

6.2. Анализ работы ступени при изменении теплоперепада

А. Изменение степени реактивности

$u = const.$ Изменение $H_0 \implies$ изменится $c_\phi \implies x_\phi = \frac{u}{c_\phi}$

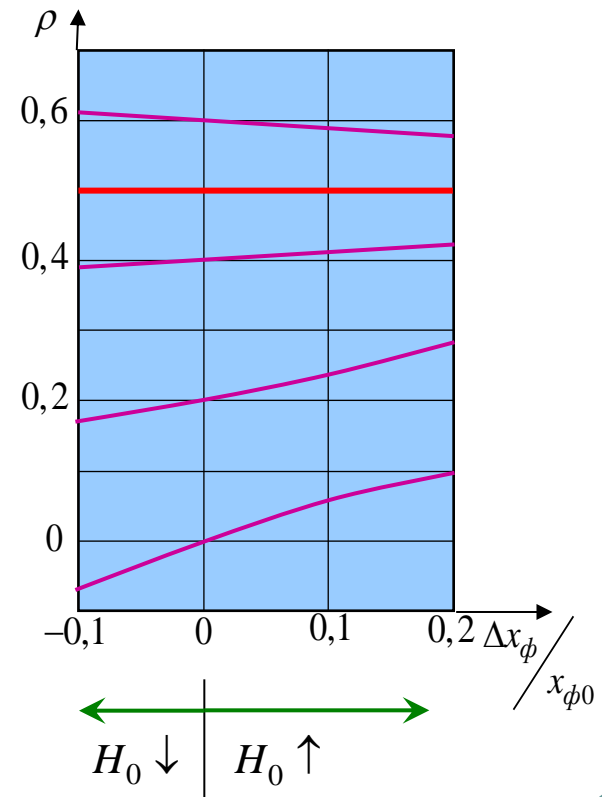
$\langle H_0 \uparrow \implies c_\phi \uparrow \implies x_\phi \downarrow \rangle$ $\langle H_0 \downarrow \implies c_\phi \downarrow \implies x_\phi \uparrow \rangle$

Аналитически и экспериментально получено, что при

$$-0,1 > \frac{\Delta x_\phi}{x_{\phi 0}} > -0,2$$

$$\frac{\Delta \rho}{1 - \rho_0} = (0,5 - \rho_0) \frac{\Delta x_\phi}{x_{\phi 0}}$$

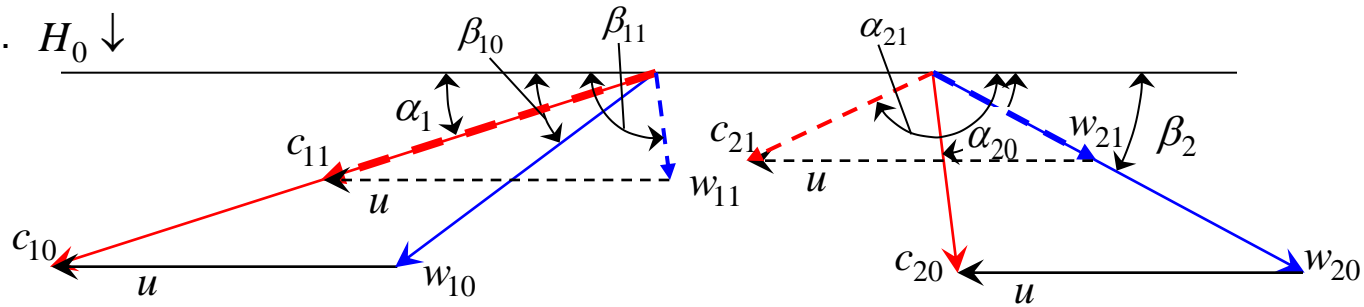
$$\Delta x_\phi = x_{\phi 0} - x_{\phi 1}$$



Б. Изменение экономичности ступени

Полагаем, что в расчетном режиме ступень имеет максимальную экономичность

1. $H_0 \downarrow$



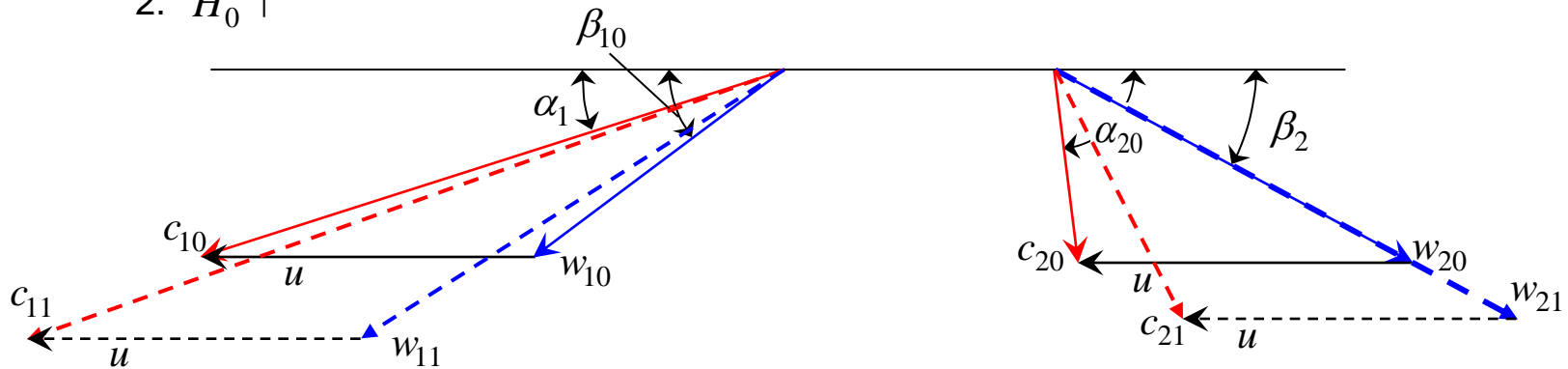
$$\eta_{oi} = 1 - \xi_c - \xi_p - \xi_{ec} - \xi_{mp} - \xi_{ym} - \xi_{el}$$

$$\xi_{ec} = \frac{\Delta H_{ec}}{H_0}$$

$$H_0 \downarrow \begin{cases} \xi_p \uparrow (\psi \downarrow, m.k.\gamma \uparrow) \\ \xi_{ec1} > \xi_{ec0} (\alpha_2 \neq 90^\circ) \end{cases}$$

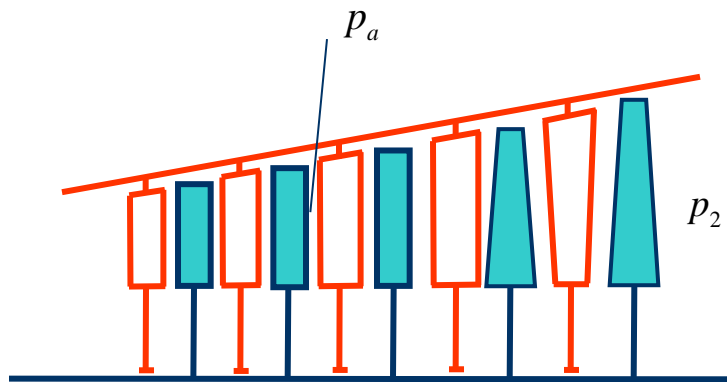
$$\eta_{oi1} < \eta_{oi0}$$

2. $H_0 \uparrow$



6.3. Распределение давлений и теплоперепадов по ступеням турбины при переменном расходе пара

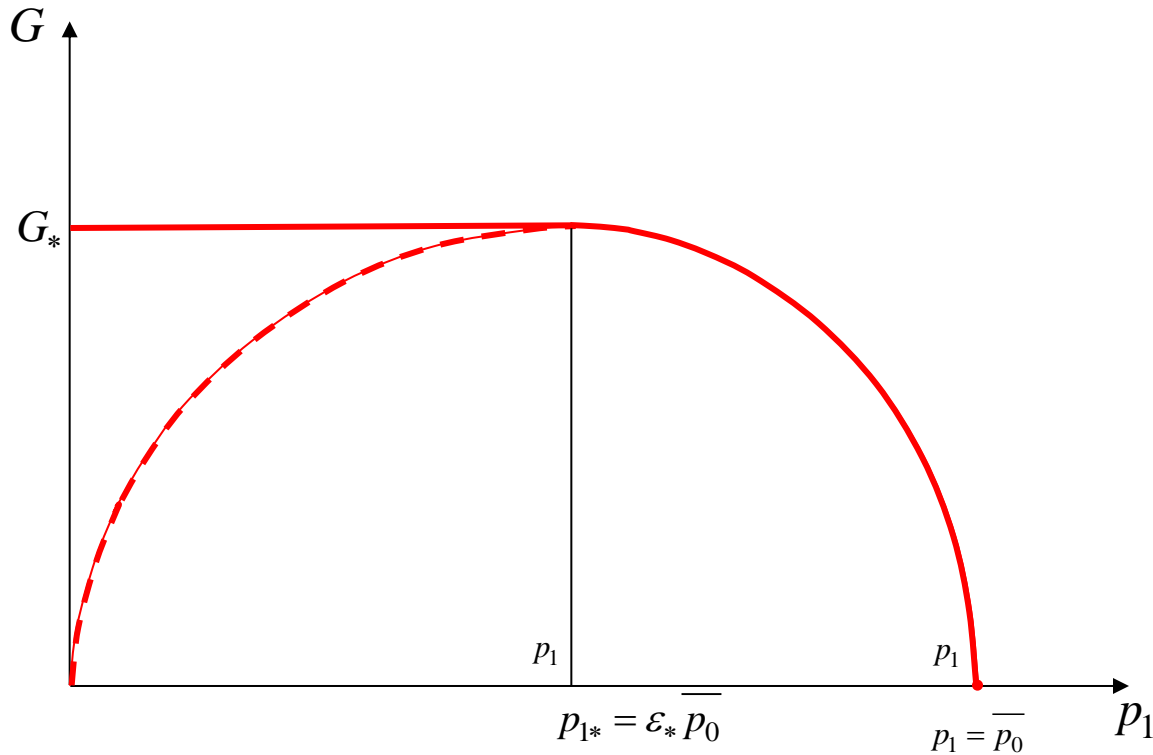
А. Распределение давлений по ступеням турбины



$$P_a = P_2 + \sum \Delta p$$

$\sum \Delta p$ -сумма перепадов давлений в ступенях данной группы. Перепады возникают вследствие сопротивления, создаваемого решетками ступеней при произвольном расходе пара.

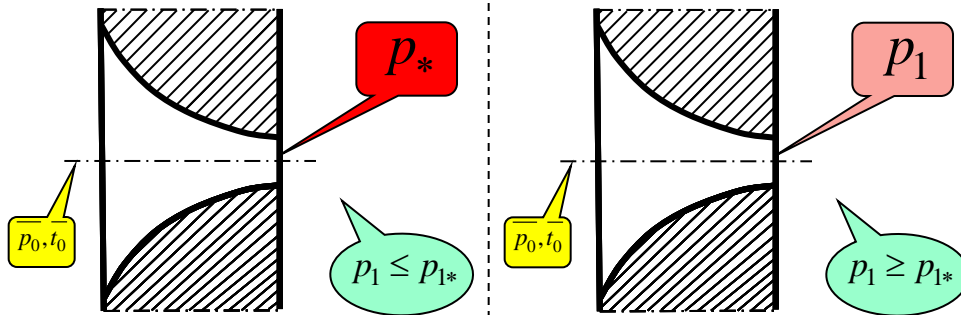
Воспоминание



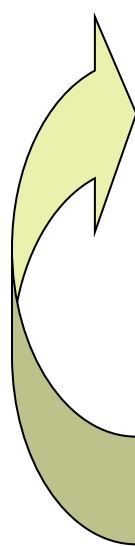
$$G = \frac{Fc}{v}$$

$$c = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{\bar{p}_0 v_0}{\rho_0} \left(1 - \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} \right)}$$

$$\varepsilon = \frac{p_1}{p_0}$$



1. Когда в какой либо степени группы возникает критическая скорость



$$\frac{p_{1*}}{p_0} = \varepsilon_*$$

$$G_* = \frac{F_{\min} c_*}{v_*}$$

$$c_* = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \overline{p_0 v_0} \left(1 - \varepsilon_*^{\frac{k-1}{k}}\right)}$$

$$\varepsilon_* = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$c_* = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \overline{p_0 v_0} \left\{1 - \left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}\right]^{\frac{k-1}{k}}\right\}} = \sqrt{\frac{k}{k-1} \overline{p_0 v_0} \left(1 - \frac{2}{k+1}\right)}$$

$$c_* = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \overline{p_0 v_0}}$$

$$p_* v_*^k = \overline{p_0 v_0}^k \quad v_* = \overline{v_0} \left(\frac{p_*}{\overline{p_0}}\right)^{-\frac{1}{k}} = v_* \varepsilon_*^{-\frac{1}{k}}$$

$$v = \frac{RT}{p}$$

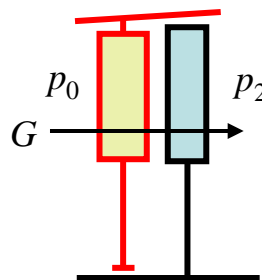
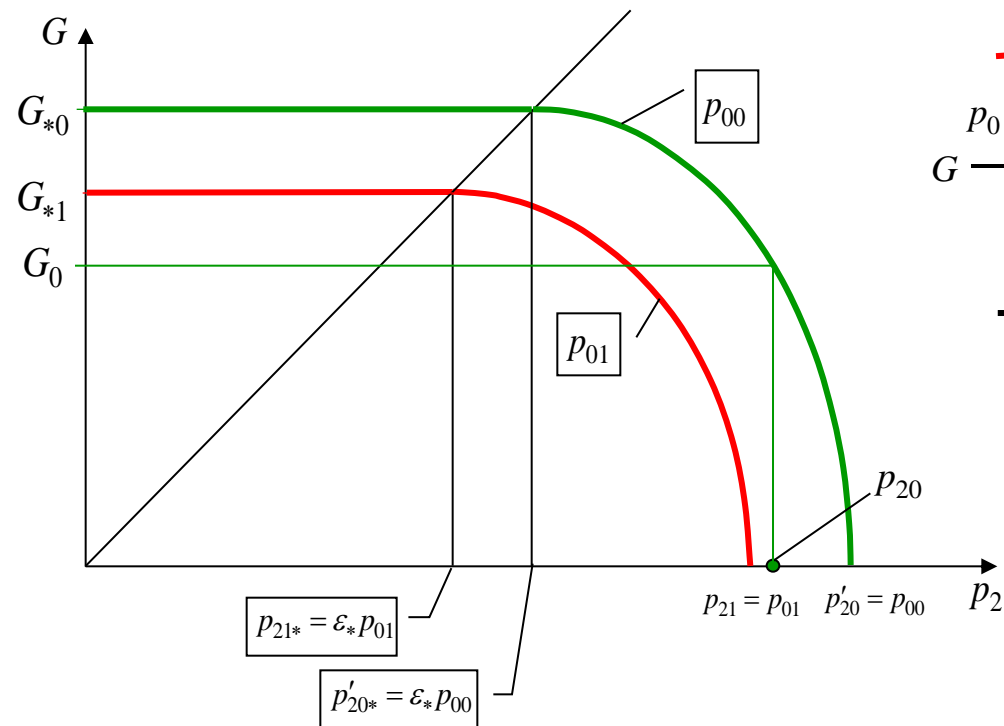
$$\overline{v_0} = \frac{\overline{RT_0}}{p_0}$$

$$G_* = F_{\min} \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{\overline{p_0}}{\overline{v_0}}} = F_{\min} \chi \sqrt{\frac{\overline{p_0}}{\overline{v_0}}} = F_{\min} \chi \overline{p_0} \sqrt{\frac{1}{\overline{RT_0}}} \quad G = A p_0 \sqrt{\frac{1}{T_0}}$$

$$\frac{G}{G_0} = \frac{p_{01}}{p_{00}} \sqrt{\frac{T_{00}}{T_{01}}}$$

2. Когда ни в одной ступени не возникает критическая скорость

Для i -ой ступени связь между расходом и давлениями можно представить:



В общем случае работы ступени

1. Возьмем $p_0 = p_{00}$
Тогда в диапазоне изменения p_2 от $p'_{20} = p_{00}$ до $p'_{20} = p'_{20*}$ расход будет меняться по кривой —
2. Возьмем $p_0 = p_{01}$
Тогда в диапазоне изменения p_2 от $p_{21} = p_{01}$ до $p_{21} = p_{21*}$ расход будет меняться по кривой —

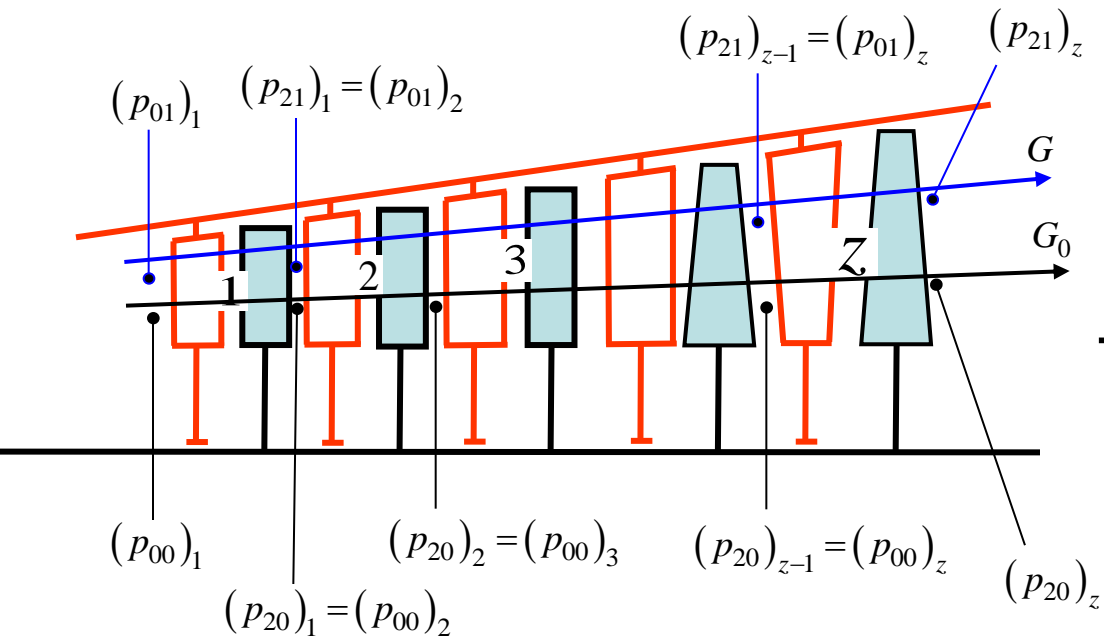
Для ступени конкретной турбины.

В «расчетном» режиме $p_0 = p_{00}$, $p_2 = p_{20}$, расход будет G_0 .

Если аппроксимировать кривые дугой эллипса, провести некоторые преобразования и взять отношение текущего значения расхода к «расчетному», то может быть получена следующая формула:

$$\left(\frac{G}{G_0}\right)^2 \left[(p_{00})_i^2 - (p_{20})_i^2 \right] = (p_{01})_i^2 - (p_{21})_i^2 \quad *$$

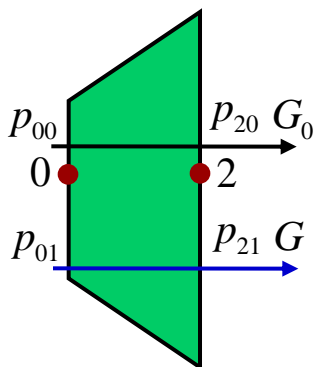
Рассмотрим группу ступеней, через которую проходит одинаковый расход



$$+ \left\{ \begin{aligned} &\left(\frac{G}{G_0}\right)^2 \left[(p_{00})_1^2 - (p_{20})_1^2 \right] = (p_{01})_1^2 - (p_{21})_1^2 \\ &\left(\frac{G}{G_0}\right)^2 \left[(p_{00})_2^2 - (p_{20})_2^2 \right] = (p_{01})_2^2 - (p_{21})_2^2 \\ &\left(\frac{G}{G_0}\right)^2 \left[(p_{00})_3^2 - (p_{20})_3^2 \right] = (p_{01})_3^2 - (p_{21})_3^2 \\ &\dots \\ &\left(\frac{G}{G_0}\right)^2 \left[(p_{00})_z^2 - (p_{20})_z^2 \right] = (p_{01})_z^2 - (p_{21})_z^2 \end{aligned} \right.$$

$$\left(\frac{G}{G_0}\right)^2 \left[(p_{00})_1^2 - (p_{20})_z^2 \right] = (p_{01})_1^2 - (p_{21})_z^2$$

Имеем отсек ступеней



$$\frac{G}{G_0} = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{21}^2}{p_{00}^2 - p_{20}^2}} \sqrt{\frac{T_{00}}{T_{01}}}$$

**Формула
Стадолы-Флюгеля**

Замечания по применению формулы Стадолы-Флюгеля

- В качестве «расчетного» режима может быть принят любой режим, при котором известны соответствующие значения p_0 , p_2 , G .
- Формула применима для группы ступеней с неизменным расходом и неизменным гидравлическим сопротивлением.
- Применение формулы для одной ступени приводит к довольно большим погрешностям расчета.

$$\frac{G}{G_0} = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{21}^2}{p_{00}^2 - p_{20}^2}}$$

Для конденсационной турбины:

$$\frac{G}{G_0} = \sqrt{\frac{(p_{01})_j^2 - p_{\kappa 1}^2}{(p_{00})_j^2 - p_{\kappa 0}^2}}$$

j – номер ступени.

$(p_{\kappa 1} = p_{\kappa 0} = p_{\kappa} = (0,0035-0,005) \text{ МПа})$

$p_{\kappa}^2 \ll (p_0^2)_j$

(В широком диапазоне нагрузок, но не всегда. (?))

Тогда:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{(p_{01})_j}{(p_{00})_j}$$

$$(p_{01})_j = (p_{00})_j \frac{G}{G_0}$$

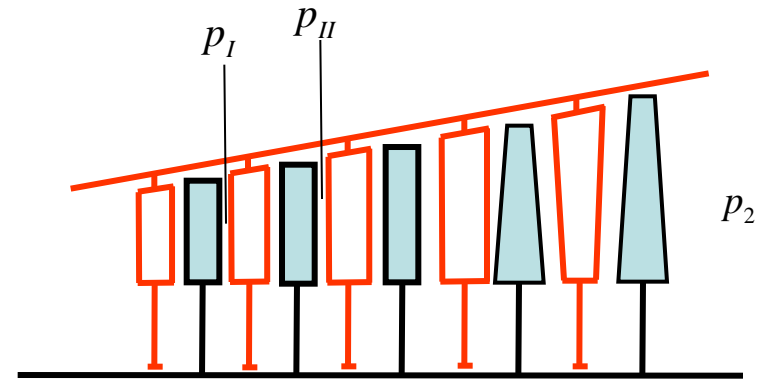
Б. Распределение теплоперепадов по ступеням турбины

$$H_{0I} = \frac{k}{k-1} p_I v_I \left[1 - \left(\frac{p_{II}}{p_I} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{k}{k-1} RT_I \left[1 - \left(\frac{p_{II}}{p_I} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

1. Когда давления в ступенях изменяются пропорционально расходу

$$p_I = q p_{I0}; \quad p_{II} = q p_{II0};$$

$$H_{0I} = \frac{k}{k-1} RT_I \left[1 - \left(\frac{p_{II0}}{p_{I0}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = C p_I v_I$$



2. Когда давления в ступенях изменяются не пропорционально расходу

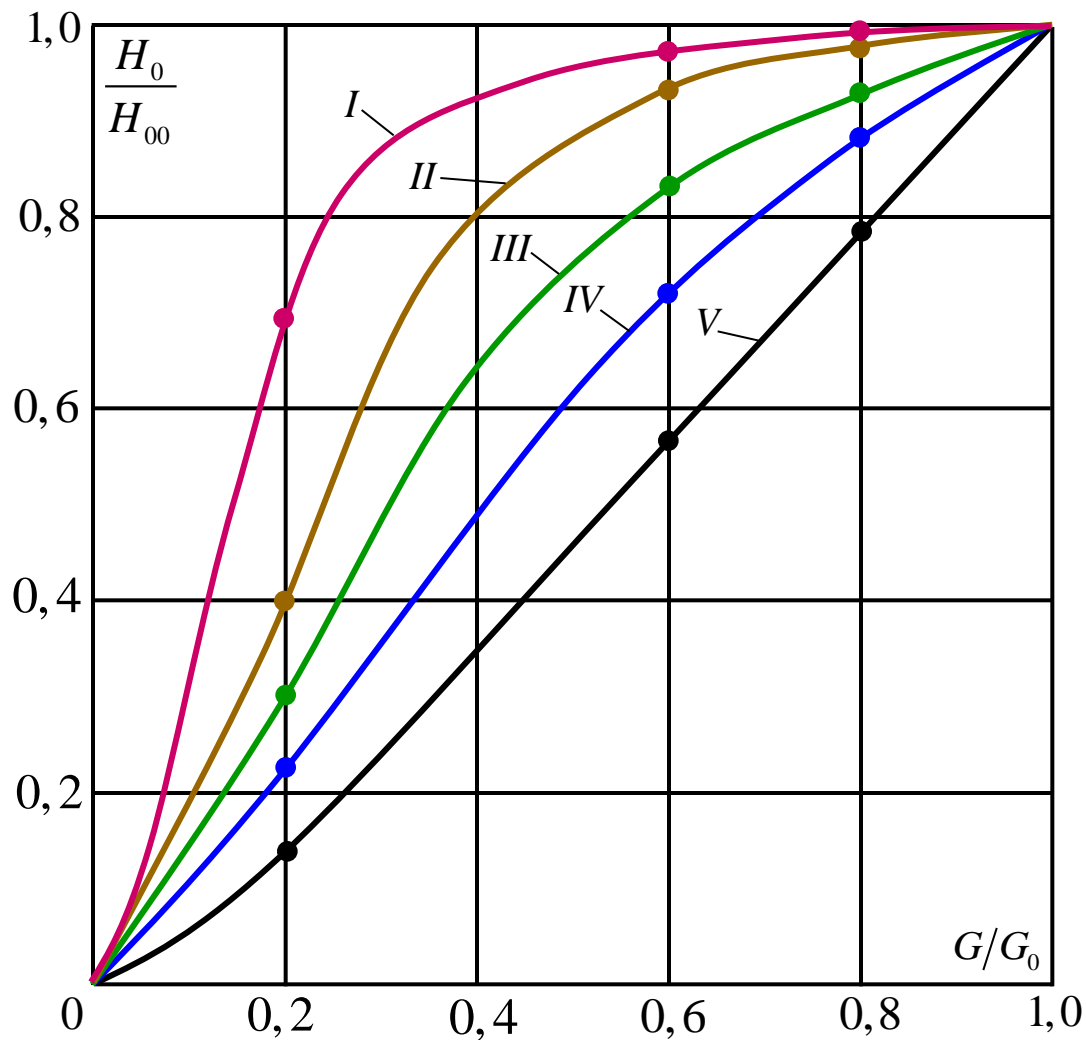
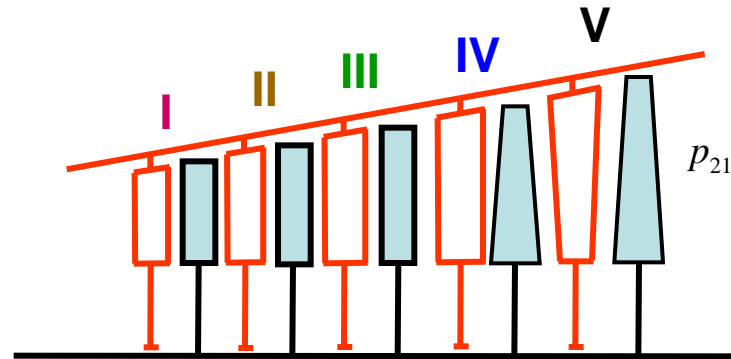
$$p_I^2 = q^2 (p_{I0}^2 - p_{02}^2) + p_{21}^2$$

$$p_{II}^2 = q^2 (p_{II0}^2 - p_{02}^2) + p_{21}^2$$

$$\left(\frac{p_{II}}{p_I} \right)^2 = \frac{q^2 (p_{II0}^2 - p_{02}^2) + p_{21}^2}{q^2 (p_{I0}^2 - p_{02}^2) + p_{21}^2}$$

$$\left(\frac{p_{II}}{p_I} \right)^2 = \frac{q^2 p_{II0}^2 + p_{21}^2}{q^2 p_{I0}^2 + p_{21}^2}$$

$$H_{0j} = \frac{k}{k-1} RT_I \left[1 - \left(\frac{q^2 (p_{II0}^2)_j + p_{21}^2}{q^2 (p_{I0}^2)_j + p_{21}^2} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]$$



При полном расходе пара, т.е. при G_0 , теплоперепады всех ступеней равны между собой.

Ну и что?

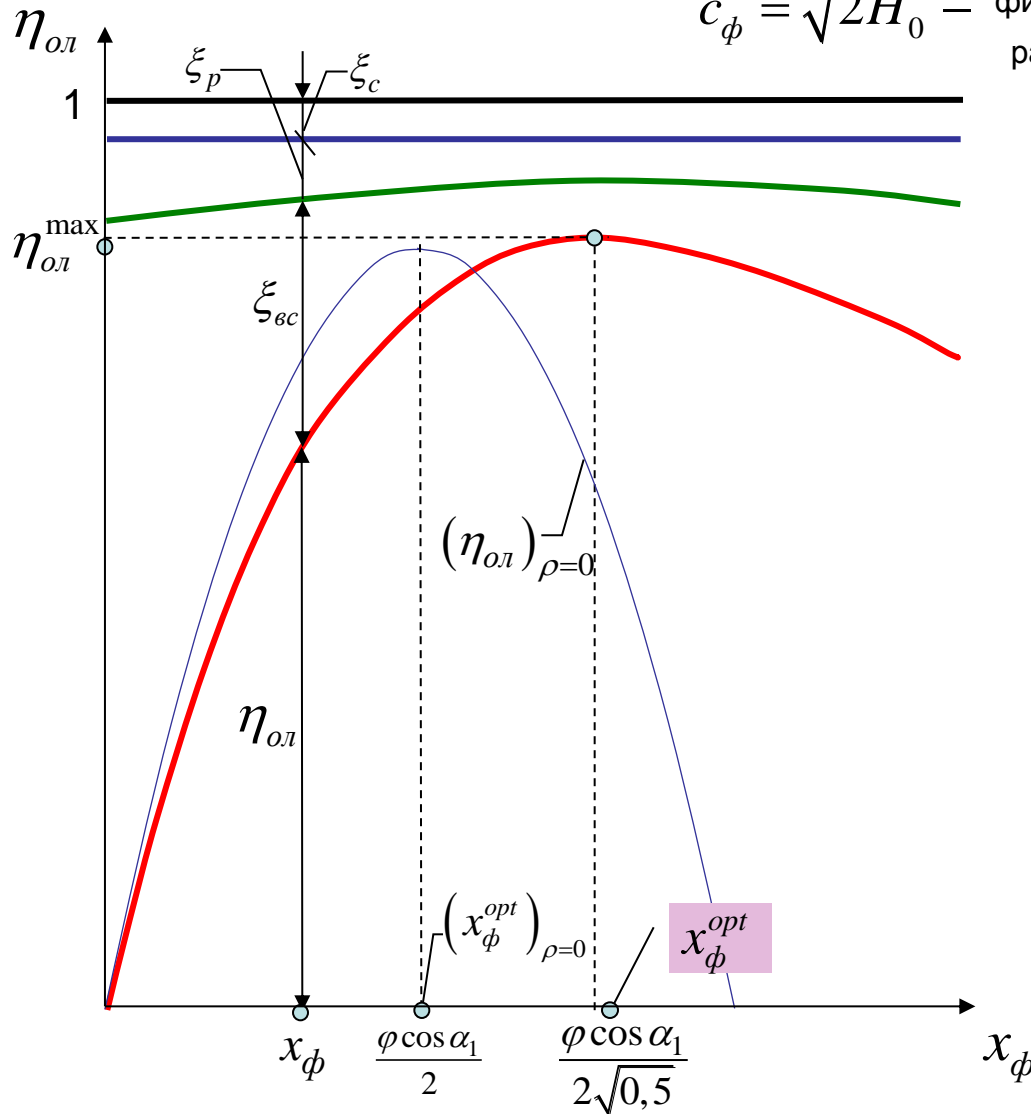
Экономичность ступени

$$x_\phi = \frac{u}{c_\phi}$$

- безразмерное отношение скоростей

$$c_\phi = \sqrt{2H_0} \text{ — фиктивная скорость в ступени, эквивалентная располагаемой энергии на ступень}$$

$$u = \pi d n \text{ — Окружная скорость ступени}$$



и т.д.

Изменение степени реактивности

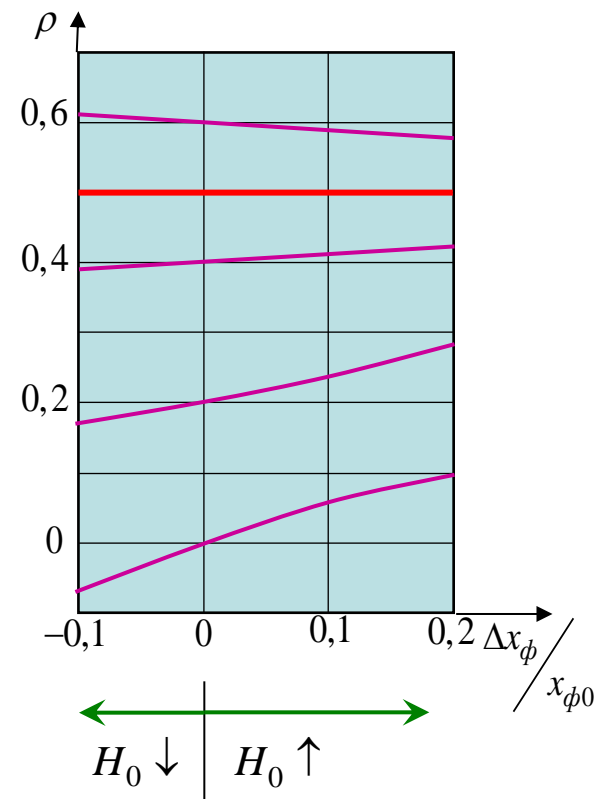
$u = const.$ Изменение $H_0 \implies$ изменится $c_\phi \implies x_\phi = \frac{u}{c_\phi}$
 $\langle H_0 \uparrow \implies c_\phi \uparrow \implies x_\phi \downarrow \rangle$ $\langle H_0 \downarrow \implies c_\phi \downarrow \implies x_\phi \uparrow \rangle$

Аналитически и экспериментально получено, что при

$$-0,1 > \frac{\Delta x_\phi}{x_{\phi 0}} > -0,2$$

$$\frac{\Delta \rho}{1 - \rho_0} = (0,5 - \rho_0) \frac{\Delta x_\phi}{x_{\phi 0}}$$

$$\Delta x_\phi = x_{\phi 0} - x_{\phi 1}$$



6.4. Тепловой процесс турбины при переменном пропуске пара и различных системах парораспределения

- Дроссельная система парораспределения.
- Сопловая система парораспределения.
- Обводная система парораспределения.
- Комбинированное парораспределение.
- Регулирование мощности **скользящим давлением.**

6.4.1. Дроссельная система парораспределения

7.1.1. Основные понятия дроссельной системы парораспределения

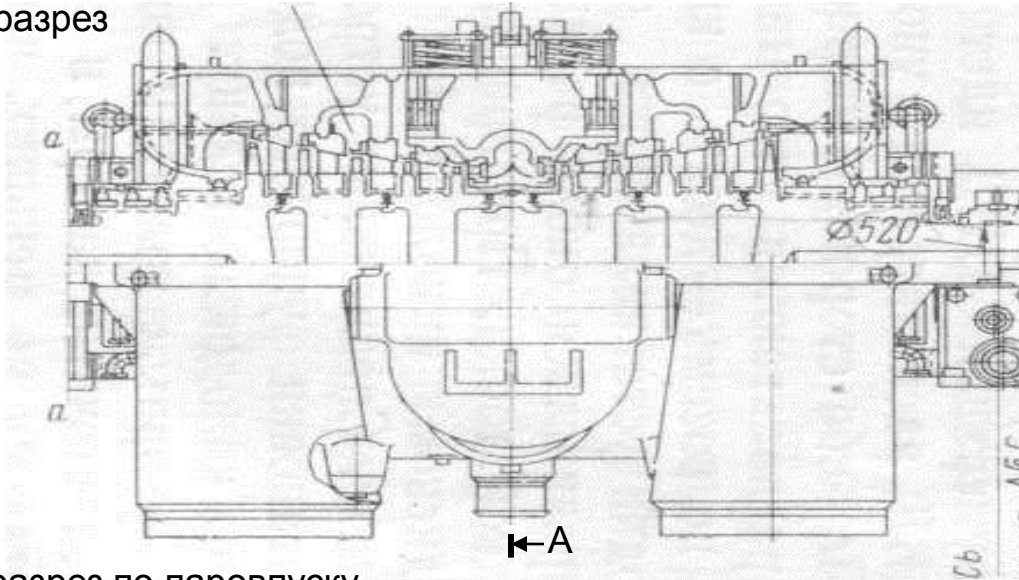
Если все количество пара, подводимого к турбине, регулируется одним или несколькими клапанами, после которых пар направляется к общей сопловой группе, то такая система называется **дроссельным парораспределением**.

При дроссельной системе парораспределения при частичных нагрузках дросселированию подвергается весь поток пара

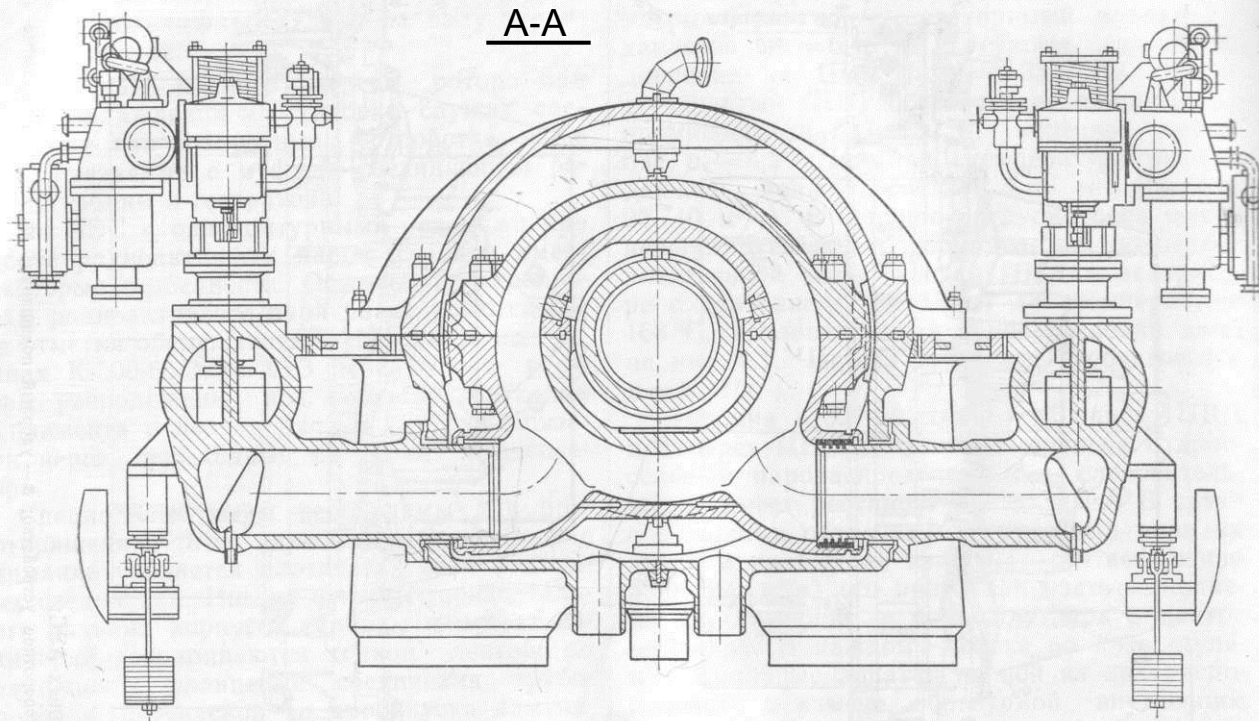
ЦВД турбины К-500-65/3000 ХТЗ

←А

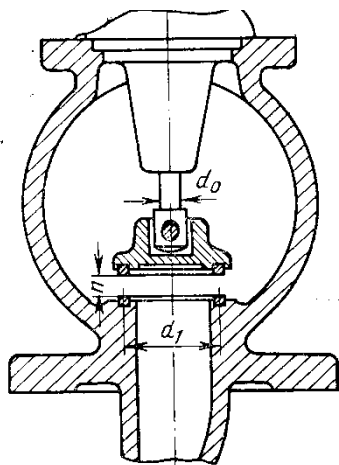
А. Продольный разрез



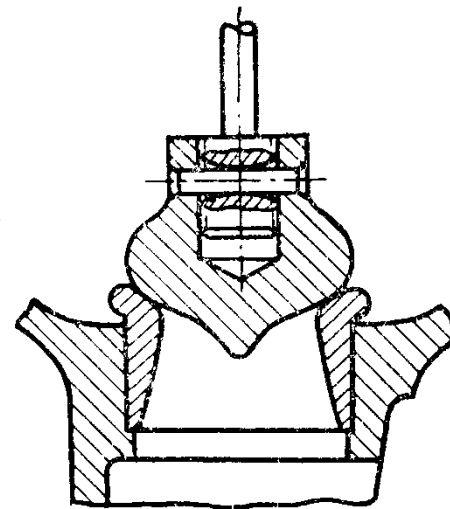
Б. Поперечный разрез по паровпуску



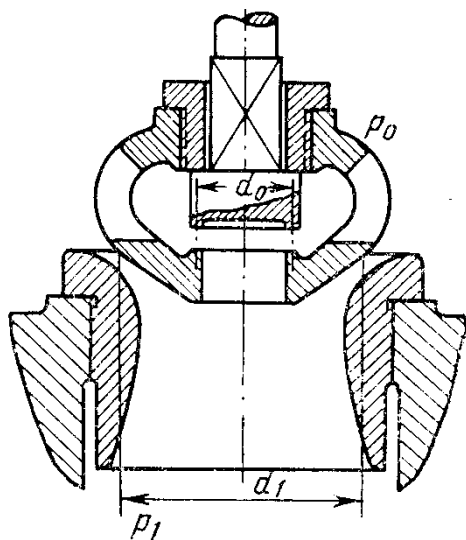
Регулирующие клапаны (РК)



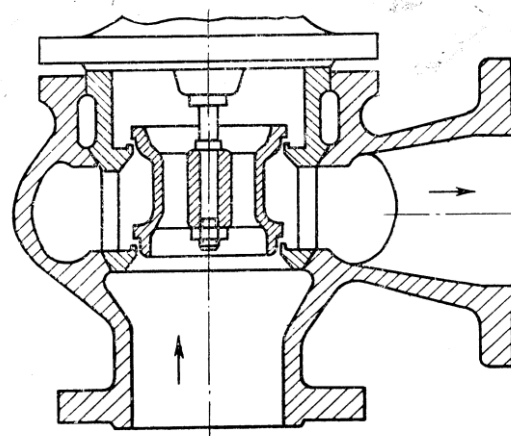
а) односедельный РК



б) обтекаемый односедельный РК с коническим диффузором

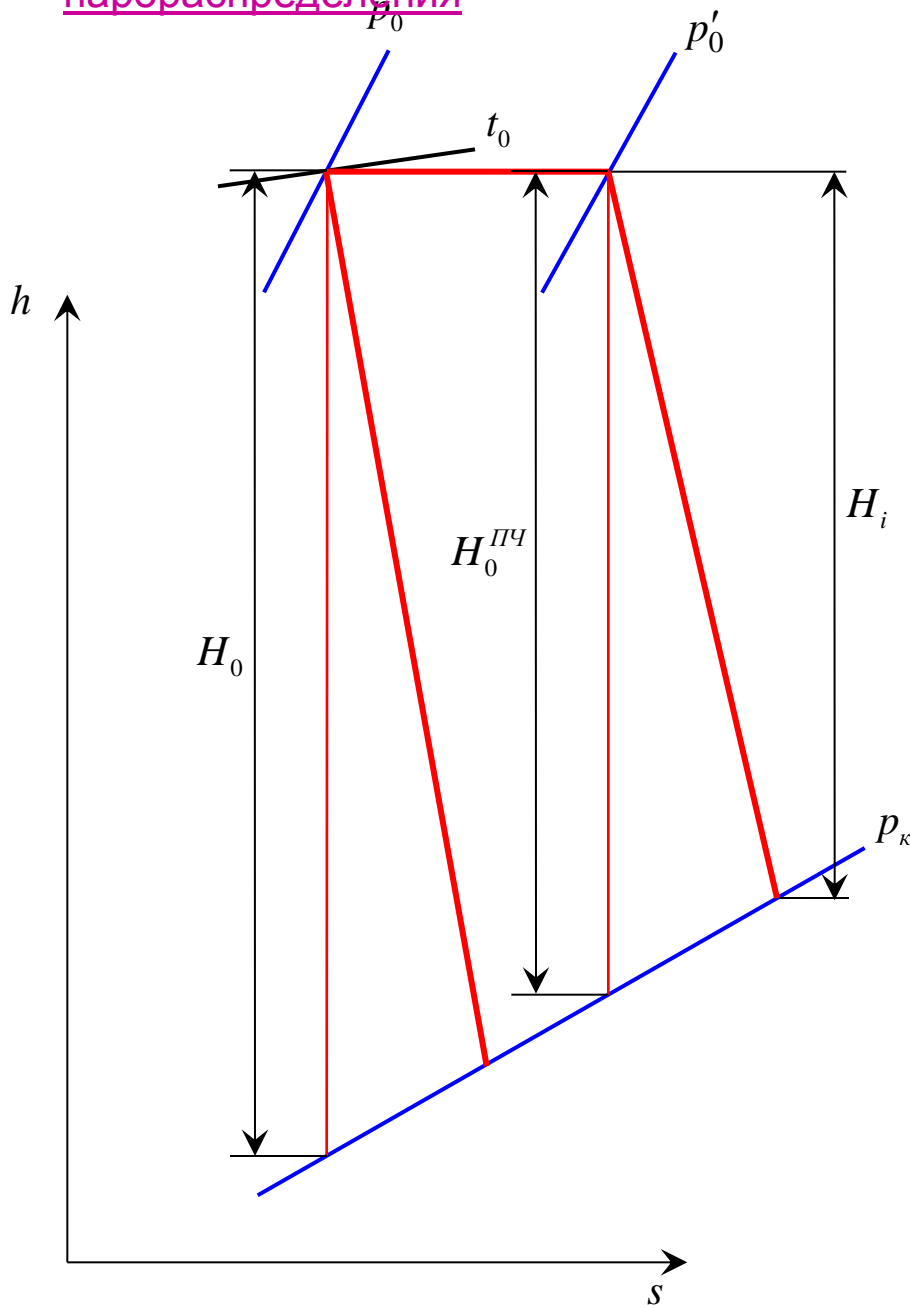


в) РК с разгрузкой



г) двухседельный РК

7.1.2. Тепловой процесс в турбине и его эффективность при дроссельной системе парораспределения



$$\eta_{oi}^T = \frac{H_i}{H_0} \frac{H_0^{\text{ПЧ}}}{H_0^{\text{ПЧ}}} = \frac{H_0^{\text{ПЧ}} H_i}{H_0 H_0^{\text{ПЧ}}}$$

$$\frac{H_i}{H_0^{\text{ПЧ}}} = \eta_{oi}^{\text{ПЧ}}$$

$$\frac{H_0^{\text{ПЧ}}}{H_0} = \gamma \quad \text{- коэффициент дросселирования}$$

$$\eta_{oi}^T = \gamma \eta_{oi}^{\text{ПЧ}}$$

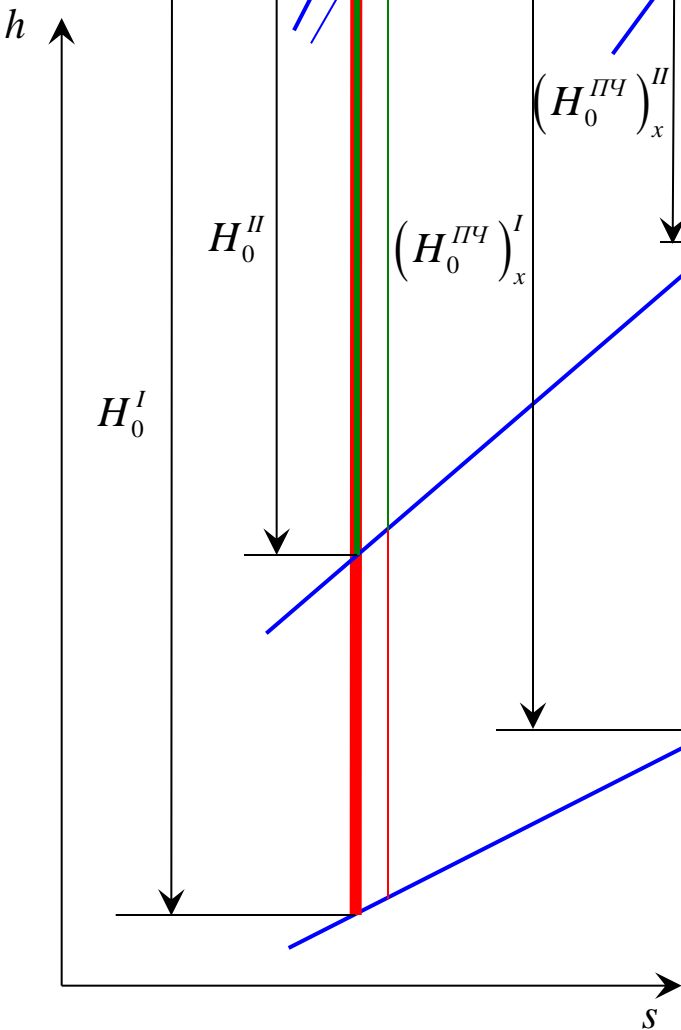
Откуда берется p'_0 ?

$$p'_0 = \sqrt{\frac{G_0}{G_{00}} (p_0^2 - p_{k0}^2) + p_k^2}$$

Для конденсационной турбины:

$$p'_0 = p_0 \frac{G_0}{G_{00}}$$

Коэффициент дросселирования не зависит от качества проточной части, а определяется только относительным расходом пара через турбину и его параметрами.



$$p'_0 = \sqrt{q^2 (p_0^2 - p_{k0}^2) - p_k^2} \quad (p'_0 = p_0 q)$$

$$q = 1 \quad \gamma^I = \gamma^{II} = 1$$

$$p_k^{III} = 1,6 \text{ MPa}$$

$$q = 0,8$$

$$(p'_0)^I = \sqrt{0,8^2 (13^2 - 0,004^2) - 0,004^2} = 10,399.. \quad (10,4)$$

$$(p'_0)^{II} = \sqrt{0,8^2 (13^2 - 0,2^2) - 0,2^2} = 10,397 \quad (p'_0)^{III} = 10,22$$

$$q = 0,6$$

$$(p'_0)^I = 7,799$$

$$(p'_0)^{II} = 7,796$$

$$(7,8)$$

$$(p'_0)^{III} = 7,6$$

$$q = 0,4$$

$$(p'_0)^I = 5,199$$

$$(p'_0)^{II} = 5,196$$

$$(5,2)$$

$$(p'_0)^{III} = 4,94$$

$$q = 0,2$$

$$p_k^I = 4 \text{ kPa}$$

$$(p'_0)^I = 2,599$$

$$(p'_0)^{II} = 2,590$$

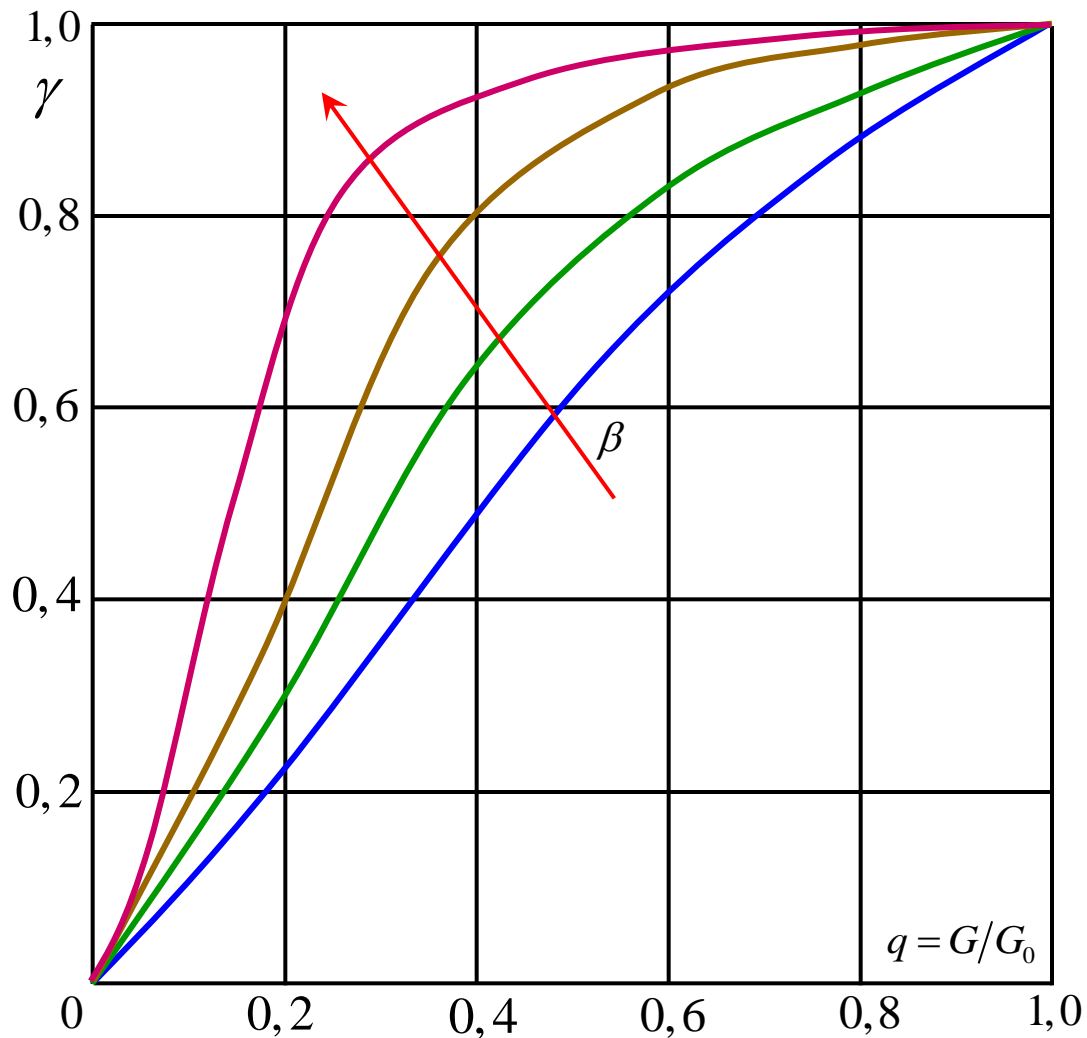
$$(2,6)$$

$$(p'_0)^{III} = 2,1$$

Возьмем $(p'_0)_x$

$(H_0^{II})_x^II$ уменьшилось более интенсивно, чем $(H_0^{II})_x^I$

$$\gamma^I > \gamma^{II}$$

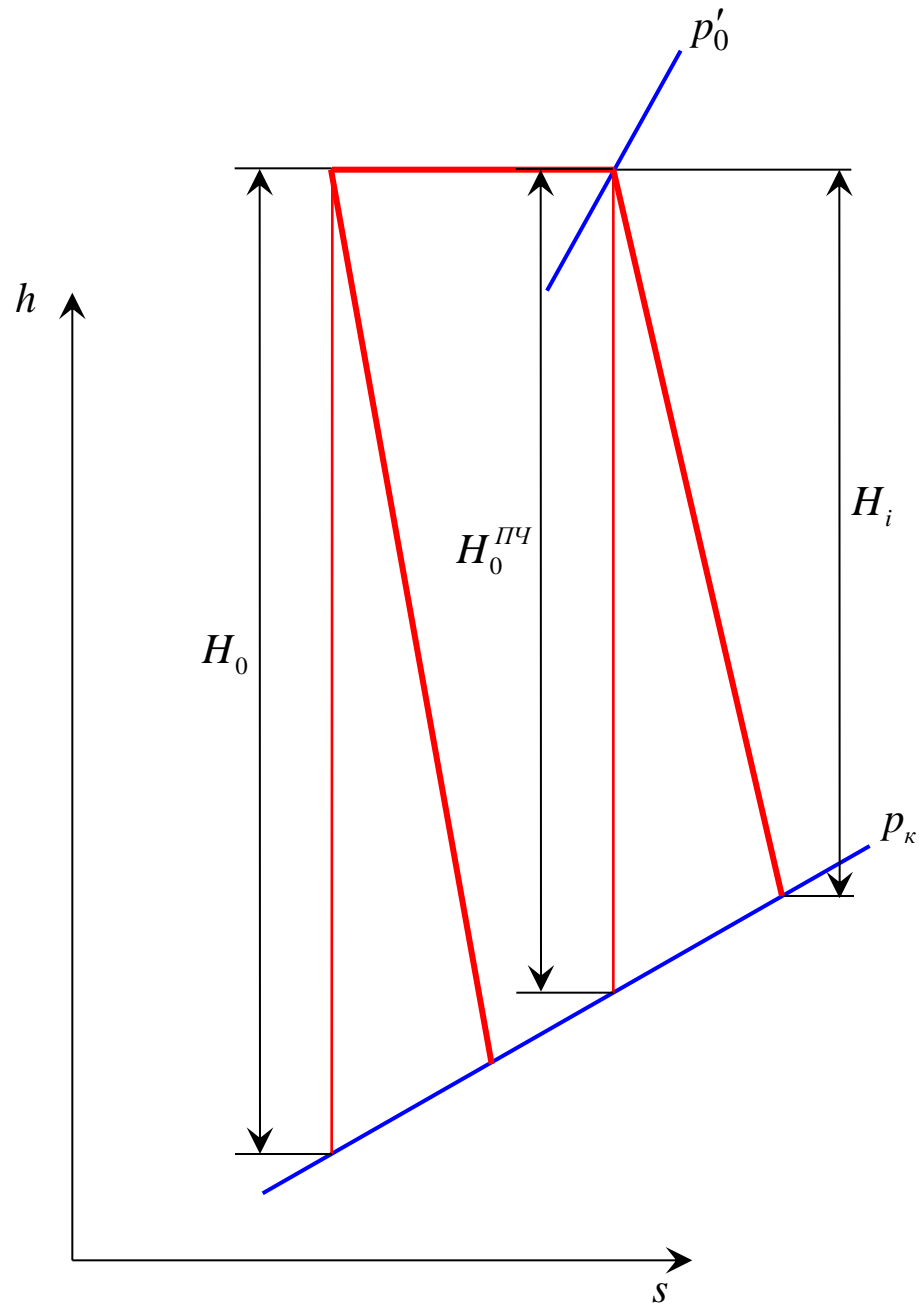


$$\beta = \frac{P_0}{P_K}$$

Чем меньше отношение давлений на турбину, тем больше будет потеря располагаемой энергии за счет дросселирования при переменном режиме работы

Что в этом плохого?

7.1.3. Мощность турбины при дроссельном парораспределении



$$N_{\text{э}} = GH_0 \gamma \eta_{oi}^{nu} \eta_m \eta_{\text{эз}}$$