплоемкость влажного воздуха

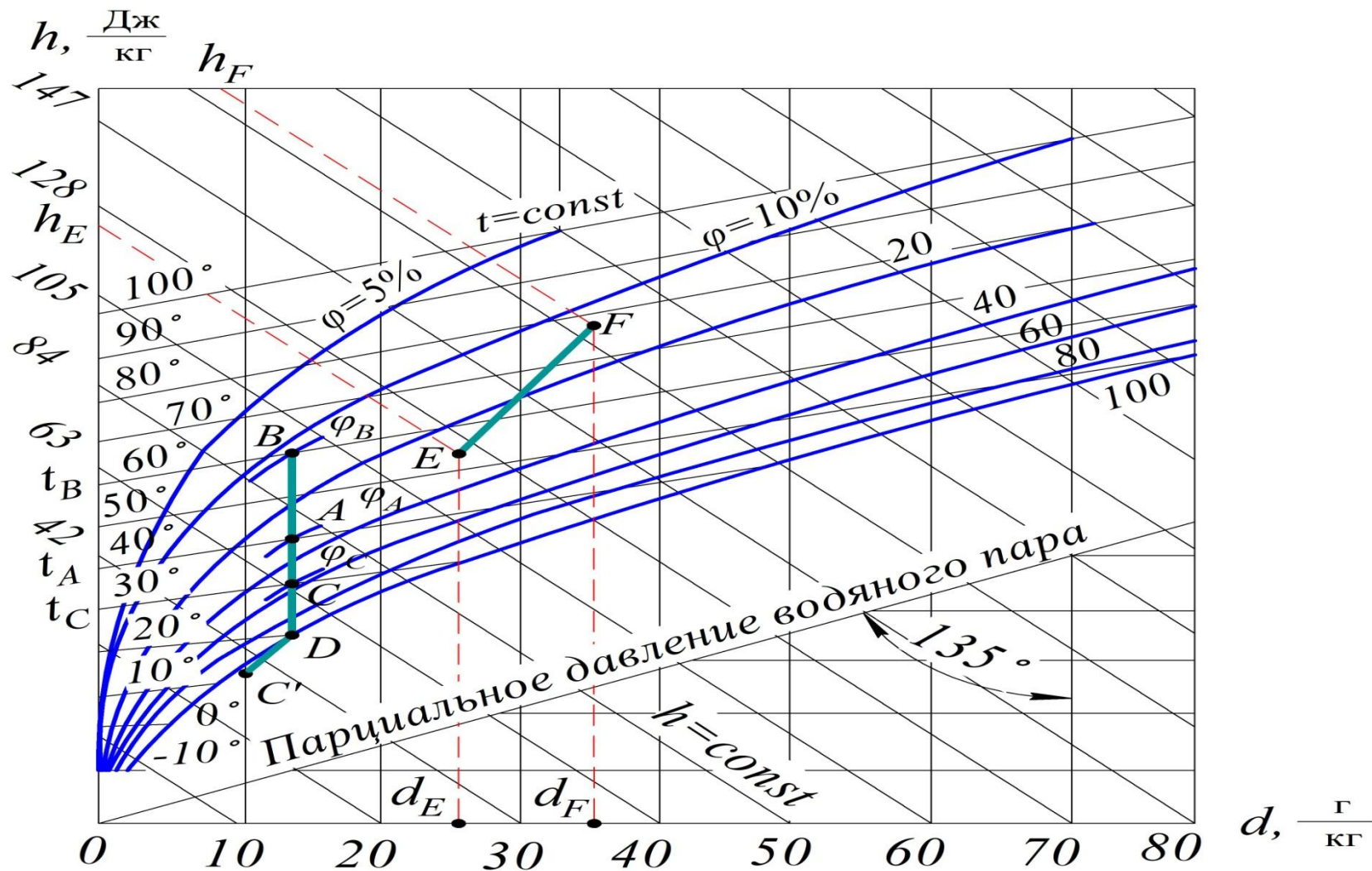
$$c_p = c_{pa} + c_{cw}d = 1,00 + 1,96d$$

Энтальпия $h = h_a + h_w d = c_{pa}t + h_w d$

$$h_w = r + c_{pw}t \cong 2500 + 1,96t$$

$$h = 1,00t + (2500 + 1,96t)d \cong t + (2500 + 1,96t)d$$

h-d- диаграмма влажного воздуха



$$q_{EF} = h_F - h_E$$

$$\Delta d_{EF} = d_F - d_E$$