

6. Работа турбины при переменном режиме

В теории турбин под **переменным режимом** понимается стационарная работа турбины с мощностью и/или начальными и конечными параметрами отличающимися от расчетных.

*Переход из одного стационарного состояния в другой называется **переходным режимом**.*

Задачи анализа (расчета) переменного режима работы турбины:

- а)** определение показателей тепловой экономичности турбины при режимах, отличных от расчетных;
- б)** определение параметров пара в узловых точках турбины (до и после промежуточного перегрева, в отборах турбины и т.п.);
- в)** анализ влияния различных факторов на работу турбины в переменном режиме (например, влияние переменного режима на термические расширения, на прочностные характеристики и т.д.)

Отдельное место в ряду переменных режимов занимают режимы **пуска** и **останова** турбогенератора.

6.1. Детальный расчет проточной части турбины на переменный режим

А. Расчет одной ступени на переменный режим

Известно (!): геометрические размеры ступени

$$d_1, d_2, l_1, l_2, \alpha_1, \beta_2, \dots \quad (\alpha_0, \beta_1, b_c, b_p)$$

Сложность №1

Задано:

(как вариант)

расход пара через ступень G

конечное состояние пара $p_2, t_2 (x_2)$

частота вращения n

Может быть задано другое сочетание параметров, характеризующих переменный режим (достаточное, но **не избыточное (!)**). Однако в любом случае мы придём к расчету от конечного состояния.

Сложность №2

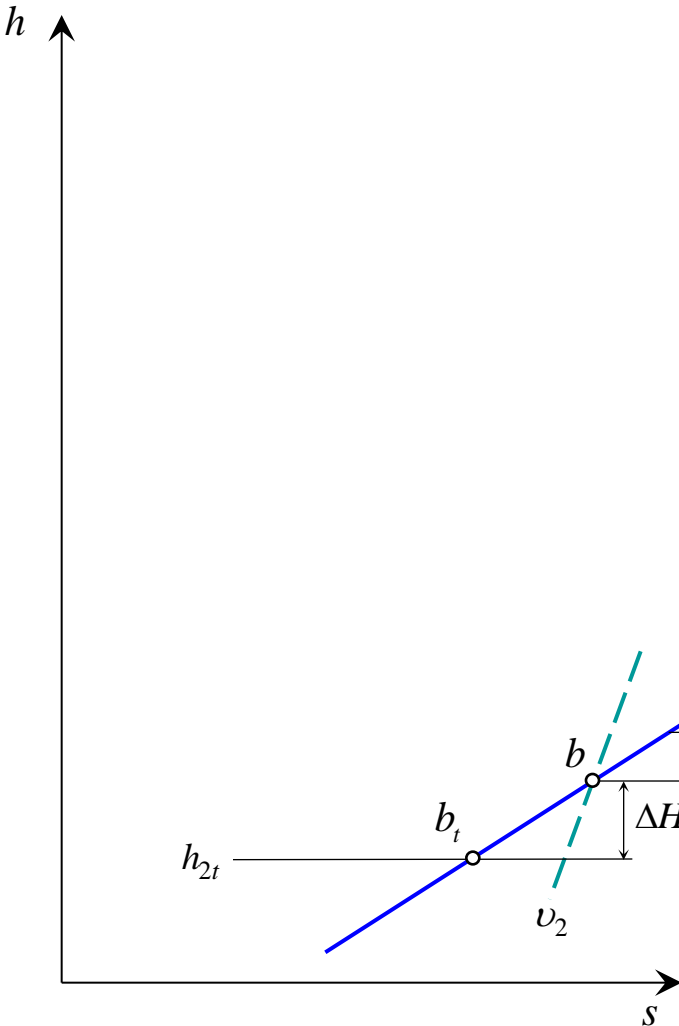
* Рассматриваем дозвуковые течения в решетках

Берем точку a по $p_2, t_2 (x_2)$

Оцениваем $\Delta H_{mp}, \Delta H_{ym}$ *

Принимаем $\widetilde{\Delta H}_{ec}$

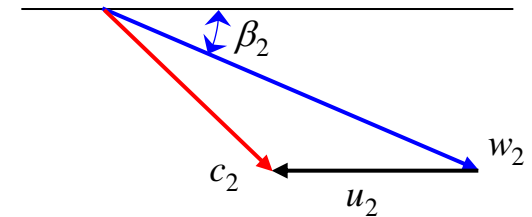
т. b – окончание действительного процесса расширения на рабочих лопатках.



$$\varepsilon_{\Delta H_{ec}} > 0,01$$

$$w_2 = \frac{Gv_2}{F_2} = \frac{Gv_2}{\pi d_2 l_2 \sin \beta_2}$$

$$u_2 = \pi d_2 n$$



$$c_2^2 = w_2^2 + u_2^2 - 2w_2u_2 \cos \beta_2$$

$$\Delta H_{ec} = \frac{c_2^2}{2}$$

$$\varepsilon_{\Delta H_{ec}} = \left| \frac{\Delta H_{ec} - \widetilde{\Delta H}_{ec}}{\Delta H_{ec}} \right|$$

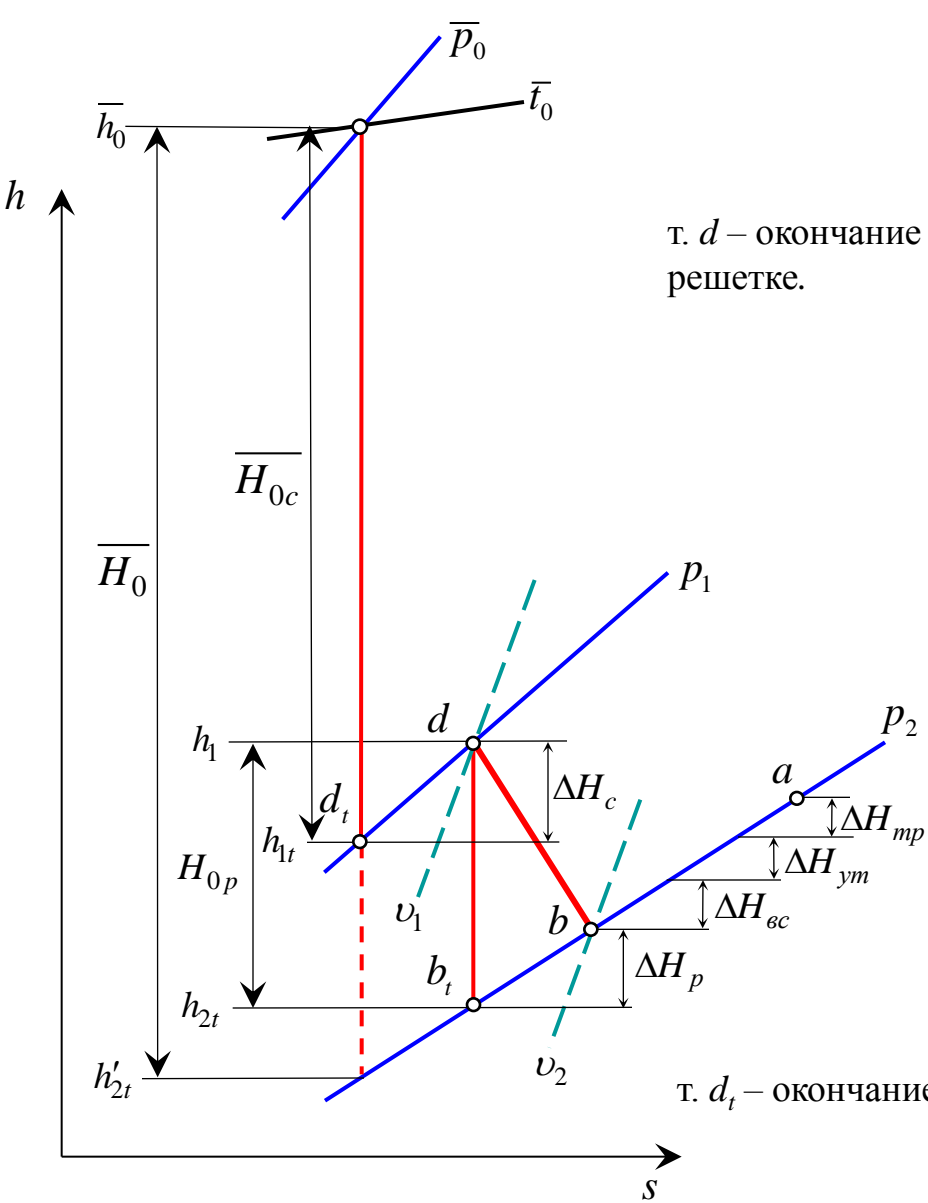
$$\varepsilon_{\Delta H_{ec}} \leq 0,01$$



$$\Delta H_p = \frac{w_{2t}^2 - w_2^2}{2} = \frac{w_2^2}{2} \left(\frac{1}{\psi^2} - 1 \right)$$

$$w_{2t} = \frac{w_2}{\psi}$$

т. b – окончание теоретического процесса расширения на рабочих лопатках.



т. d – окончание действительного процесса расширения в сопловой решетке.

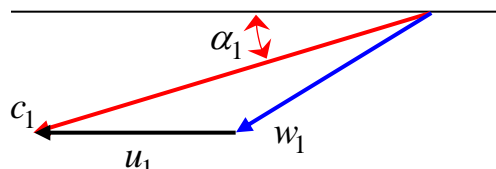
т. d_t – окончание теоретического процесса расширения в сопловой решетке.

Принимаем \tilde{w}_1

$$H_{0p} = \frac{w_{2t}^2 - \tilde{w}_1^2}{2}$$

$\varepsilon_{w_1} > 0,01$

$$c_1 = \frac{Gv_1}{F_1} = \frac{Gv_1}{\pi d_1 l_1 \sin \alpha_1}$$



$$w_1^2 = c_1^2 + u_1^2 - 2c_1 u_1 \cos \alpha_1$$

$$\varepsilon_{w_1} = \left| \frac{w_1 - \tilde{w}_1}{w_1} \right|$$

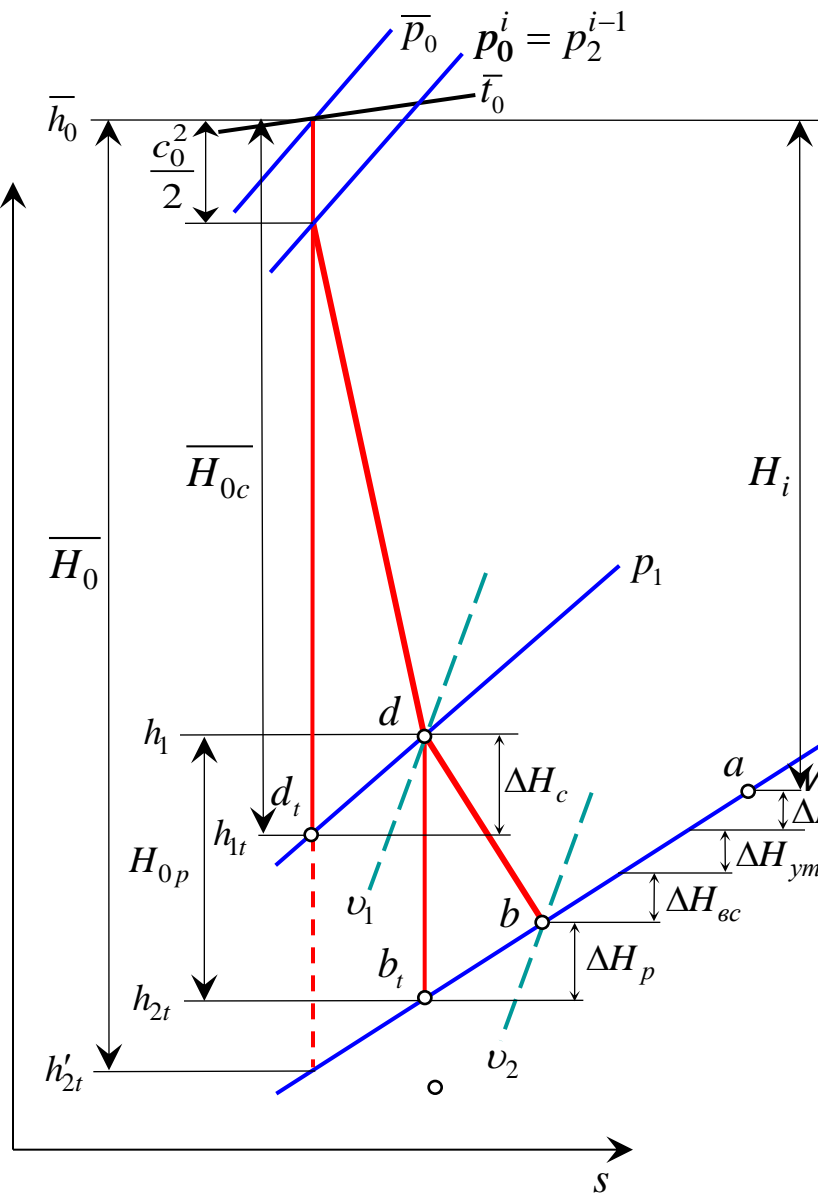
$\varepsilon_{w_1} \leq 0,01$



$$c_{1t} = \frac{c_1}{\varphi}$$

$$\Delta H_c = \frac{c_{1t}^2 - c_1^2}{2}$$

$$\overline{H_{0c}} = \frac{c_{1t}^2}{2}$$



$$\Delta H_{mp} = \Phi_1(x_\phi)^3; \quad \Delta H_{ym} = \Phi_2(x_\phi)^n;$$

$$x_\phi = \frac{u}{\sqrt{2H_0}}$$

$$\varepsilon_{\Delta H_{mp}} = \left| \frac{\Delta H_{mp} - \widetilde{\Delta H}_{mp}}{\Delta H_{mp}} \right|$$

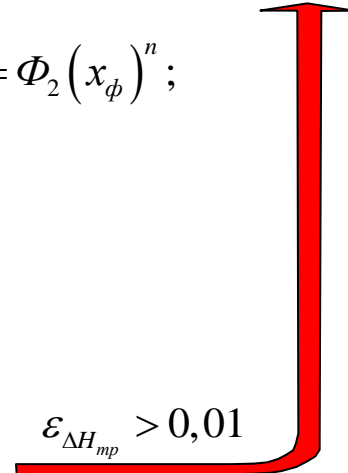
$$\varepsilon_{\Delta H_{ym}} = \left| \frac{\Delta H_{ym} - \widetilde{\Delta H}_{ym}}{\Delta H_{ym}} \right|$$

$$\varepsilon_{\Delta H_{mp}} > 0,01$$

$$\text{и/или } \varepsilon_{\Delta H_{ym}} > 0,01$$

$$\eta_{oi} = \frac{H_i}{H_0}$$

Ha *



Б. Расчет многоступенчатой турбины на переменный режим

Расчетный режим: расход пара через турбину G_{00}

Определить процесс расширения при другом расходе, например $G_{01} < G_{00}$

При этом p_0, t_0, p_k остались прежними.

Дроссельная система парораспределения.

Выводы:

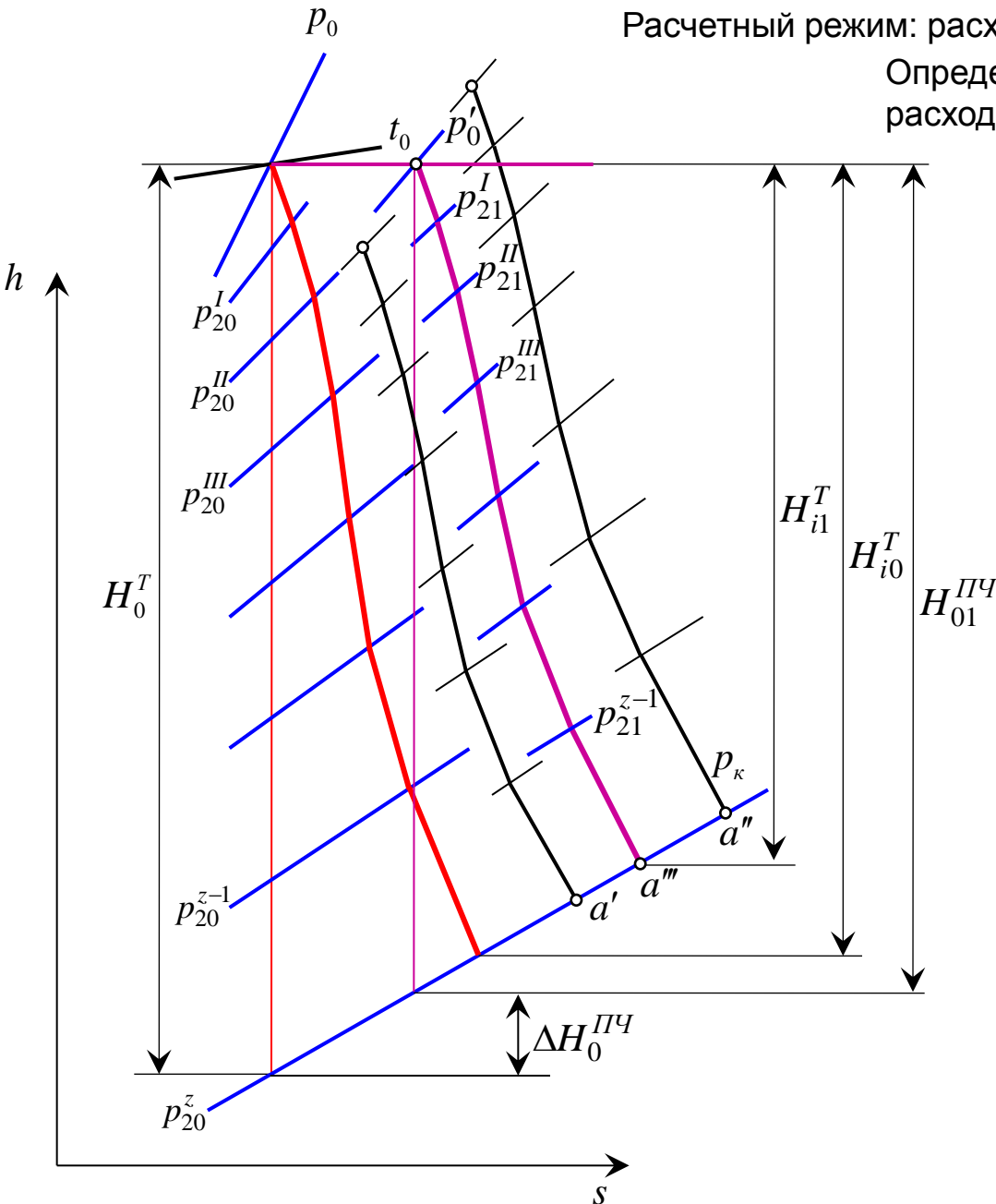
$$1. \quad \eta_{oi1} = \frac{H_{i1}^T}{H_0^T} \quad \eta_{oi0} = \frac{H_{i0}^T}{H_0^T}$$

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

2. Изменился располагаемый теплоперепад на нерегулируемые ступени.

$$\Delta H_0^{ПЧ} = \Delta H_0^I + \Delta H_0^{II} + \dots + \Delta H_0^z$$

3. В новом режиме произошло изменение давлений по проточной части турбины



6.2. Анализ работы ступени при изменении теплоперепада

А. Изменение степени реактивности

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

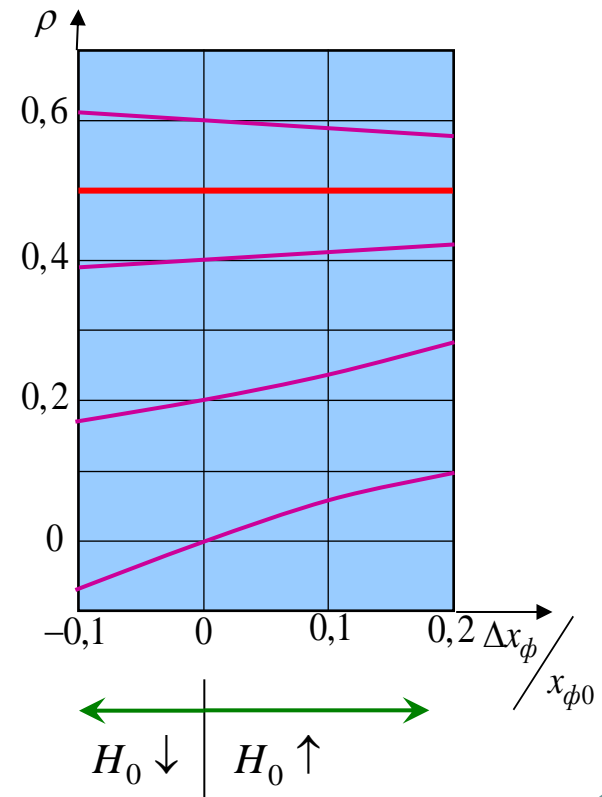
$\langle H_0 \uparrow \implies c_\phi \uparrow \implies x_\phi \downarrow \rangle$ $\langle H_0 \downarrow \implies c_\phi \downarrow \implies x_\phi \uparrow \rangle$

Аналитически и экспериментально получено, что при

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

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

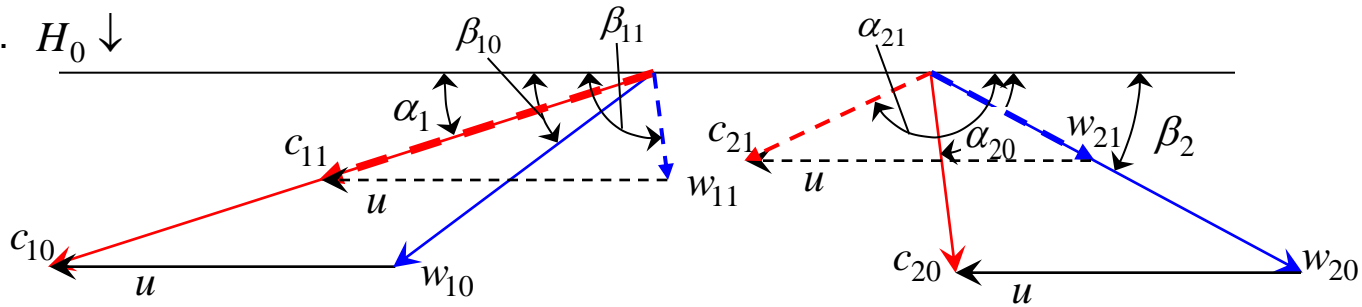
$$\Delta x_\phi = x_{\phi 0} - x_{\phi 1}$$



Б. Изменение экономичности ступени

Полагаем, что в расчетном режиме ступень имеет максимальную экономичность

1. $H_0 \downarrow$



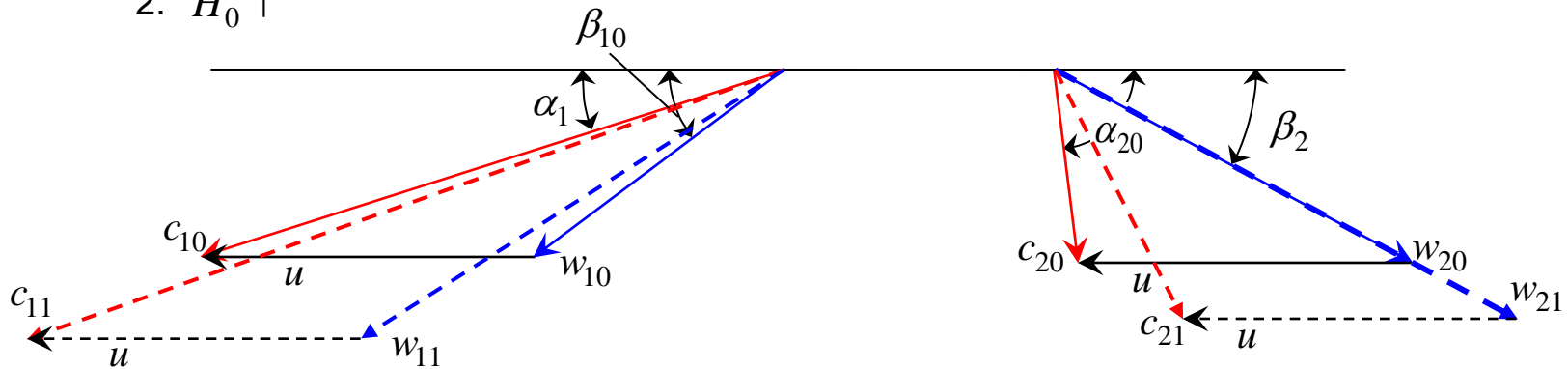
$$\eta_{oi} = 1 - \xi_c - \xi_p - \xi_{ec} - \xi_{mp} - \xi_{ym} - \xi_{el}$$

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

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

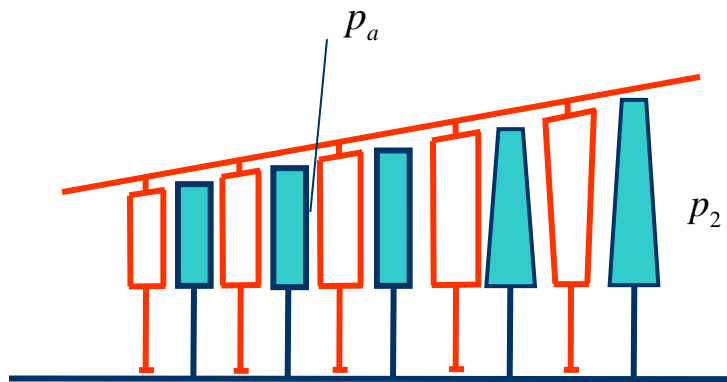
$$\eta_{oi1} < \eta_{oi0}$$

2. $H_0 \uparrow$



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

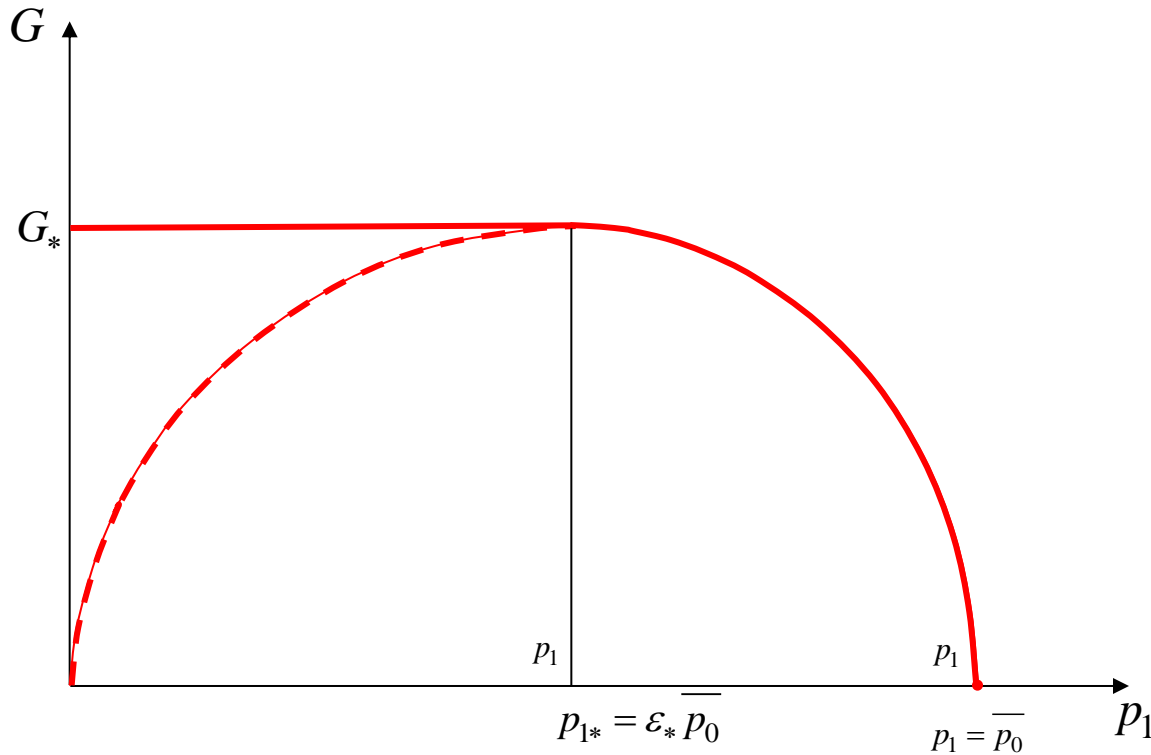
А. Распределение давлений по ступеням турбины



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

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

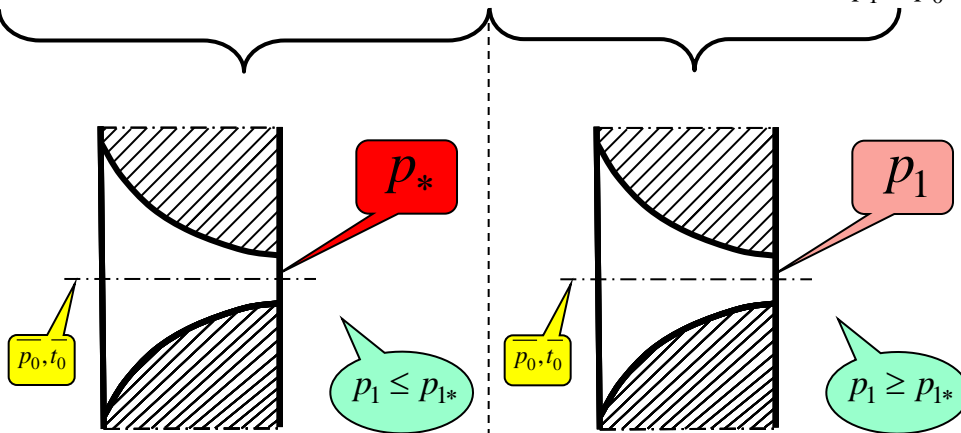
Воспоминание



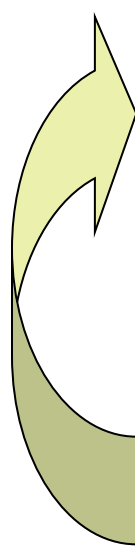
$$G = \frac{Fc}{v}$$

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

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



1. Когда в какой либо степени группы возникает критическая скорость



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

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

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

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

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

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

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

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

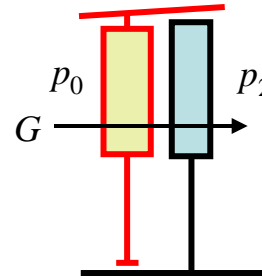
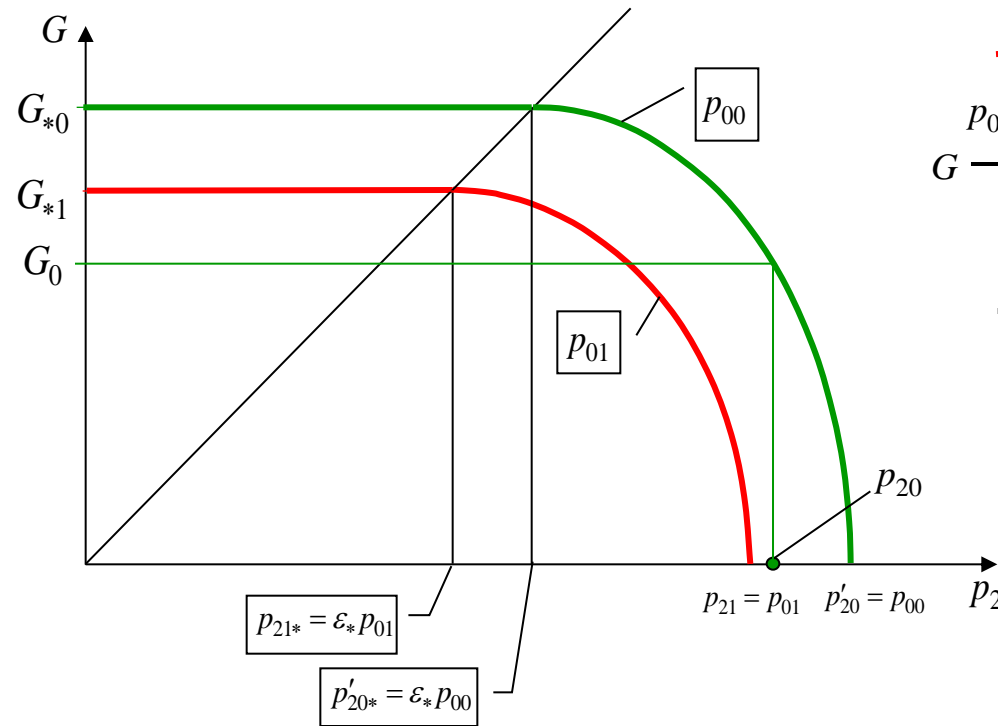
$$\overline{v_0} = \frac{\overline{RT_0}}{p_0}$$

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

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

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 —

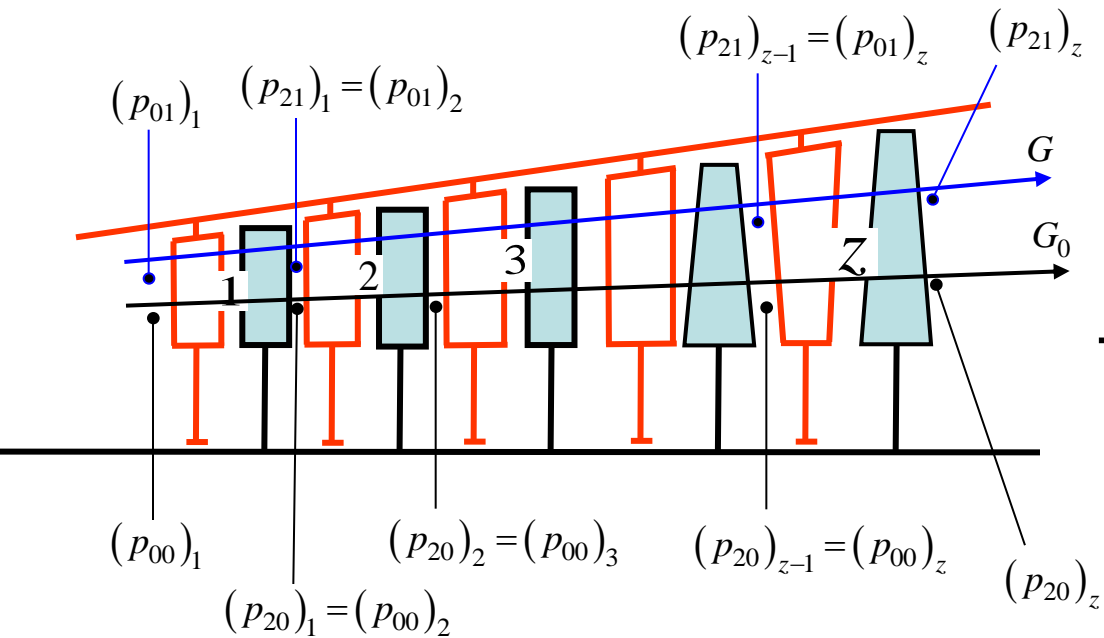
Для ступени конкретной турбины.

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:

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

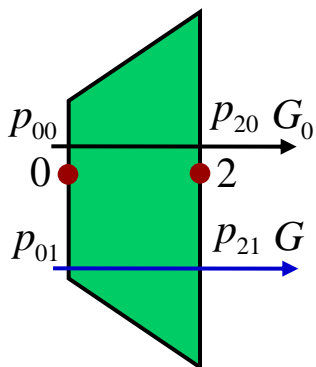
Рассмотрим группу ступеней, через которую проходит одинаковый расход



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

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

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:

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

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

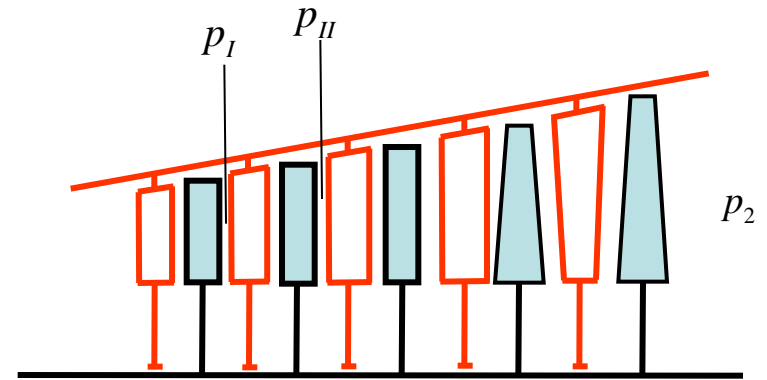
Б. Распределение теплоперепадов по ступеням турбины

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

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

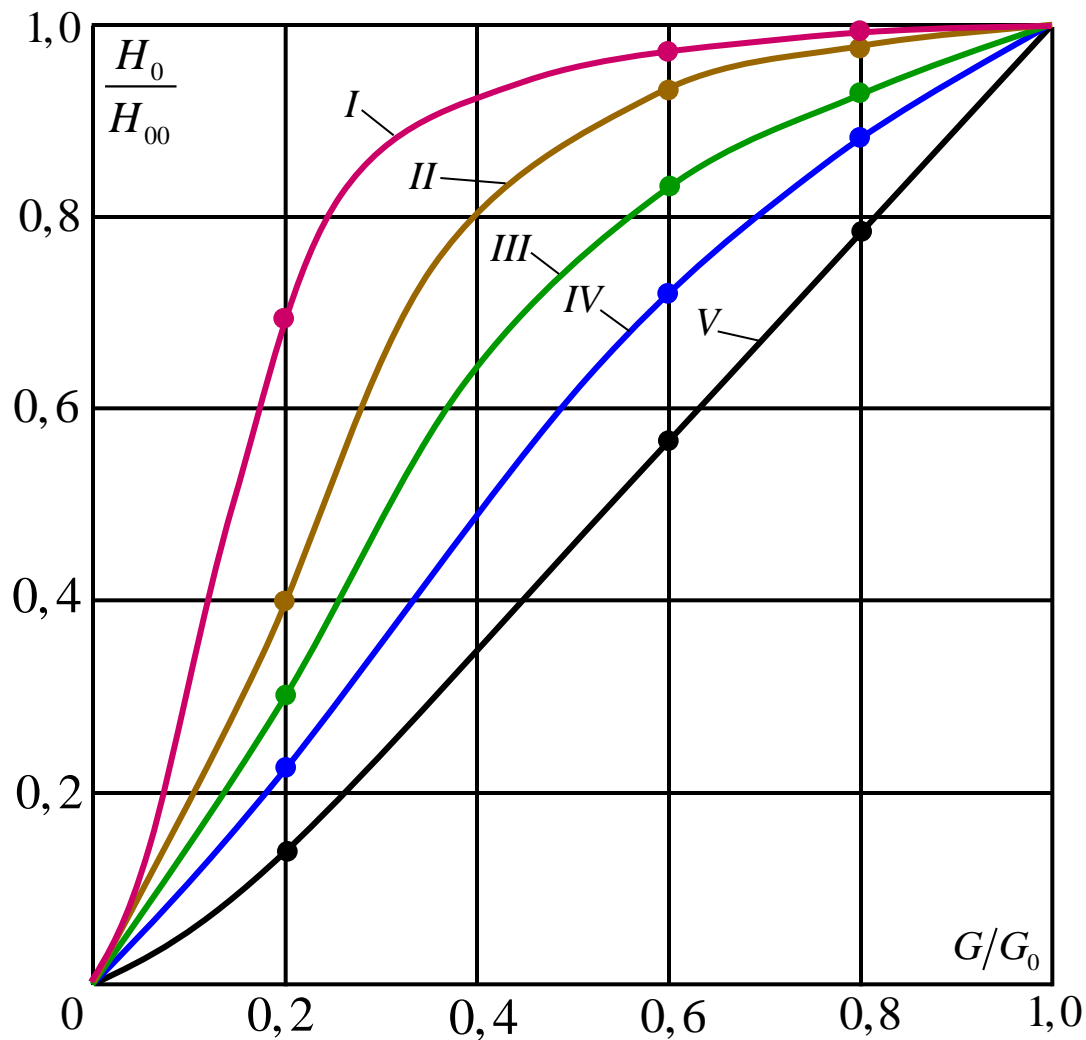
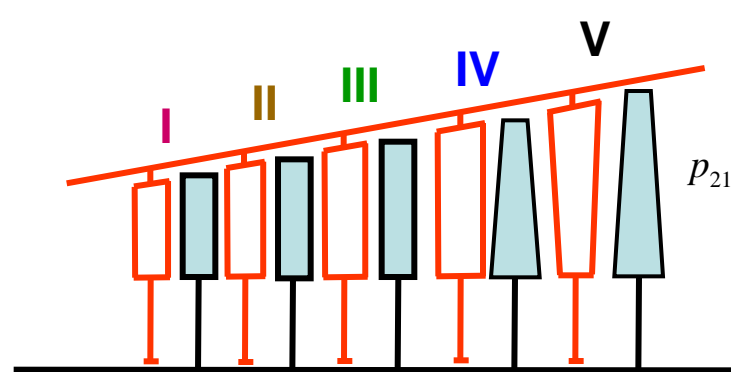
$$p_I^2 = q^2 (p_{I0}^2 - p_{02}^2) + p_{21}^2$$

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

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

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

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



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

Ну и что?

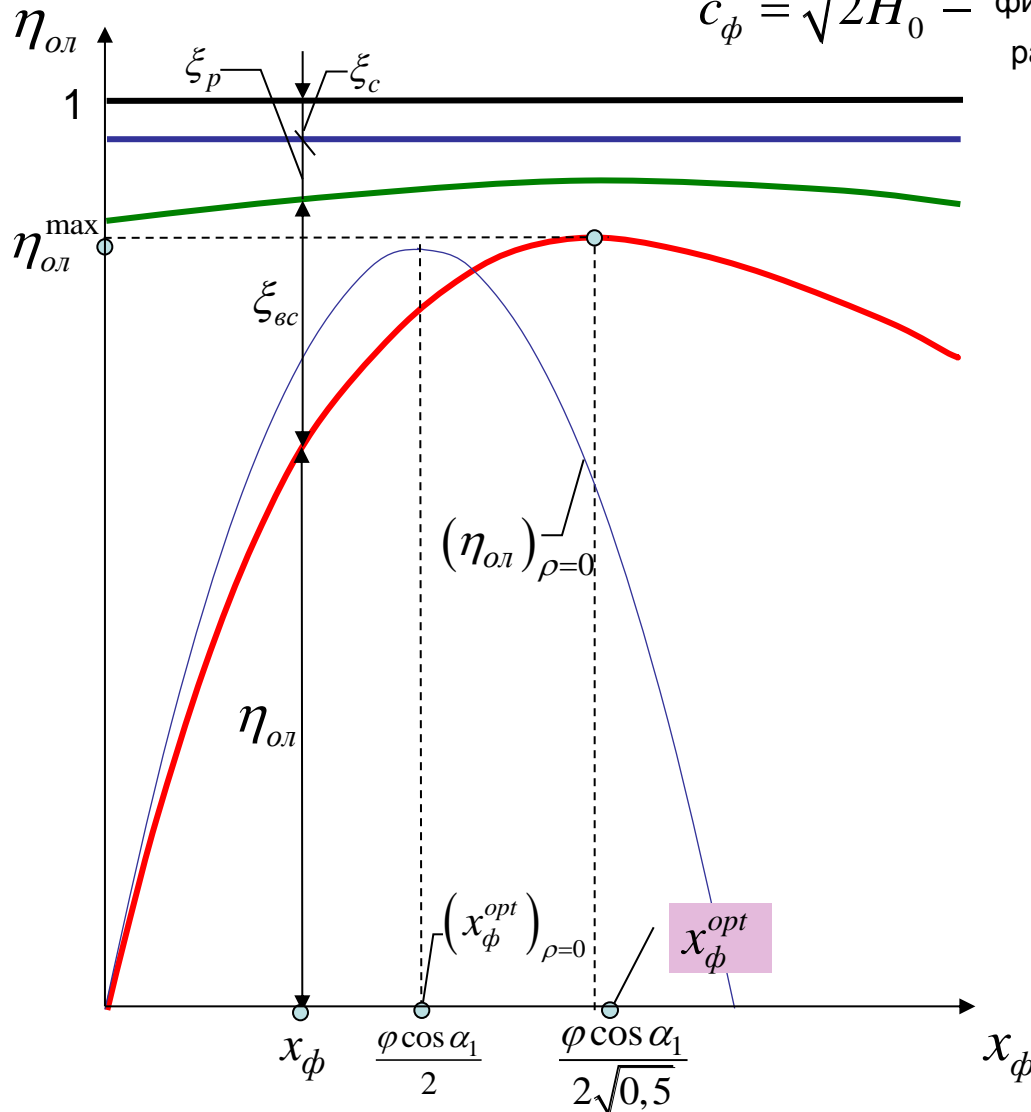
Экономичность ступени

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

- 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

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

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

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

