

ПЗ 5. Циклы газовых турбин с регенерацией

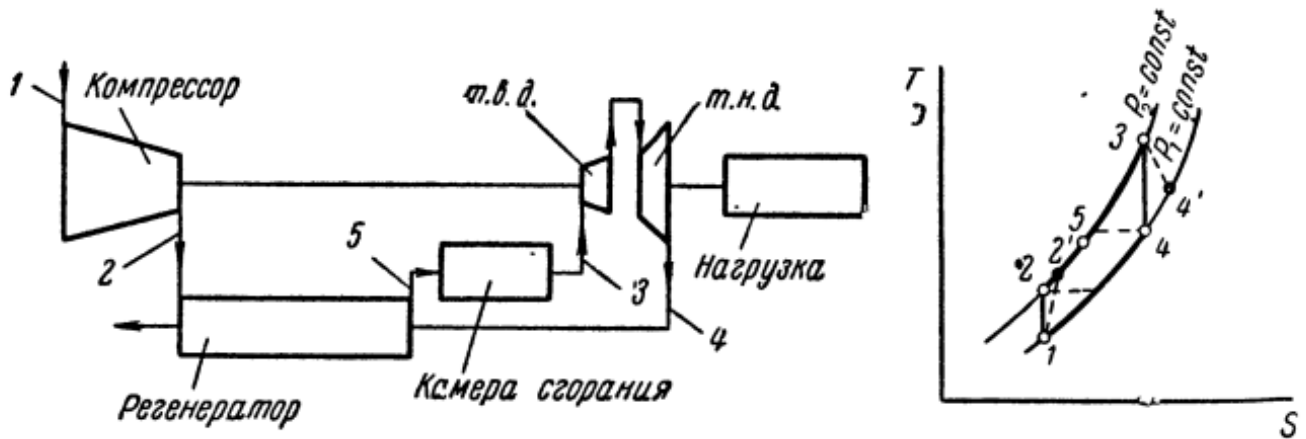


Рис. VII—7

Задача VII—13. На рис. VII—7 изображены схема газотурбинной установки ГТ700-5, работающей со сгоранием топлива при постоянном давлении с регенерацией, и схема ее теоретического цикла. Давление воздуха на входе в компрессор $p_1 = 0,98$ бар, температура $T_1 = 288^\circ \text{K}$, степень повышения давления $\beta = p_2/p_1 = 3,9$, температура газов на входе в турбину $T_3 = 973^\circ \text{K}$, степень регенерации $\sigma = 0,75$.

Определить теоретический к. п. д. цикла при заданной степени регенерации, с предельной регенерацией ($\sigma = 1,0$) и без регенерации. Найти количество тепла, передаваемое в регенераторе при $\sigma = 0,75$, если расход газа $G_r = 162 \text{ т/ч}$, теплоемкость воздуха и газа $c_p = 1,005 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$.

Указание. *Степенью регенерации* называется отношение действительного повышения температуры воздуха в регенераторе к предельно возможному повышению температуры. В данном случае

$$\sigma = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2}.$$

Ответ: при $\sigma = 0,75$ $\eta_t = 0,475$; при $\sigma = 1,0$ $\eta_t = 0,560$;
при $\sigma = 0$ $\eta_t = 327$; $Q_{\text{рег}} = 27,68 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}$.

Задача VII—14. По условиям задачи VII—13 определить температуры на выходе из турбины и компрессора и внутренний к. п. д. газотурбинной установки без регенерации с учетом необратимости процессов расширения газа в турбине и сжатия воздуха в компрессоре. Внутренний относительный к.п.д. турбины принять равным $\eta_{oit} = 0,86$, а компрессора $\eta_{oik} = 0,80$.

Решение. На рис. VII—7 линиями 1—2' и 3—4' условно показаны процессы сжатия и расширения с учетом необратимости, приводящей к росту энтропии в адиабатических процессах. Внутренние относительные к.п.д. турбины и компрессора дают соотношения между действительными и теоретическими перепадами энтальпии при адиабатном расширении и сжатии. Так как теплоемкость c_p считается не зависящей от температуры, отношение изменения энтальпий можно заменить отношением изменения температур:

$$\eta_{oit} = \frac{i_3 - i_{4'}}{i_3 - i_4} = \frac{T_3 - T_{4'}}{T_3 - T_4} \quad \text{и}$$

$$\eta_{oik} = \frac{i_2 - i_1}{i_{2'} - i_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_{2'} - T_1}.$$

$$T_2 = T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}} = 288 \cdot 3,9^{\frac{1,41-1}{1,41}} = 428^\circ\text{K};$$

$$T_{2'} = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_{oik}} = 288 + \frac{428 - 288}{0,80} = 463^\circ\text{K};$$

$$T_4 = \frac{T_3}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{973}{3,9^{\frac{1,41-1}{1,41}}} = 655^\circ\text{K};$$

$$T_{4'} = T_3 - \eta_{oit} (T_3 - T_4) = 973 - 0,86 (973 - 655) = 700^\circ\text{K}.$$

Внутренним к.п.д. установки называется отношение разности действительных перепадов энтальпии в турбине и компрессоре к изменению энтальпии в камере сгорания:

$$\eta_{igt} = \frac{(i_3 - i_{4'}) - (i_{2'} - i_1)}{i_3 - i_{2'}} = \frac{(T_3 - T_{4'}) - (T_{2'} - T_1)}{T_3 - T_{2'}} =$$

$$= \frac{(973 - 700) - (463 - 288)}{973 - 463} = 0,26.$$

Задача VII—15. Определить экономию топлива за счет регенерации в газотурбинной установке ГТУ-3 с подводом тепла по $p = \text{const}$ полезной мощностью 300 кВт, если при степени регенерации $\sigma = 0,52$ (см. задачу VII—13) параметры точек теоретического цикла таковы: $p_1 = 1,00$ бар, $T_1 = 293^\circ\text{K}$, $\beta = 3,25$, $T_3 = 1023^\circ\text{K}$. Расход газа $G_r = 5,0$ кг/сек, теплотворная способность топлива $Q_r = 41900$ кДж/кг.

Ответ: 70 кг/ч.

Задача VII—16. Газотурбинная установка ГТ-25-700-1, схема которой показана на рис. VII—8, а, работает по циклу с двухступенчатым сжатием, подводом тепла при постоянном давлении, с регенерацией.

Изобразить схему теоретического цикла в координатах $T-s$. Определить параметры всех точек цикла, термический к.п.д., теоретическую мощность ГТУ и часовые количества тепла, передаваемые в промежуточном охладителе и в регенераторе, принимая следующие значения величин: температура воздуха на входе в компрессор низкого давления $T_1 = 290^\circ \text{K}$; давление $p_1 = 0,98 \text{ бар}$; степени повышения давления в к.н.д. и к.в.д. $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3} = 3,16$; температура воздуха после промежуточного охладителя $T_3 = 313^\circ \text{K}$; температура газа перед турбиной $T_5 = 973^\circ \text{K}$; степень регенерации $\sigma = 0,80$. Расходы газа и воздуха равны и составляют 190 кг/сек , теплоемкости $c_p = 1,089 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$, показатель адиабаты $k = 1,4$.

Решение. Схема цикла в координатах $T-s$ показана на рис. VII—8, б.

Давления в точках 2 и 4 находятся по заданной степени повышения давления: $p_2 = \beta p_1 = 3,16 \cdot 0,98 = 3,10 \text{ бар}$; $p_3 = p_2 = 3,10 \text{ бар}$; $p_4 = \beta p_3 = 3,16 \cdot 3,10 = 9,8 \text{ бар}$; $p_5 = p_4 = 9,8 \text{ бар}$; $p_6 = p_1 = 0,98 \text{ бар}$.

Температуры в точках 2, 4 и 6 находятся по уравнению адиабатного процесса:

$$T_2 = T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}} = 290 \cdot 3,16^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 403^\circ \text{K};$$

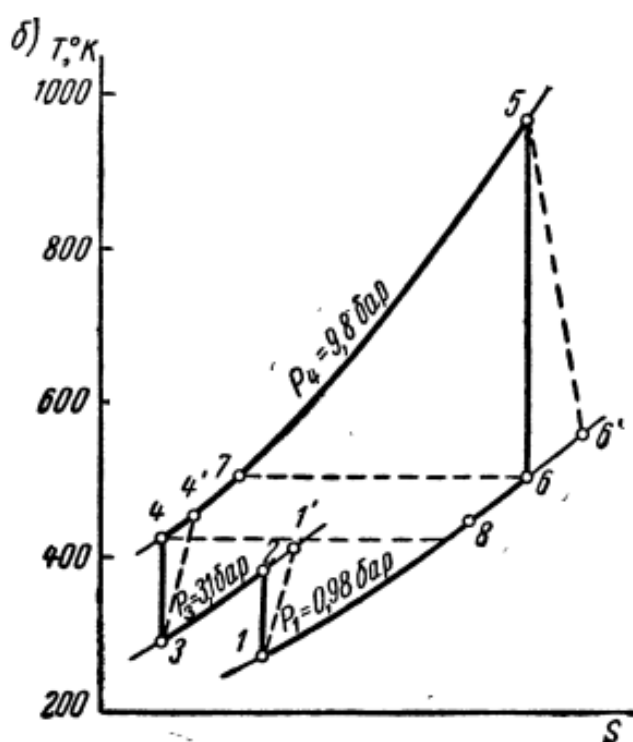
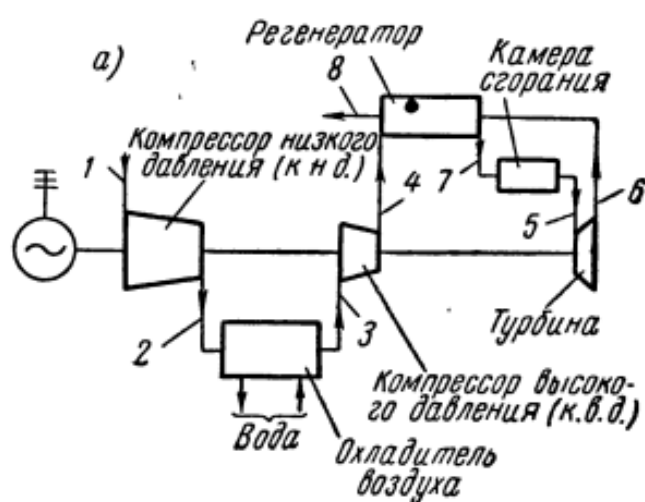


Рис. VII—8

$$T_4 = T_3 \beta^{\frac{k-1}{k}} = 313 \cdot 3,16^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 435^\circ \text{K};$$

$$T_6 = T_5 \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 973 \left(\frac{0,98}{9,8} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 504^\circ \text{K}.$$

Температура воздуха на выходе из регенератора определяется по заданной степени регенерации: $\sigma = \frac{T_7 - T_4}{T_6 - T_4} = 0,80$, откуда

$$T_7 = \sigma (T_6 - T_4) + T_4 = 0,80 (504 - 435) + 435 = 490^\circ \text{K}.$$

Так как расходы и теплоемкости воздуха равны, то

$$T_7 - T_4 = T_6 - T_8,$$

откуда

$$T_8 = T_6 - (T_7 - T_4) = 504 - (490 - 435) = 449^\circ \text{K}.$$

Термический к.п.д. цикла определяется как отношение разности работ турбины Δi_T и компрессоров $\Delta i_{\text{к.н.д.}}$ и $\Delta i_{\text{к.в.д.}}$ к количеству тепла, подведенного в камере сгорания $\Delta i_{\text{к.с.}}$:

$$\begin{aligned} \eta_t &= \frac{\Delta i_T - \Delta i_{\text{к.н.д.}} - \Delta i_{\text{к.в.д.}}}{\Delta i_{\text{к.с.}}} = \frac{c_p(T_5 - T_6) - c_p(T_2 - T_1) - c_p(T_4 - T_3)}{c_p(T_5 - T_7)} = \\ &= \frac{(T_5 - T_6) - (T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{T_5 - T_7} = \\ &= \frac{(973 - 504) - (403 - 290) - (435 - 313)}{973 - 490} = 0,485. \end{aligned}$$

Теоретическая мощность установки равна $N_T = \Delta i_{\text{к.с.}} \eta_t G_r = c_p (T_5 - T_7) \eta_t G_r = 1,089 (973 - 490) 0,485 \cdot 190 = 48\,450 \text{ кВт}.$

Количество тепла, отдаваемое воздухом охлаждающей воде в промежуточном охладителе,

$$Q_{\text{охл}} = 3600 G_{\text{в}} c_p (T_2 - T_3) = 3600 \cdot 190 \cdot 1,089 (403 - 313) = 67 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}.$$

Количество тепла, передаваемое в регенераторе,

$$\begin{aligned} Q_{\text{рег}} &= 3600 G_{\text{в}} c_p (T_7 - T_4) = 3600 \cdot 190 \cdot 1,089 (490 - 435) = \\ &= 40,8 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}. \end{aligned}$$

Задача VII—26. В цикле 1-2-3-4-5-2-6-7-1 (рис. VII—12) отведенное тепло q_2' в процессе 5—2 целиком подводится в процессе 2—6, причем $q_2' = q_1'$. Определить параметры всех точек, к.п.д. цикла и уменьшение к.п.д. этого цикла по сравнению с циклом 1-2-3-4-5-е-т-1, если рабочим телом является 1 кг сухого воздуха, $p_{1абс} = 0,98$ бар, $t_1 = 20^\circ \text{C}$, $\pi = \frac{p_2}{p_3} = 3$, $\varepsilon = \frac{v_2}{v_3} = \frac{v_5}{v_4} = 10$, $\lambda = \frac{p_4}{p_3} = 2,0$. Теплоемкости принять постоянными:

$$c_p = 1,005 \text{ кдж/кг} \cdot \text{град}, \quad c_v = 0,71 \text{ кдж/кг} \cdot \text{град}.$$

Решение. Определим параметры точек и тепло, подведенное и отведенное в процессах цикла.

Для точки 1:

$$p_{1абс} = 0,98 \text{ бар}; \quad T_1 = 293^\circ \text{K}; \quad v_1 = \frac{RT_1}{p_{1абс}} = \frac{287 \cdot 293}{0,98 \cdot 10^5} = 0,858 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Для точки 2:

$$p_{2абс} = \pi p_{1абс} = 3 \cdot 0,98 = 2,94 \text{ бар};$$

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_{1абс}}{p_{2абс}} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,858 \left(\frac{0,98}{2,94} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,390 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_{2абс}}{p_{1абс}} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 3^{0,286} = 400^\circ \text{K}.$$

Для точки 3:

$$p_{3абс} = p_{2абс} \left(\frac{v_2}{v_3} \right)^k = 2,94 \cdot 10^{1,4} = 74 \text{ бар};$$

$$v_3 = \frac{v_2}{\varepsilon} = \frac{0,39}{10} = 0,039 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_3 = T_2 \cdot \varepsilon^{k-1} = 400 \cdot 10^{0,4} = 1004^\circ \text{K}.$$

Для точки 4:

$$p_{4абс} = \lambda \cdot p_{3абс} = 2 \cdot 74 = 148 \text{ бар};$$

$$v_4 = v_3 = 0,039 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_4 = \lambda \cdot T_3 = 2 \cdot 1004 = 2008^\circ \text{K};$$

$$q_1 = c_v (T_4 - T_3) = 0,71 \cdot 1004 = 718 \text{ кдж/кг}.$$

Для точки 5:

$$v_5 = v_2 = 0,39 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_{5абс} = \frac{p_{4абс}}{\left(\frac{v_5}{v_4}\right)^k} = \frac{148}{10^{1,4}} = 5,90 \text{ бар};$$

$$T_5 = T_4 \frac{1}{\left(\frac{v_5}{v_4}\right)^{k-1}} = \frac{2008}{10^{0,4}} = 800^\circ \text{ К};$$

$$q'_2 = c_v (T_5 - T_2) = 0,71 (800 - 400) = 286 \text{ кДж/кг}.$$

Для точки 6:

$$p_{6абс} = p_{2абс} = 2,94 \text{ бар};$$

$$q'_2 = q'_1;$$

$$T_6 = \frac{q'_1}{c_p} + T_2 = \frac{286}{1,005} + 400 = 685^\circ \text{ К};$$

$$v_6 = \frac{RT_6}{p_{6абс}} = \frac{287 \cdot 685}{2,94 \cdot 10^5} = 0,668 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Для точки 7:

$$p_{7абс} = p_{1абс} = 0,98 \text{ бар};$$

$$v_7 = v_6 \left(\frac{p_{6абс}}{p_{7абс}}\right)^{\frac{1}{k}} = 0,668 \cdot 3^{\frac{1}{1,4}} = 1,47 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_7 = \frac{p_{7абс} \cdot v_7}{R} = \frac{0,98 \cdot 10^5 \cdot 1,47}{287} = 500^\circ \text{ К};$$

$$q_2 = c_p (T_7 - T_1) = 1,005 (500 - 293) = 207 \text{ кДж/кг}.$$

Определим:

работу цикла 1-2-3-4-5-2-6-7-1

$$l_u = q_1 - q_2 = 718 - 207 = 511 \text{ кДж/кг};$$

к.п.д. этого цикла

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = \frac{511}{718} = 0,71;$$

параметры точек цикла 1-2-3-4-5-e-m-1

$$p_{mабс} = p_{1абс} = 0,98 \text{ бар},$$

$$v_m = v_4 \left(\frac{p_{4абс}}{p_{mабс}}\right)^{\frac{1}{k}} = 0,039 \left(\frac{147,6}{0,98}\right)^{\frac{1}{1,4}} = 1,4 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$T_m = \frac{p_{mабс} \cdot v_m}{R} = \frac{0,98 \cdot 10^5 \cdot 1,4}{287} = 480^\circ \text{ К};$$

тепло, отведенное в процессе m — 1,

$$q_2 = c_p (T_m - T_1) = 1,005 (480 - 293) = 187 \text{ кДж/кг};$$

работу и к.п.д. цикла 1-2-3-4-5-e-m-1

$$l_u = q_1 - q_2 = 718 - 187 = 531 \text{ кДж/кг},$$

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{531}{718} = 0,74;$$

уменьшение к.п.д. цикла *1-2-3-4-5-2-6-7-1* по сравнению с циклом *1-2-3-4-5-e-m-1*

$$\frac{0,74-0,71}{0,74} \cong 0,041 \text{ или на } 4,1\%.$$