

В зависимости от реактивности ступени подразделяют на (*деление очень условное*):

$\rho = 0,1 \div 0,3$ – активные ступени;

$\rho = 0,4 \div 0,7$ – реактивные ступени;

Для теории турбинных ступеней важно определить классификацию ступеней:

- 1) $\rho = 0$ – чисто активная ступень (*абстракция*);
- 2) $\rho = 0,5$ – реактивная ступень (*реально существующие ступени*);
- 3) $\rho > 0$.

При расчете ступени задается реактивность ρ .

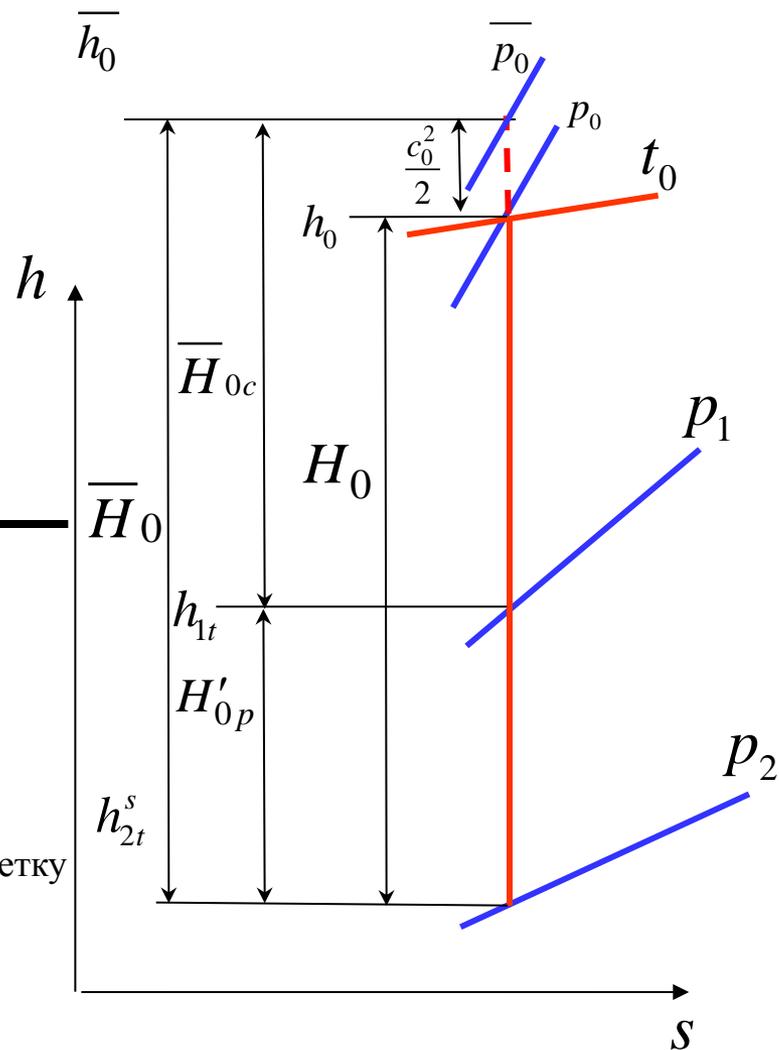
Если задано p_0 , t_0 , c_0 и p_2 .

- 1) Определяем теплоперепад на турбинную ступень по статическим параметрам H_0 .
- 2) Определяем параметры торможения.
- 3) Определяем располагаемую энергию на ступень.
- 4) Определяем располагаемую теплоперепад на сопловую решетку по параметрам торможения:

$$\bar{H}_{0c} = (1 - \rho) \bar{H}_0$$

4) Определяем давление в зазоре между сопловыми и рабочими лопатками и энтальпию окончания теоретического процесса расширения в сопловых лопатках.

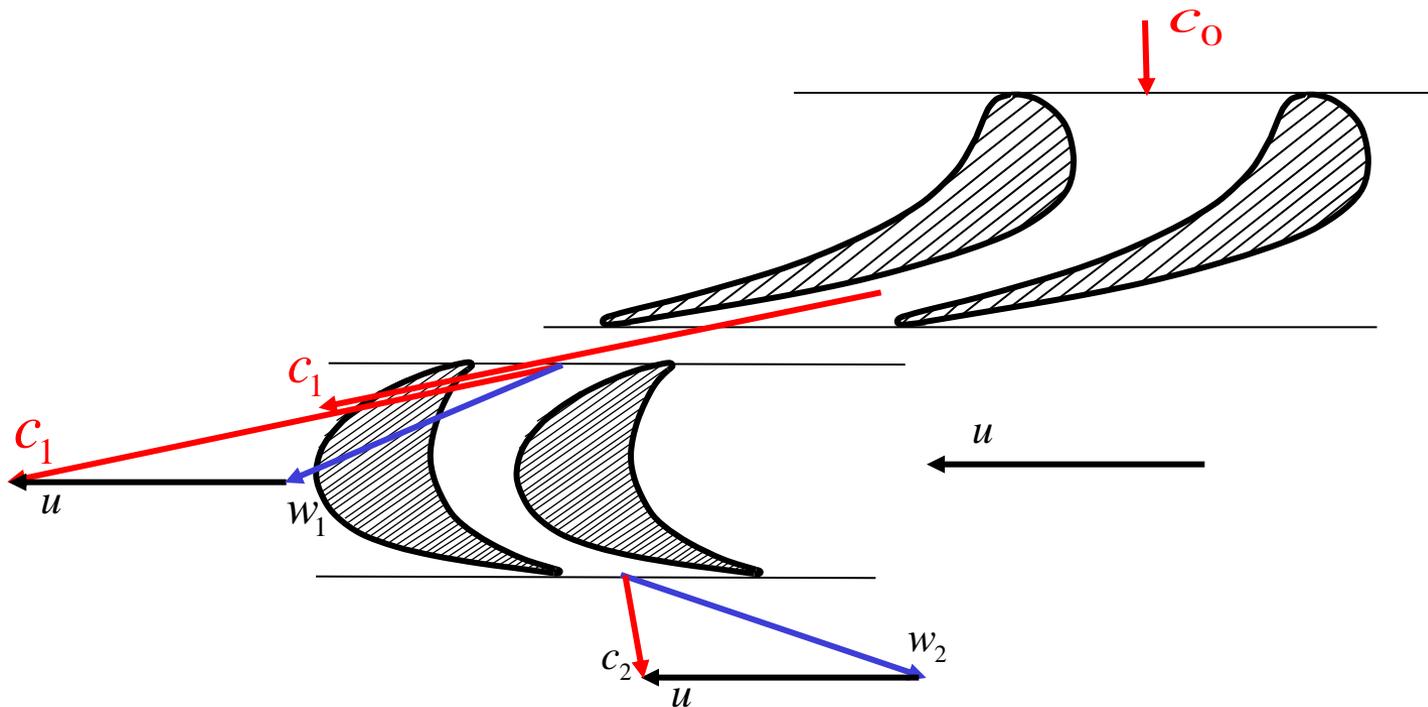
4) Определяем располагаемую теплоперепад на рабочую решетку по статическим параметрами и по основной изоэнтропе.



Вопрос на будущее

На основании чего задается реактивность ступени?

3.2. Треугольники скоростей ступени



$c_1 = \varphi \sqrt{2H_{0c}}$ - абсолютная скорость входа газа на рабочие лопатки

w_1 - относительная скорость входа газа на рабочие лопатки

w_2 - относительная скорость выхода газа из рабочих лопаток

c_2 - абсолютная скорость выхода газа из рабочих лопаток

3.3. Усилие, действующее на рабочие лопатки

А. Механизм возникновения усилия

- Активная составляющая (за счет поворота струи газа);
- Реактивная составляющая (за счет ускорения потока).

Следствия:

$\rho = 0$ (чисто активная ступень) \longrightarrow Ускорения нет

(конфузорность равна 1).

$$\beta_2 = \beta_1$$

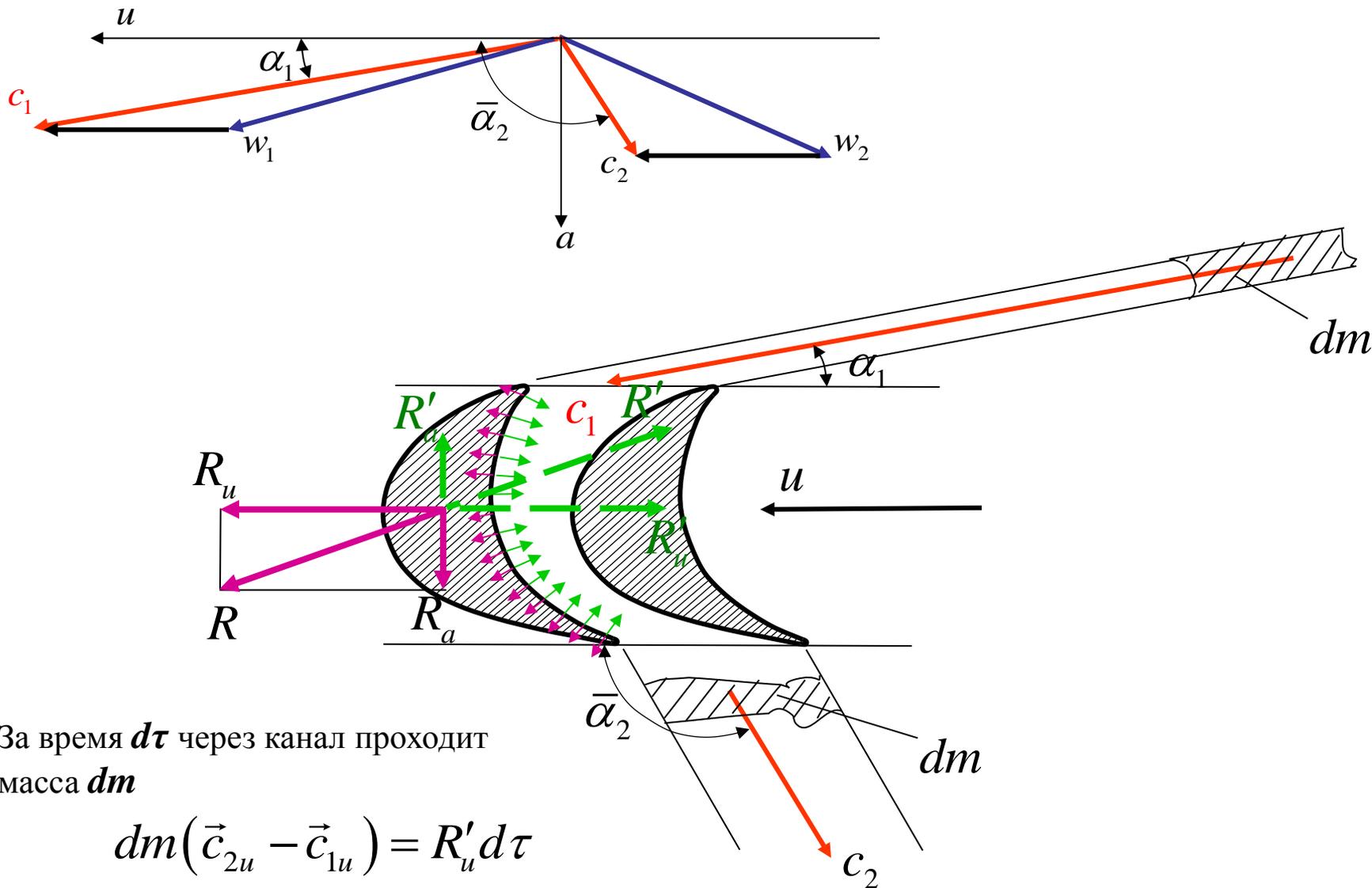
$\rho > 0$ \longrightarrow Поток ускоряется на рабочих лопатках

(конфузорность больше 1).

$$\beta_2 < \beta_1$$

Вывод: в зависимости от реактивности ступени выбирается угол выхода потока из рабочих лопаток.

Б. Определение усилия действующего на рабочие лопатки по уравнению количества движения



За время $d\tau$ через канал проходит масса dm

$$dm(\vec{c}_{2u} - \vec{c}_{1u}) = R'_u d\tau$$

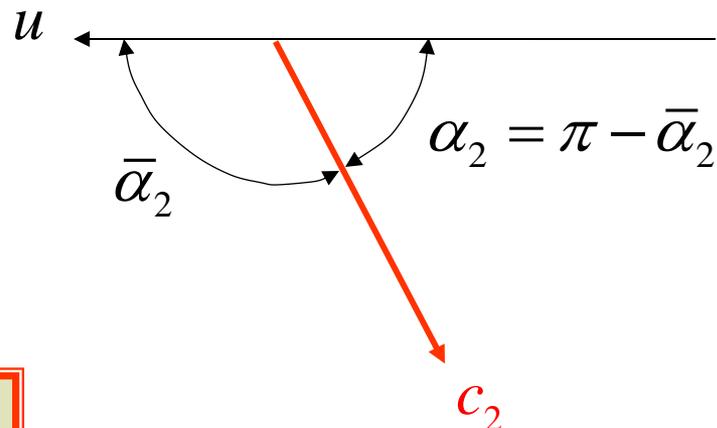
$$R'_u = \frac{dm}{d\tau} (c_2 \cos \bar{\alpha}_2 - c_1 \cos \alpha_1)$$

$$\frac{dm}{d\tau} = G \left[\frac{\text{кг} / \text{с}}{c} \right]$$

Окружное усилие:

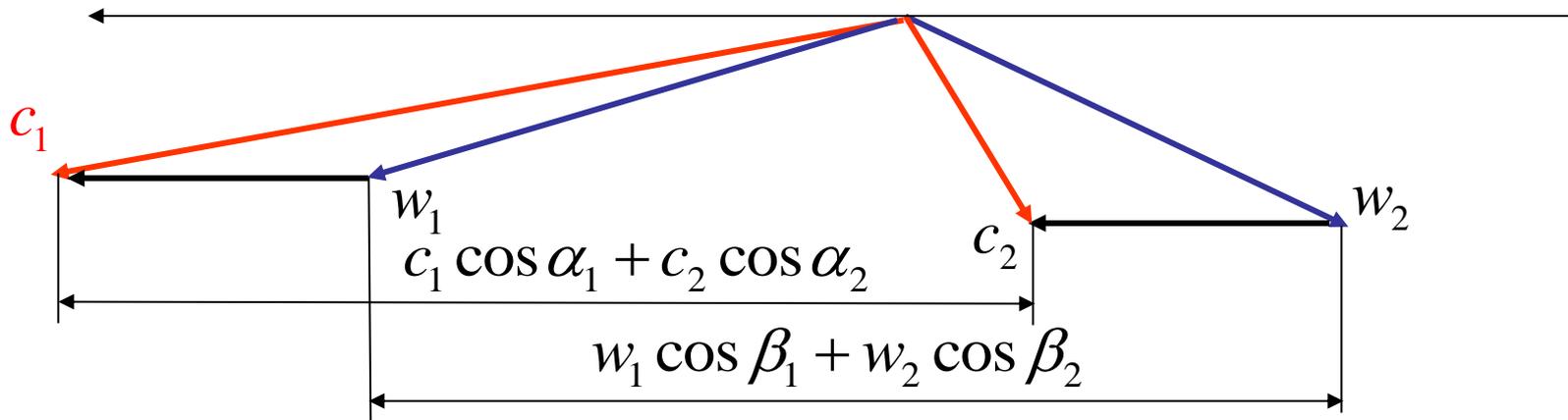
$$R_u = -R'_u = G(c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \bar{\alpha}_2)$$

$$\cos \bar{\alpha}_2 = \cos(\pi - \alpha_2) = -\cos \alpha_2$$



$$R_u = G(c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2)$$

$$R_u = G(w_1 \cos \beta_1 + w_2 \cos \beta_2)$$



Осевое усилие:

$$R_a = G(c_1 \sin \alpha_1 - c_2 \sin \alpha_2) + \Omega(p_1 - p_2) = \\ = G(w_1 \sin \beta_1 - w_2 \sin \beta_2) + \Omega(p_1 - p_2)$$

где $\Omega = \pi dl$ - ометаемая площадь рабочими лопатками

Полное усилие, с которым пар действует на рабочие лопатки

$$R = \sqrt{R_u^2 + R_a^2}$$

Сила, действующая на одну лопатку:

$$r = \frac{R}{z}$$

где z - число лопаток, находящихся под воздействием поток.

Вопрос на будущее

Как определить число лопаток?

3.4. Работа (мощность) на лопатках турбинной ступени (по уравнению количества движения)

Обычно рассматривается работа за единицу времени – **мощность**.

Мощность ступени: $N_u = R_u u$

Работа (мощность) 1 кг газа на лопатках ступени

$$L_u = \frac{N_u}{G} = u(c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2) = u(w_1 \cos \beta_1 + w_2 \cos \beta_2)$$

Для входного треугольника скоростей

$$w_1^2 = c_1^2 + u^2 - 2uc_1 \cos \alpha_1 \Rightarrow c_1 \cos \alpha_1 = \frac{c_1^2 + u^2 - w_1^2}{2u}$$

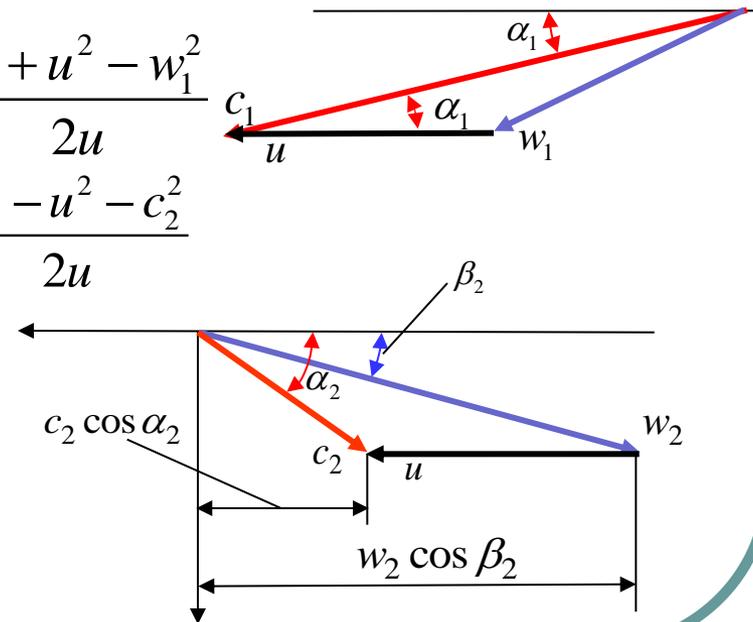
Для выходного треугольника скоростей

$$c_2^2 = w_2^2 + u^2 - 2uw_2 \cos \beta_2 \Rightarrow c_2 \cos \alpha_2 = \frac{w_2^2 - u^2 - c_2^2}{2u}$$

$$w_2 \cos \beta_2 = c_2 \cos \alpha_2 + u$$

$$c_2^2 = w_2^2 - u^2 - 2uc_2 \cos \alpha_2$$

$$L_u = \frac{c_1^2 - c_2^2 + w_2^2 - w_1^2}{2}$$



Тригонометрические соотношения для косоугольного треугольника:

Для входного треугольника скоростей:

$$w_1^2 = c_1^2 + u^2 - 2uc_1 \cos \alpha_1$$

$$\beta_1 = \arctg \left(\frac{\sin \alpha_1}{\cos \alpha_1 - \frac{u}{c_1}} \right)$$

Для выходного треугольника скоростей:

$$c_2^2 = w_2^2 + u^2 - 2uw_2 \cos \beta_2$$

$$\alpha_2 = \arctg \left(\frac{\sin \beta_2}{\cos \beta_2 - \frac{u}{w_2}} \right)$$

Представление мощности при вращательном движении

$$L_u = \frac{N_u}{G} = u(c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2) = u(w_1 \cos \beta_1 + w_2 \cos \beta_2)$$

$$N_u = uG(c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2) = uR_u = \pi dnR_u = 2\pi rnR_u$$

$$\omega = 2\pi n \quad \text{- угловая скорость вращения.}$$

$$M_u = rR_u \quad \text{- момент силы, создаваемый паром на рабочих лопатках ступени.}$$

$$N_u = \omega M_u$$

