

Задача

Спроектировать (?) тепловую схему ПТУ АЭС с Z ступенями РППВ при заданных p_0, t_0, p_k (и т.д.) и электрической мощности $N_э$.

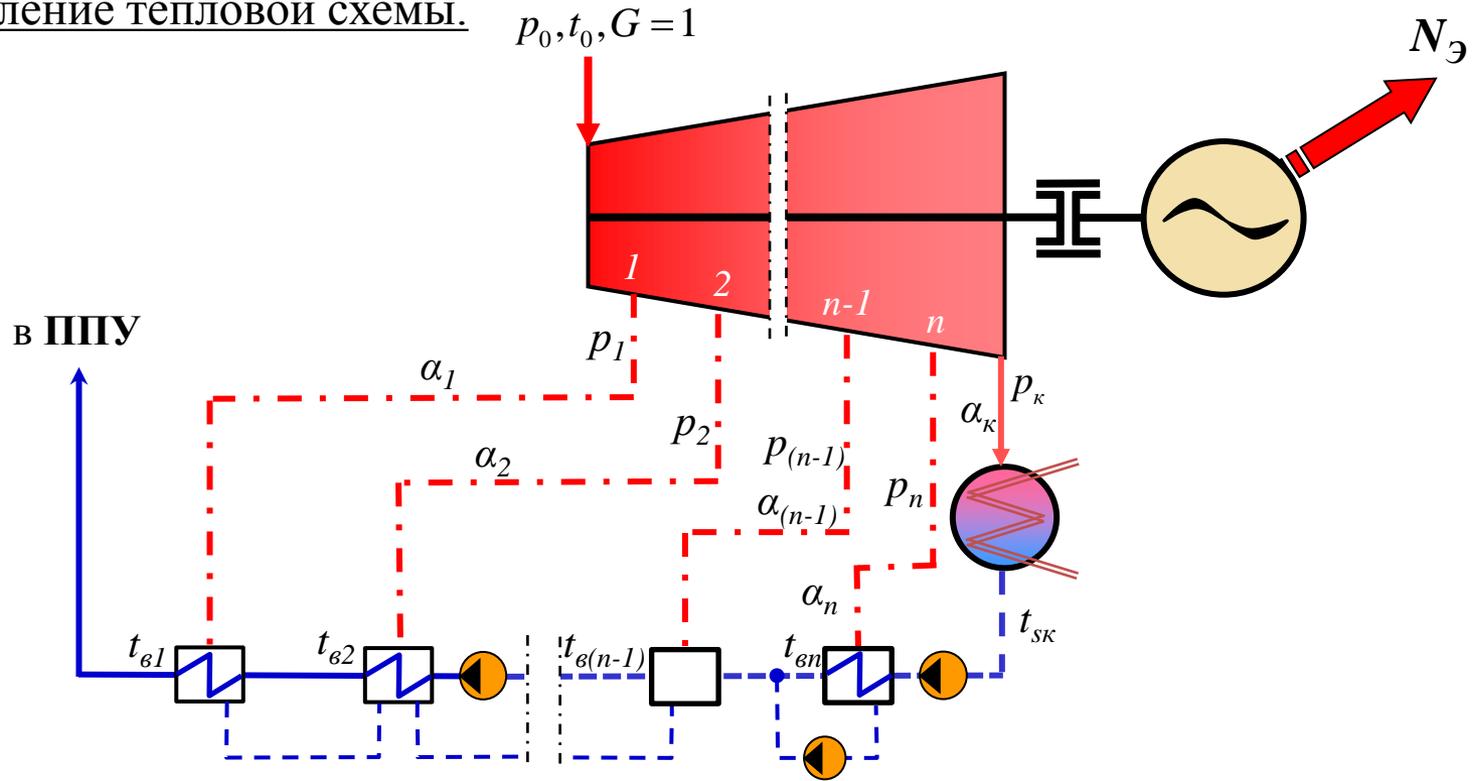
Примечание: а) «и т.д.»: м.б. заданы промежуточный перегрев пара, сепарация влаги, отпуск теплоты внешним потребителям, т.е. все, что отражается на структуре турбины и процессе расширения пара в турбине;

б) в нашем случае задан тип подогревателей.

Спроектировать тепловую схему:

- составить тепловую схему ПТУ с последовательным размещением подогревателей, их подключением к турбине и установкой необходимого числа насосов;
- определить параметры пара и воды в узловых точках схемы (параметры воды на выходе из подогревателей и пара на выходе из турбины);
- определить потоки воды и пара по тепловой схеме в относительных единицах (отнесенных к расходу пара на турбину) или в абсолютных, выраженных через расход пара на турбину. Определяется путем решения системы уравнений теплового и материального балансов подогревателей и другого тепломеханического оборудования;
- определить расход пара на турбину в размерных величинах ($кг/с, т/ч$) по энергетическому уравнению турбины;
- определить показатели тепловой экономичности: абсолютные КПД, удельные расходы теплоты и пара.

1. Составление тепловой схемы.



2. Определение параметров в узловых точках схемы и составление таблицы параметров

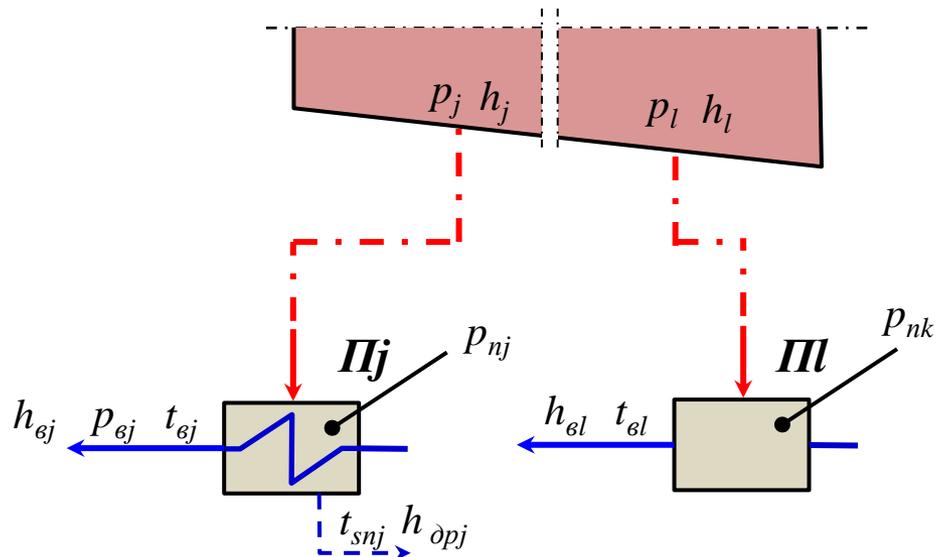
2. Определение параметров по подогревателям (воды и дренажа на выходе)

Нагрев воды в ПТУ: от $t_{\text{sk}} = f(p_k)$ до $t_{\text{s0}} = f(p_0)$

Температура питательной воды:
$$\left(t_{\text{нс}}^{\text{opt}}\right)_Z = t_{\text{sk}} + \frac{z}{z+1} (t_{\text{s0}} - t_{\text{sk}}) = t_{\text{61}}$$

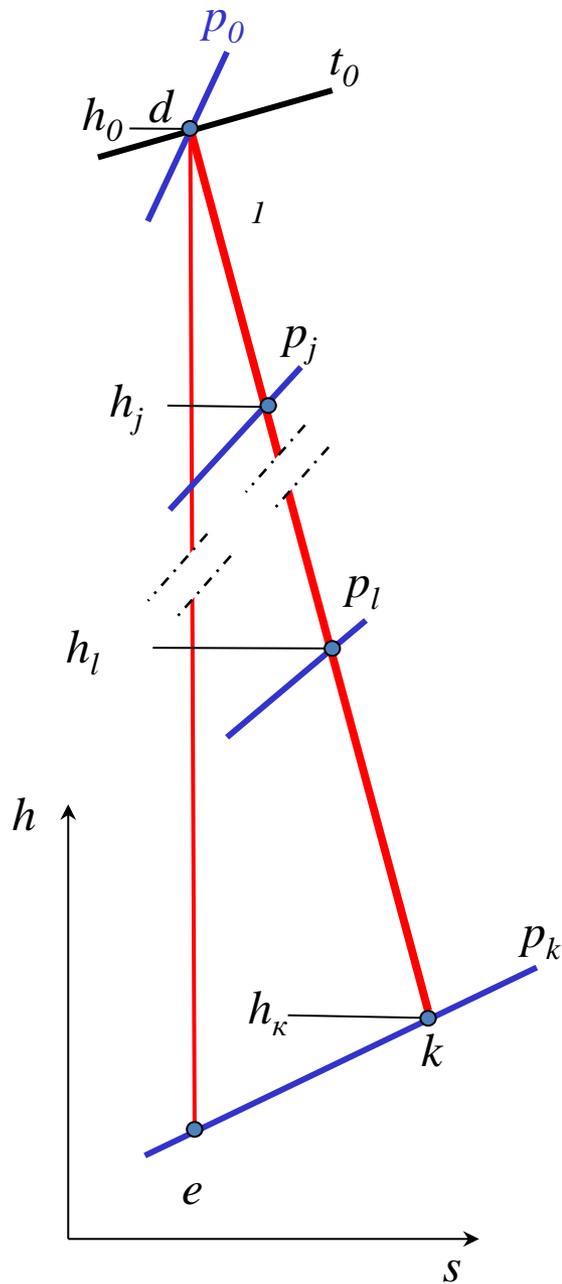
Нагрев воды в ступени регенеративного подогрева:
$$\Delta t_{\text{6j}} = \frac{(t_{\text{61}} - t_{\text{sk}})}{z}$$

Температура воды на выходе из j -ой ступени регенеративного подогрева:
$$t_{\text{6j}} = t_{\text{6}(j+1)} + \Delta t_{\text{6j}}$$



0. $t_{\epsilon j}$
1. $t_{snj} = t_{\epsilon j} + \Theta$
2. $p_{nj} = f(t_{snj})$
3. $h_{\epsilon pj} = f(t_{snj})$
4. $p_{\epsilon j}$ — определяется напором, который создает насос, прокачивающий воду через j -ый подогреватель
5. $h_{\epsilon j} = f(t_{\epsilon j}, p_{\epsilon j})$
6. $p_j = p_{nj} (0,97 \div 0,98)$
7. h_j — определяется процессом расширения пара в турбине

0. $t_{\epsilon l}$
1. $t_{snl} = t_{\epsilon l}$
2. $p_{nl} = f(t_{snl})$
3. $h_{\epsilon l} = f(t_{snl})$
4. $p_{\epsilon l} = p_{nl}$
5. $p_l = p_{nl} (0,97 \div 0,98)$
6. h_l — определяется процессом расширения пара в турбине



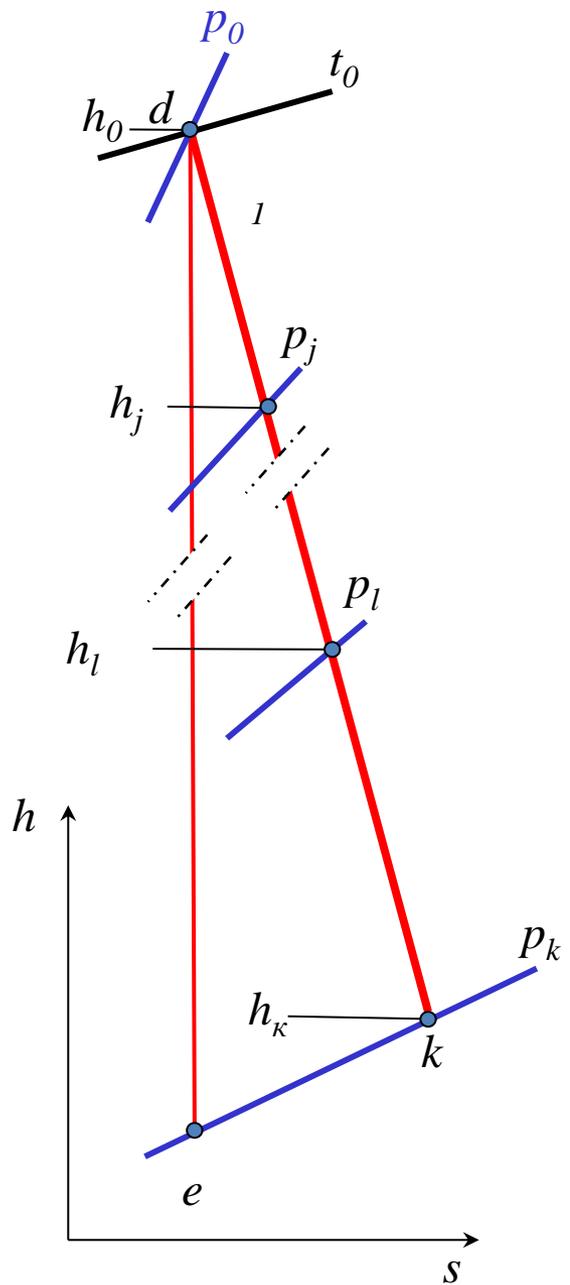


Таблица 1 – Параметры пара и воды по тепловой схеме

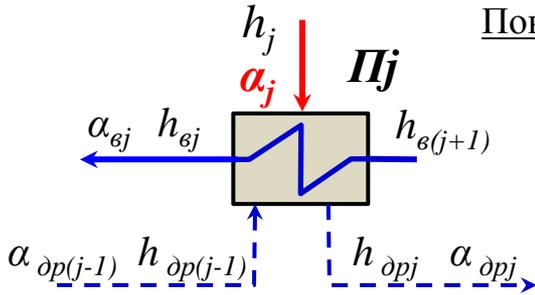
№	Пар в отборе			Дренаж из подогревателя			Вода на выходе из подогревателя			Коэффициент недовыработки мощности
	p_j	t_j / x_j	h_j	p_{nj}	t_{snj}	$h_{дрj}$	$t_{эj}$	$p_{эj}$	$h_{эj}$	y_j
	МПа	°С/-	кДж/кг	МПа	°С	кДж/кг	°С	МПа	кДж/кг	-
0	p_0	t_0	h_0	-	-	-	-	-	-	1
1										
...										
С	p_c	x_c	h_c	-	-	-	-	-	-	
ППИ	p_{nnI}	t_{nnI}	h_{nnI}	-	-	-	-	-	-	-
ППII	p_{nnII}	t_{nnII}	h_{nnII}	-	-	-	-	-	-	-
...										
Z										
K	p_k	t_k	h_k	-	-	h'_k	-	-	-	0

Составление и решение уравнений теплового и материального балансов

(определение потоков пара и воды по тепловой схеме)

Подогреватели рассматриваются последовательно **против хода воды**. Почему?

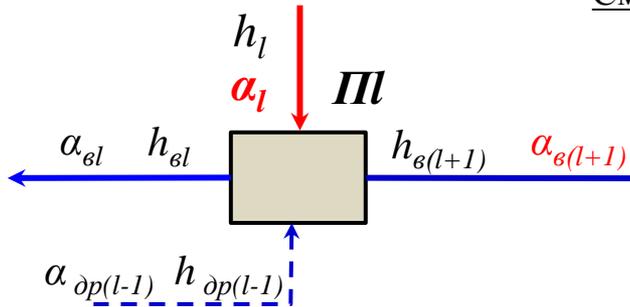
Поверхностный подогреватель



$$[\alpha_j (h_j - h_{dpj}) + \alpha_{dp(j-1)} (h_{dp(j-1)} - h_{dpj})] \eta_n = \alpha_e (h_{ej} - h_{e(j+1)})$$

$$\alpha_{dpj} = \alpha_j + \alpha_{dp(j-1)}$$

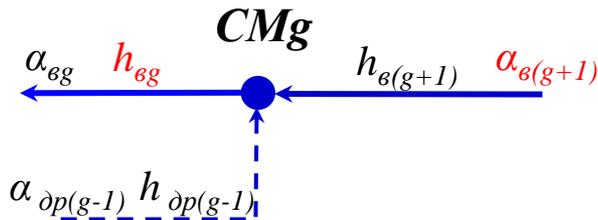
Смешивающий подогреватель



$$\alpha_{e(l+1)} h_{e(l+1)} + \alpha_l h_l + \alpha_{dp(l-1)} h_{dp(l-1)} = \alpha_{el} h_{el} \frac{1}{\eta_n}$$

$$\alpha_{el} = \alpha_{e(l+1)} + \alpha_l + \alpha_{dp(l-1)}$$

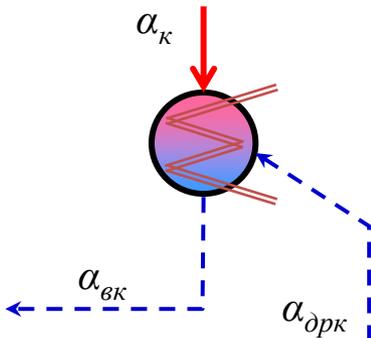
Точка смешения



$$\alpha_{e(g+1)} h_{e(g+1)} + \alpha_{dp(g-1)} h_{dp(g-1)} = \alpha_{eg} h_{eg}$$

$$\alpha_{eg} = \alpha_{e(g+1)} + \alpha_{dp(g-1)}$$

Материальный баланс конденсатора



А) по ходу расчета регенеративных подогревателей:

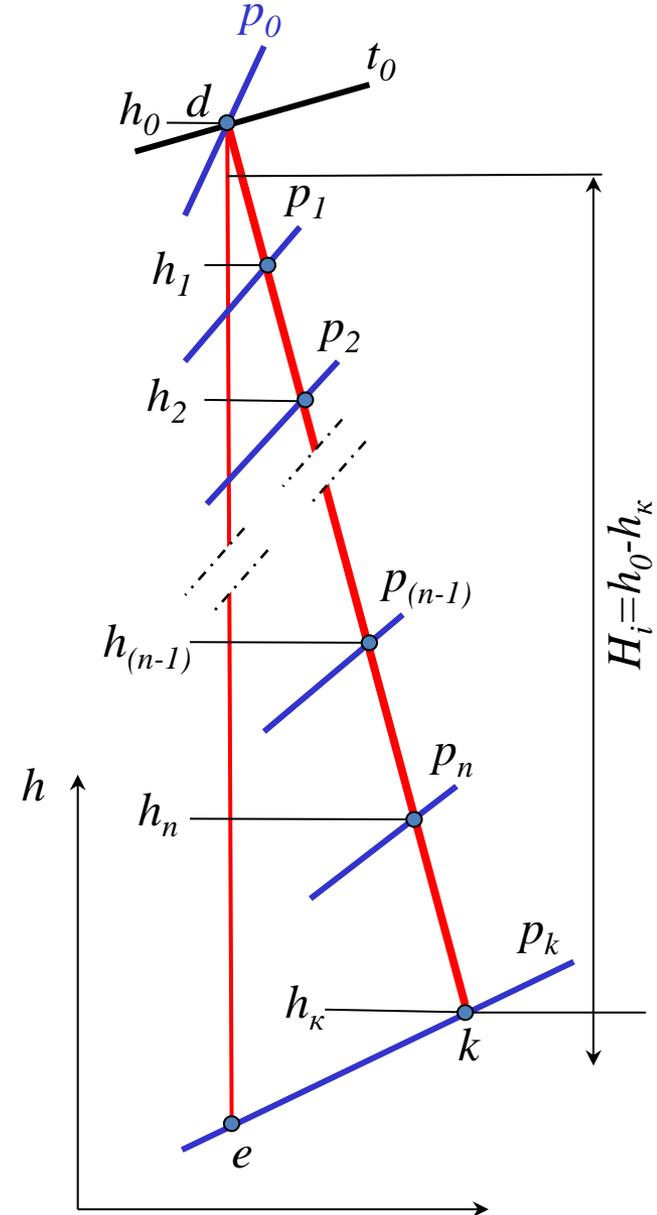
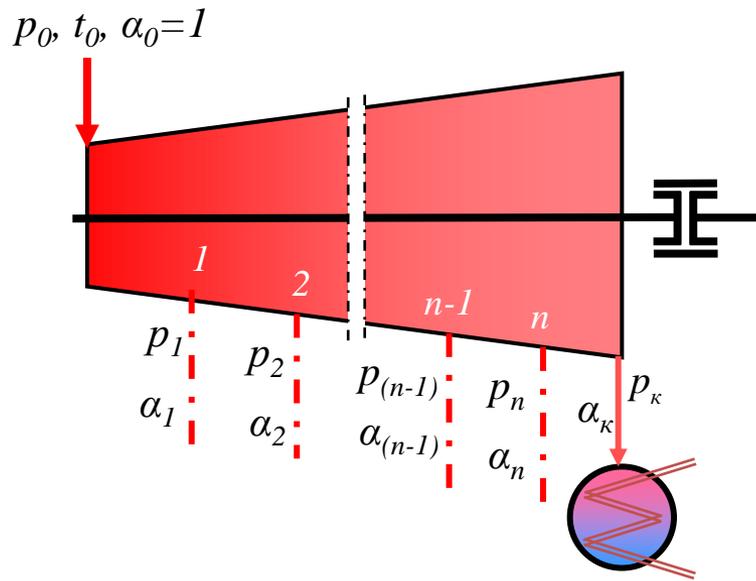
$$\alpha_k = \alpha_{ek} - \alpha_{dpk}$$

Б) по материальному балансу турбины:

$$\alpha_k = 1 - \sum_{j=1}^z \alpha_j$$

= !

Определение расхода пара на турбину и потоков пара и воды по тепловой схеме

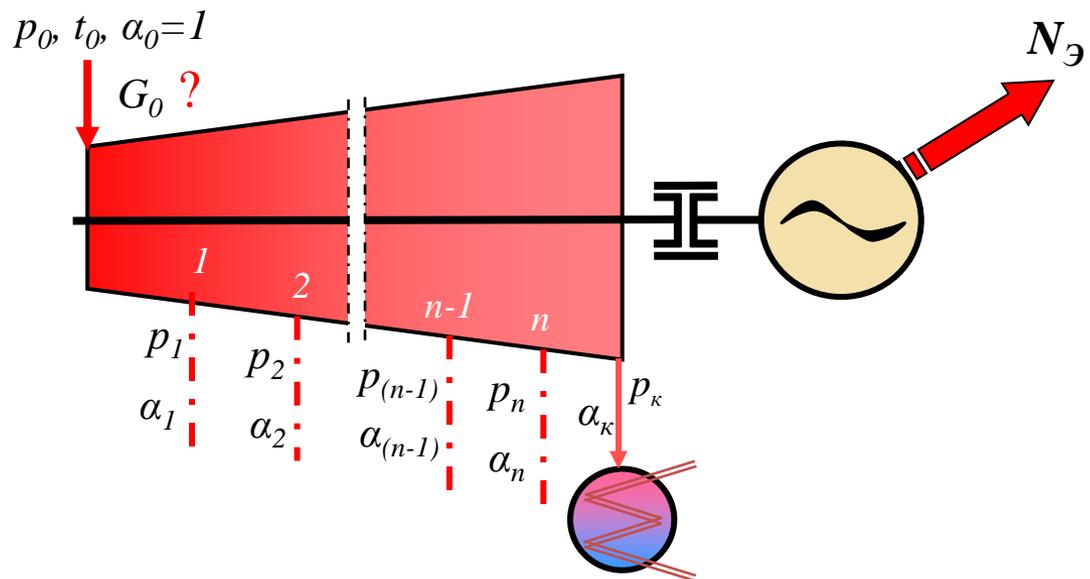


Внутренняя мощность турбины, вырабатываемая α_0 :

$$\begin{aligned}
 L_i &= \alpha_1 (h_0 - h_1) + \alpha_2 (h_0 - h_2) + \dots + \alpha_n (h_0 - h_n) + \alpha_k (h_0 - h_k) = \\
 &= 1 \cdot (h_0 - h_k) - \alpha_1 (h_1 - h_k) - \alpha_2 (h_2 - h_k) - \dots - \alpha_n (h_n - h_k) = \\
 &= (h_0 - h_k) \left[1 - \alpha_1 \frac{(h_1 - h_k)}{(h_0 - h_k)} - \alpha_2 \frac{(h_2 - h_k)}{(h_0 - h_k)} - \dots - \alpha_n \frac{(h_n - h_k)}{(h_0 - h_k)} \right] \\
 &= H_i \left(1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j y_j \right) = H_{\text{экв}}
 \end{aligned}$$

$$\frac{(h_j - h_k)}{(h_0 - h_k)}; \quad j \text{ от } 1 \text{ до } n \quad - \text{ коэффициент недовыработки мощности паром } j\text{-ого отбора}$$

$$(h_0 - h_k) = H_i \quad y_j - \text{ отношение теплоперепада, недовырабатываемого паром } j\text{-ого отбора к теплоперепаду, который он сработал бы пройдя через всю турбину.}$$



$$G_0 = \frac{N_{\text{э}}}{H_{\text{эKB}} \eta_{\text{M}} \eta_{\text{э2}}} = \frac{N_{\text{э}}}{H_i \left(1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j y_j \right) \eta_{\text{M}} \eta_{\text{э2}}}, \quad \kappa z / c$$

$$G_0 = \frac{N_{\text{э}}}{H_i \eta_{\text{M}} \eta_{\text{э2}}} + \sum_{j=1}^n G_j y_j,$$

$$G_j = \alpha_j G_0$$

Коэффициент недовыработки мощности

$$\frac{(h_j - h_k)}{(h_0 - h_k)} = y_j \quad \leftarrow \text{для турбины без промежуточного перегрева}$$

$$0 \leq y_j \leq 1$$

Для турбины с промежуточным перегревом

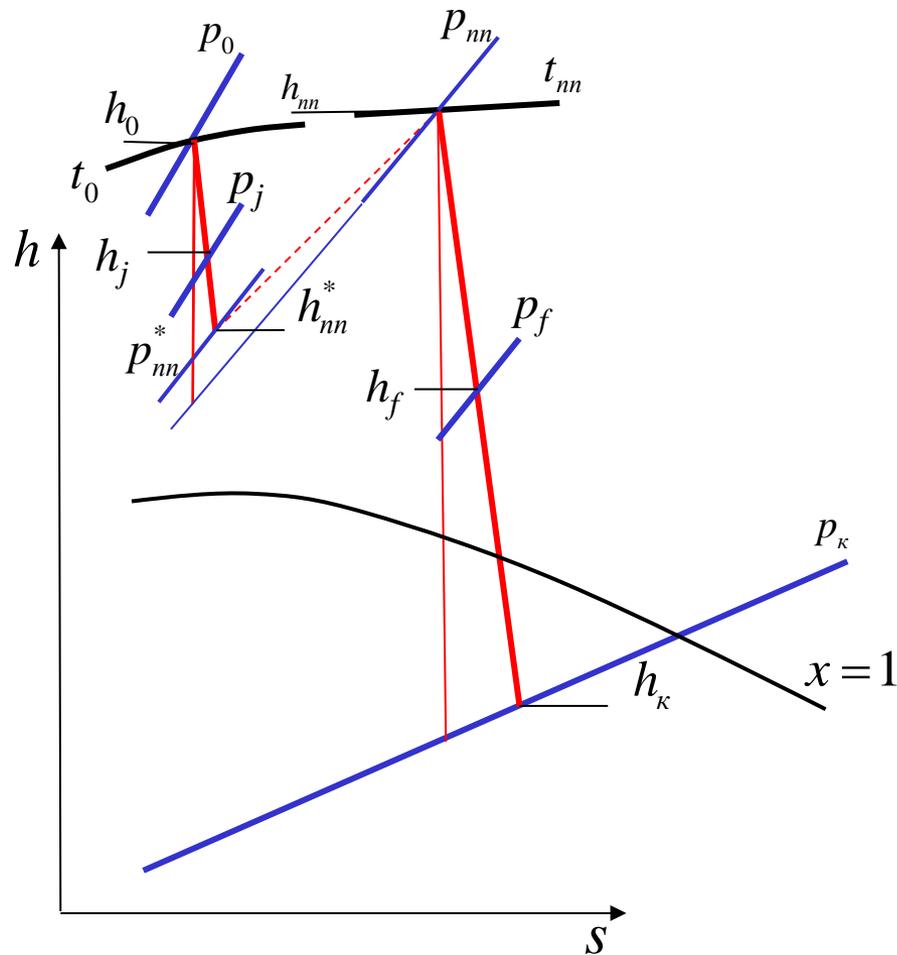
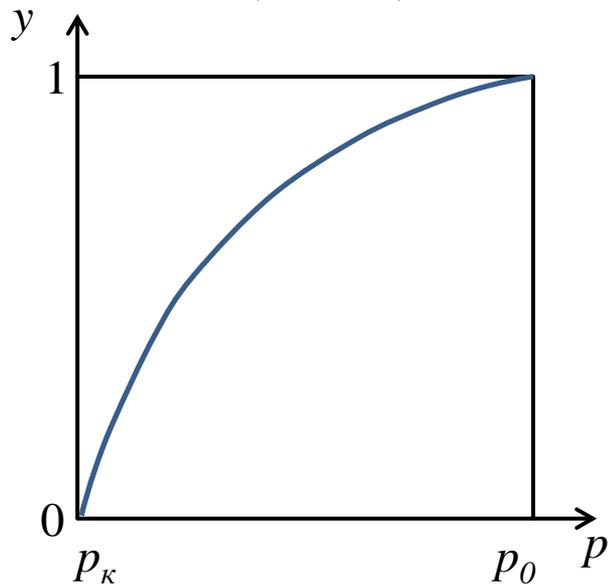
$$H_i = (h_0 - h_\kappa) + (h_{nn} - h_{nn}^*)$$

- для отбора до промежуточного перегрева:

$$y_j = \frac{(h_j - h_\kappa) + (h_{nn} - h_{nn}^*)}{(h_0 - h_\kappa) + (h_{nn} - h_{nn}^*)} = \frac{(h_j - h_\kappa) + (h_{nn} - h_{nn}^*)}{H_i}$$

- для отбора после промежуточного перегрева:

$$y_f = \frac{(h_f - h_\kappa)}{(h_0 - h_\kappa) + (h_{nn} - h_{nn}^*)} = \frac{(h_f - h_\kappa)}{H_i}$$



Цикл газотурбинной установки

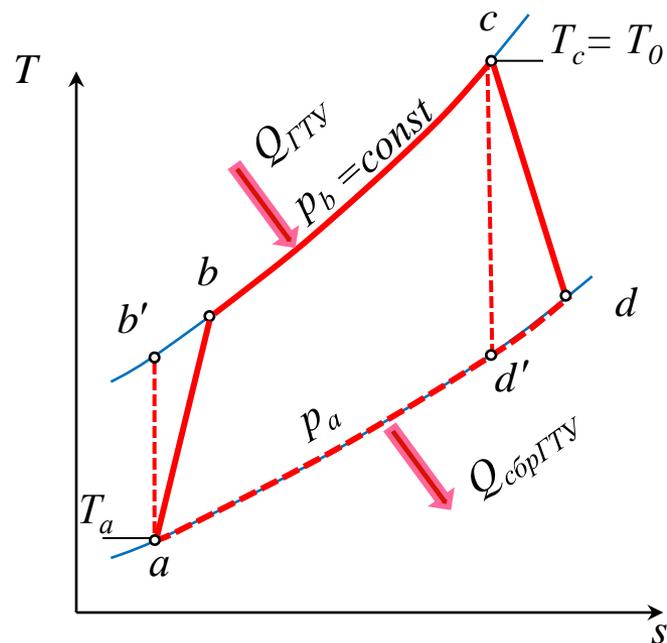
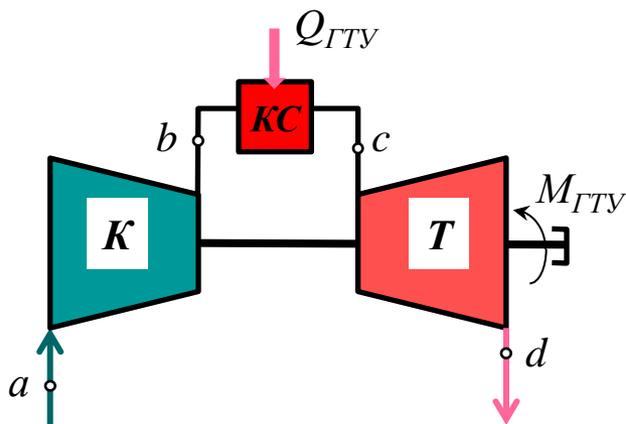
1. Газотурбинная установка (ГТУ) и ее цикл.

ГТУ могут быть:

- открытого и закрытого цикла;
- с подводом теплоты а) при постоянном давлении, б) при постоянном объеме;
- и т.д.

На АЭС: закрытого цикла с подводом теплоты при постоянном давлении.

1.1. Цикл простой ГТУ.



$$p_c = \lambda_1 p_b; \quad p_a = \lambda_2 p_d;$$

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2;$$

$$\varepsilon = \frac{p_b}{p_a}; \quad \delta = \frac{p_c}{p_d}; \quad \delta = \lambda \varepsilon.$$

Удельная полезная работа ГТУ:

$$H = H_T - H_K;$$

$$H_T = c_{p2} (T_c - T_d), \quad H_K = c_{p6} (T_b - T_a),$$

Внутренние относительные КПД турбины и компрессора:

$$\eta_T = \frac{h_c - h_d}{h_c - h_{dt}} = \frac{c_{p2} (T_c - T_d)}{c'_{p2} (T_c - T_d)} = \frac{T_c - T_d}{T_c - T_d}, \quad \eta_K = \frac{h_{bt} - h_a}{h_b - h_a} = \frac{c'_{p6} (T_{bt} - T_a)}{c_{p6} (T_b - T_a)} = \frac{T_{bt} - T_a}{T_b - T_a},$$

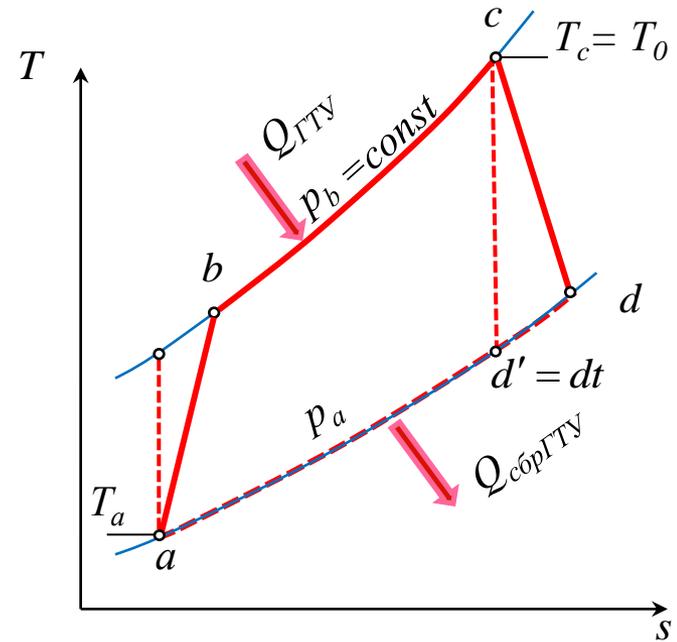
$$\frac{T_{bt}}{T_a} = \varepsilon^{m_6}, \quad \frac{T_c}{T_{dt}} = \delta^{m_2}; \quad m_2 = \frac{(k_2 - 1)}{k_2}; \quad m_6 = \frac{(k_6 - 1)}{k_6};$$

$$T_d = T_c \left(1 - (1 - \delta^{-m_2}) \eta_T\right), \quad T_b = T_a \left(1 + (\varepsilon^{m_6} + 1) / \eta_T\right),$$

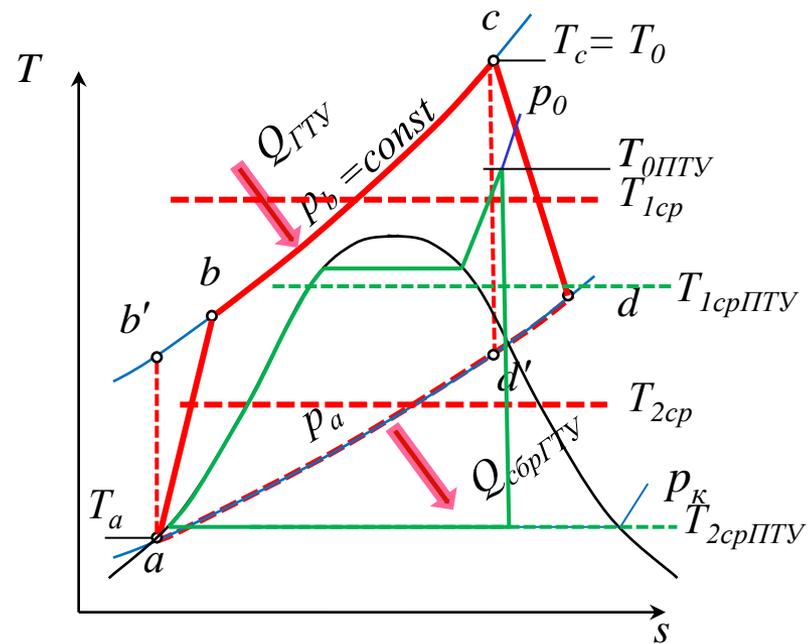
$$H_T = \eta_T c_{p2} T_c (1 - \delta^{-m_2}), \quad H_K = \left(\frac{1}{\eta_K}\right) c_{p6} T_a (\varepsilon^{m_6} - 1), \quad q_{ГТУ} = \left(\frac{1}{\eta_{KC}}\right) c_p (T_c - T_b),$$

$$\eta = \frac{H}{q_{ГТУ}} = \frac{\bar{c}_{p2} \tau \eta_T (1 - \delta^{-m_2}) - \left(\frac{1}{\eta_K}\right) \bar{c}_{p6} (\varepsilon^{m_6} - 1)}{\tau - 1 - (\varepsilon^{m_6} - 1) / \eta_K} \eta_{KC},$$

$$\tau = \frac{T_c}{T_a}.$$

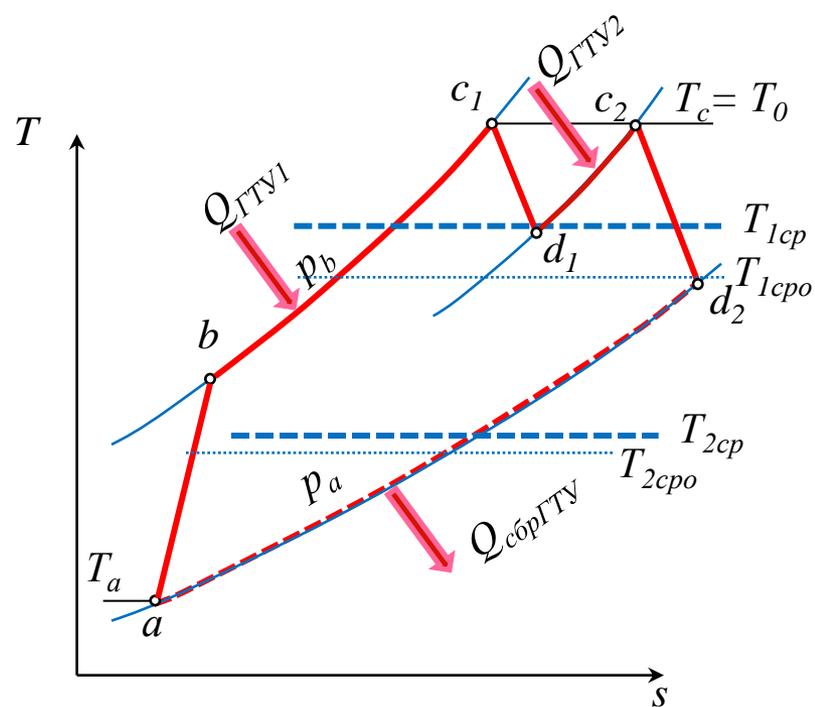
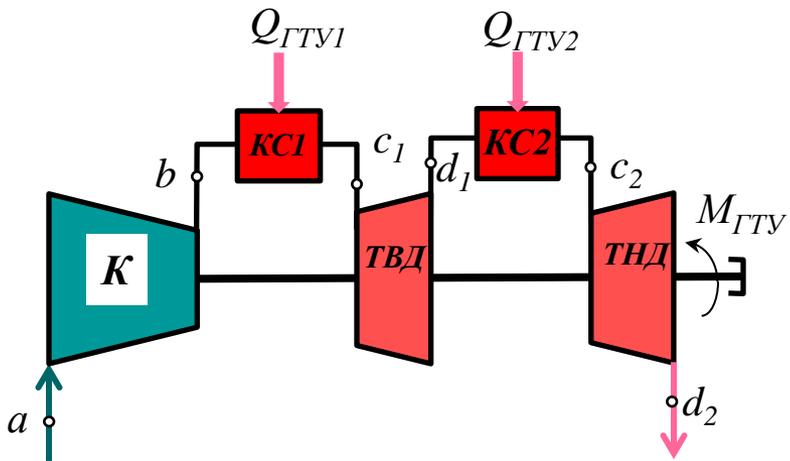


$$\eta = \frac{H}{q_{ГТУ}} = \frac{\bar{c}_{p2} \tau \eta_T (1 - \delta^{-m_2}) - \left(\frac{1}{\eta_K} \right) \bar{c}_{p8} (\varepsilon^{m_6} - 1)}{\tau - 1 - (\varepsilon^{m_6} - 1) / \eta_K} \eta_{КС},$$

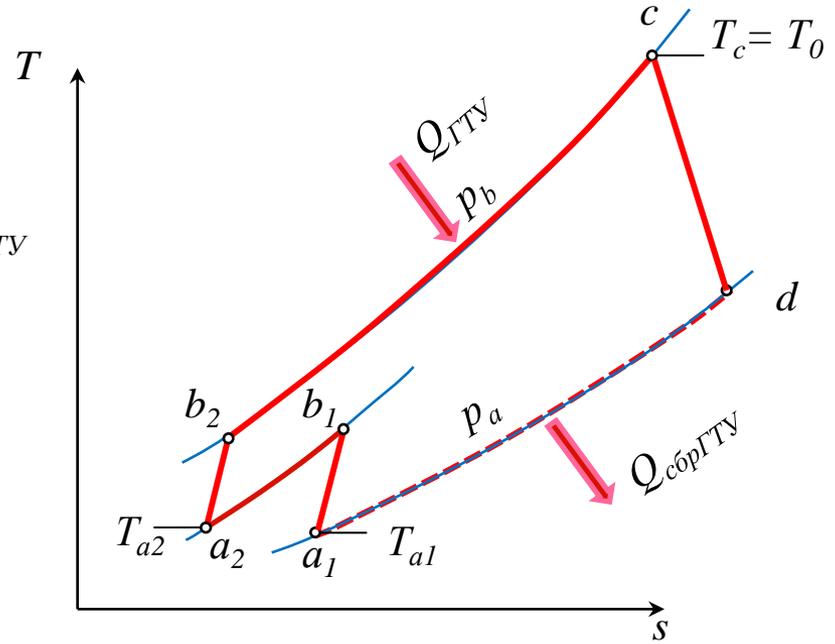
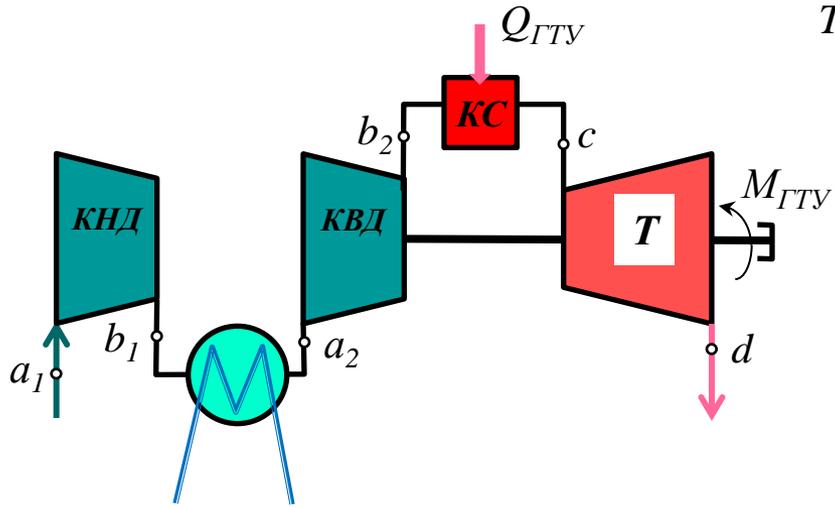


2. Повышение экономичности ГТУ

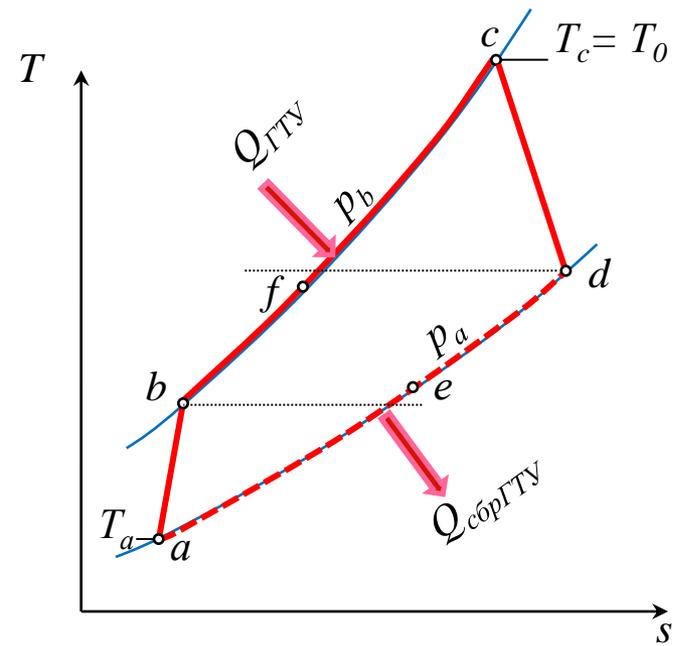
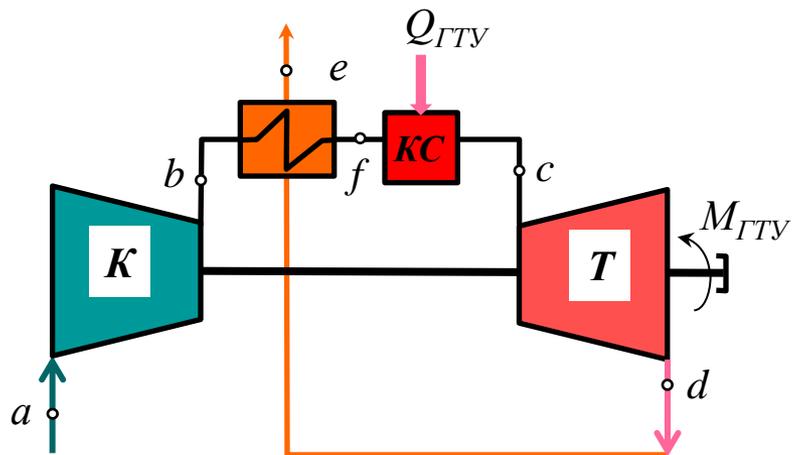
2.1. Ступенчатый подвод теплоты.



2.2. Ступенчатое сжатие.



2.3. Регенеративный подогрев.



Газотурбинные установки АЭС

