

КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ТЕПЛОТЕХНИКИ
им. М.П. ВУКАЛОВИЧА

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ ПО КУРСУ
“ТЕРМОДИНАМИКА”

Рассчитать термический и внутренний КПД, удельный расход пара и условного топлива для турбоустановки с промежуточным перегревом пара и двумя регенеративными подогревателями – первый (емешивающего, поверхностного), второй (поверхностного, емешивающего) типов. Определить также среднеинтегральную температуру подвода теплоты в цикле.

Задано:

Начальные параметры водяного пара

$$P_1 = 22,5 \text{ МПа}, t_1 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Давление пара в конденсаторе } P_2 = 3,6 \text{ кПа}$$

Параметры пара после промежуточного перегрева

$$P_n = 7,0 \text{ МПа}, t_n = 540 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Температура питательной воды } t_{пв} = 210 \text{ }^\circ\text{C}$$

Давление пара во втором регенеративном подогревателе выбирается из условия

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 \quad \Delta s_1 = \Delta s_2$$

Недогрев жидкости до температуры конденсации греющего пара в первом подогревателе равен $\Delta t = 3 \text{ }^\circ\text{C}$, во втором $\Delta t = 4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Внутренние относительные КПД отсеков турбины и насосов :

$$\eta_{oi}^{чвд} = 0,93 \quad \eta_{oi}^{чнд} = 0,92 \quad \eta_{oi}^n = 0,89$$

КПД других элементов установки:

$$\eta_k = 0,91 \quad \eta_m = 0,95 \quad \eta_{пп} = 0,94 \quad \eta_s = 0,96$$

Представить схему ПГУ и цикл в $T - s$ диаграмме в масштабе.

Рис. 1: Условие задачи

Расчет параметров в каждой точке цикла¹:

Точка 1:

$$\begin{cases} P_1 = 22.5 \text{ МПа} \\ T_1 = 550^\circ \text{C} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} S_1 = 6.258 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ h_1 = 3368 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \end{cases}$$

Точка a:

$$\begin{cases} S_a = S_1 = 6.258 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ P_a = P_{\text{п}} = 7 \text{ МПа} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} h_a = 3034 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ t_a = 355.7^\circ \text{C} \end{cases}$$

Точка a_g:

$$h_{a_g} = h_1 - \eta_{oi}^{\text{ЧВД}}(h_1 - h_a) = 3368 - 0.93(3368 - 3034) = 3057.38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\begin{cases} h_{a_g} = 3057.38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ P_{a_g} = P_{\text{п}} = 7 \text{ МПа} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} S_{a_g} = 6.295 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ t_{a_g} = 363.5^\circ \text{C} \end{cases}$$

Точка b:

$$\begin{cases} P_b = P_{\text{п}} = 7 \text{ МПа} \\ t_b = t_{\text{п}} = 540^\circ \text{C} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} h_b = 3508 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ S_b = 6.921 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \end{cases}$$

Точка 2:

$$\begin{cases} P_2 = 3.6 \text{ кПа} \\ S_2 = S_b = 6.921 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} h_2 = 2073 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ t_2 = 27.15^\circ \text{C} \\ x_2 = 80.4\% \end{cases}$$

Точка 2':

$$\begin{cases} P_{2'} = P_2 = 3.6 \text{ кПа} \\ t_{2'} = t_2 = 27.15^\circ \text{C} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} S_{2'} = S'(P_{2'}) = 0.3973 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ h_{2'} = h'(P_{2'}) = 113.8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \end{cases}$$

Точка 2_g:

$$h_{2_g} = h_b - \eta_{oi}^{\text{ЧНД}}(h_b - h_2) = 3508 - 0.92(3508 - 2073) = 2187.8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\begin{cases} h_{2_g} = 2187.8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ P_{2_g} = P_2 = 3.6 \text{ кПа} \\ t_{2_g} = t_2 = 27.15^\circ \text{C} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} S_{2_g} = 7.304 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ x_{2_g} = 85.12\% \end{cases}$$

¹Все параметры получены с помощью программы WaterSteamPro. Аналогичные данные можно найти и в открытых источниках, таких как программа REFPROP от NIST, либо из справочника Ривкина С.Л. "Термодинамические свойства воды и водяного пара"

Точка 6:

$$\begin{cases} P_6 = P_1 = 22.5 \text{ МПа} \\ t_6 = t_{\text{пит.в}} = 210^\circ \text{C} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} h_6 = 905.6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ S_6 = 2.392 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \end{cases}$$

Точка 1_{0'}:

$$\begin{cases} S_{1_{0'}} = S_6 = 2.392 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\ S_{1_{0'}} \Leftrightarrow S'(t_{1_{0'}}) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} t_{1_{0'}} = 206.5^\circ \text{C} \\ P_{1_{0'}} = 1.778 \text{ МПа} \\ h_{1_{0'}} = 881.8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \end{cases}$$

Точка 5 :

$$t_5 = t_{1_{0'}} - \Delta t_1 = 206.5 - 3 = 203.5^\circ \text{C}$$

$$\begin{cases} t_5 = 203.5^\circ \text{C} \\ S_5 = S'(t_5) = 2.364 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} h_5 = 868.2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ P_5 = 1.672 \text{ МПа} \end{cases}$$

Точка 4:

$$\Delta S_1 = \Delta S_2$$

$$S_4 - S_3 = S_5 - S_4$$

$$S_3 = S_2'$$

$$S_4 = \frac{S_5 + S_2'}{2} = \frac{2.364 + 0.3973}{2} = 1.3807 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$\begin{cases} S_4 = 1.3807 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\ P_4 = P_5 = 1.672 \text{ МПа} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} t_4 = 106.7^\circ \text{C} \\ h_4 = 448.5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \end{cases}$$

Точка 3:

$$\begin{cases} S_3 = S_2' = 0.3973 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\ P_3 = P_4 = 1.672 \text{ МПа} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} h_3 = 115.5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ t_3 = 27.18^\circ \text{C} \end{cases}$$

Точка 3_g:

$$h_{3_g} = h_{2'} + \frac{h_3 - h_{2'}}{\eta_{0i}^n} = 113.8 + \frac{115.5 - 113.8}{0.89} = 115.71 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\begin{cases} h_{3_g} = 115.71 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ P_{3_g} = P_4 = 1.672 \text{ МПа} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} S_{3_g} = 0.398 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\ t_{3_g} = 27.23^\circ \text{C} \end{cases}$$

Точка 2_{0'}:

$$t_{2_{0'}} = t_4 + \Delta t_2 = 106.7 + 4 = 110.7^\circ \text{C}$$

$$\begin{cases} t_{2_{0'}} = 110.7^\circ C \\ S_{2_{0'}} = S'(t_{2_{0'}}) = 1.426 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} h_{2_{0'}} = 464.3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ P_{2_{0'}} = 0.1468 \text{МПа} \end{cases}$$

Точка 2₀:

$$\begin{cases} P_{2_0} = P_{2_{0'}} = 0.1468 \text{МПа} \\ S_{2_0} = S_b = 6.921 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} h_{2_0} = 2573 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ t_{2_0} = 110.7^\circ C \\ x_{2_0} = 94.67\% \end{cases}$$

Точка 2_{0g}:

$$h_{2_{0g}} = h_b - \eta_{oi}^{\text{ЧНД}}(h_b - h_{2_0}) = 3508 - 0.92(3508 - 2573) = 2647.8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\begin{cases} h_{2_{0g}} = 2647.8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ P_{2_{0g}} = P_{2_0} = 0.1468 \text{МПа} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} S_{2_{0g}} = 7.115 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ t_{2_{0g}} = 110.7^\circ C \\ x_{2_{0g}} = 98.01\% \end{cases}$$

Точка 1₀:

$$\begin{cases} P_{1_0} = P_{1_{0'}} = 1.778 \text{МПа} \\ S_{1_0} = S_b = 6.921 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} h_{1_0} = 3083 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ t_{1_0} = 323.2^\circ C \end{cases}$$

Точка 1_{0g}:

$$h_{1_{0g}} = h_b - \eta_{oi}^{\text{ЧНД}}(h_b - h_{1_0}) = 3508 - 0.92(3508 - 3083) = 3117 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\begin{cases} h_{1_{0g}} = 3117 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ P_{1_{0g}} = P_{1_0} = 1.778 \text{МПа} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} S_{1_{0g}} = 6.977 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ t_{1_{0g}} = 338.6^\circ C \end{cases}$$

Находим доли отбора в регенеративных подогревателях из уравнений баланса.

Для 1-го подогревателя:

$$\alpha_1 h_{1_0} + h_4 = \alpha_1 h_{1_{0'}} + h_5$$

$$\alpha_1 = \frac{h_5 - h_4}{h_{1_0} - h_{1_{0'}}} = \frac{868.2 - 448.5}{3083 - 881.8} = 0.19067$$

Для 2-го подогревателя:

$$\alpha_2 h_{2_0} + (1 - \alpha_1) h_3 = \alpha_2 h_{2_{0'}} + (1 - \alpha_1) h_4$$

$$\alpha_2 = \frac{(1 - \alpha_1)(h_4 - h_3)}{h_{2_0} - h_{2_{0'}}} = \frac{(1 - 0.19067)(448.5 - 115.5)}{2573 - 464.3} = 0.12781$$

Определим термический кпд:

$$\eta_t = \frac{l_{\text{теор}}^T - l_{\text{теор}}^H}{q_{1\text{теор}}};$$

$$l_{\text{теор}}^T = (h_1 - h_a) + (h_b - h_2) - \alpha_1(h_{1_0} - h_2) - \alpha_2(h_{2_0} - h_2) =$$

$$= (3368 - 3034) + (3508 - 2073) - 0.19067(3083 - 2073) - 0.12781(2573 - 2073) =$$

$$= 334 + 1435 - 192.6 - 63.9 = 1512.5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$l_{\text{теор}}^H = (1 - \alpha_1)(h_3 - h_{2'}) + (h_6 - h_{1_0'}) =$$

$$= (1 - 0.19067)(115.5 - 113.8) + (905.6 - 881.8) = 1.4 + 23.8 = 25.2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$q_{1\text{теор}} = (h_b - h_a) + (h_1 - h_6) =$$

$$= (3508 - 3034) + (3368 - 905.6) = 2936.4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\eta_t = \frac{1512.5 - 25.2}{2936.4} = 0.5065$$

Определим действительные доли отборов:

Для 1-го подогревателя:

$$\alpha_{1g}h_{1_0g} + h_4 = \alpha_{1g}h_{1_0'} + h_5$$

$$\alpha_{1g} = \frac{h_5 - h_4}{h_{1_0g} - h_{1_0'}} = \frac{868.2 - 448.5}{3117 - 881.8} = 0.18777$$

Для 2-го подогревателя:

$$\alpha_{2g}h_{2_0g} + (1 - \alpha_{1g})h_3 = \alpha_{2g}h_{2_0'} + (1 - \alpha_{1g})h_4$$

$$\alpha_{2g} = \frac{(1 - \alpha_{1g})(h_4 - h_3)}{h_{2_0g} - h_{2_0'}} = \frac{(1 - 0.18777)(448.5 - 115.5)}{2647.8 - 464.3} = 0.12387$$

Следовательно действительный термический кпд:

$$\eta_{tg} = \frac{l_g^T - l_g^H}{q_{1g}};$$

$$l_g^T = (h_1 - h_{a_g}) + (h_b - h_{2_g}) - \alpha_{1g}(h_{1_0g} - h_{2_g}) - \alpha_{2g}(h_{2_0g} - h_{2_g}) =$$

$$= (3368 - 3057.38) + (3508 - 2187.8) - 0.18777(3117 - 2187.8) - 0.12387(2647.8 - 2187.8) =$$

$$= 310.6 + 1320.2 - 174.5 - 57 = 1399.1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Точка 6_g:

$$h_{6_g} = h_{1_{0'}} + \frac{h_6 - h_{1_{0'}}}{\eta_{oi}^h} = 881.8 + \frac{905.6 - 881.8}{0.89} = 908.54 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\begin{cases} h_{6_g} = 908.54 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\ P_{6_g} = P_1 = 22.5 \text{ МПа} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} S_{6_g} = 2.398 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \\ t_{6_g} = 210.7^\circ \text{C} \end{cases}$$

$$l_g^h = (1 - \alpha_{1g})(h_{3_g} - h_{2'}) + (h_{6_g} - h_{1_{0'}}) =$$

$$= (1 - 0.18777)(115.71 - 113.8) + (908.54 - 881.8) = 1.55 + 26.74 = 28.3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$q_{1g} = (h_b - h_{a_g}) + (h_1 - h_{6_g}) =$$

$$= (3508 - 3057.38) + (3368 - 908.54) = 2910.1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\eta_{tg} = \frac{1399.1 - 28.3}{2910.1} = 0.471$$

Удельный расход пара:

$$d = \frac{3600}{(l_g^h - l_g^h) \eta_m \eta_a} = \frac{3600}{(1399.1 - 28.3) 0.95 \cdot 0.96} = 2.8796 \frac{\text{кг пара}}{\text{кВт} \cdot \text{час}}$$

Кпд Брутто:

$$\eta_{БР} = \eta_{tg} \eta_k \eta_m \eta_{пп} \eta_a = 0.471 \cdot 0.91 \cdot 0.95 \cdot 0.94 \cdot 0.96 = 0.3674$$

Удельный расход условного топлива:

$$b = \frac{3600}{Q_{p.y.t}^h \eta_{БР}}$$

$Q_{p.y.t}^h = 29.3 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ - низшая рабочая теплота сгорания условного топлива.

$$b = \frac{3600}{0.3674 \cdot 29.3 \cdot 10^3} = 0.3344 \frac{\text{кг топл.}}{\text{кВт} \cdot \text{час}}$$

Среднеинтегральная температура подвода теплоты в цикле:

$$T_{1cp} = \frac{q_{1g}}{S_b - S_{6_g}} = \frac{2910.1}{6.921 - 2.398} = 643.4 \text{ К}$$

Таблица 1: Таблица термодинамических параметров цикла.

Точка	$T, ^\circ C$	$P, \text{МПа}$	$S, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$h, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
1	550.0	22.5	6.258	3368
a	355.7	7.0	6.258	3034
a_g	363.5	7.0	6.295	3057
b	540.0	7.0	6.921	3508
2	27.2	0.0036	6.921	2073
$2'$	27.2	0.0036	0.3973	113.8
2_g	27.2	0.0036	7.304	2188
6	210.0	22.5	2.392	906
$1_{0'}$	206.5	1.778	2.392	882
5	203.5	1.672	2.364	868
4	106.7	1.672	1.381	449
3	27.18	1.672	0.397	115.5
3_g	27.23	1.672	0.398	115.71
$2_{0'}$	110.7	0.1468	1.426	464.3
2_0	110.7	0.1468	6.921	2573
2_{0g}	110.7	0.1468	7.115	2647.8
1_0	323.2	1.778	6.921	3083
1_{0g}	338.6	1.778	6.977	3117
6_g	210.7	22.5	2.398	908.54

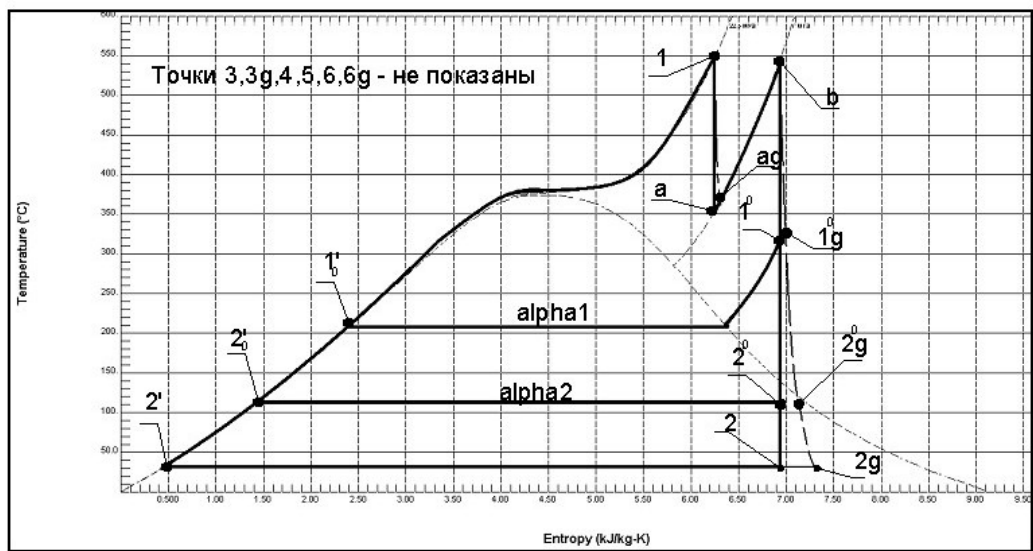


Рис. 2: Термодинамический цикл в координатах Т-S с указанием точек.