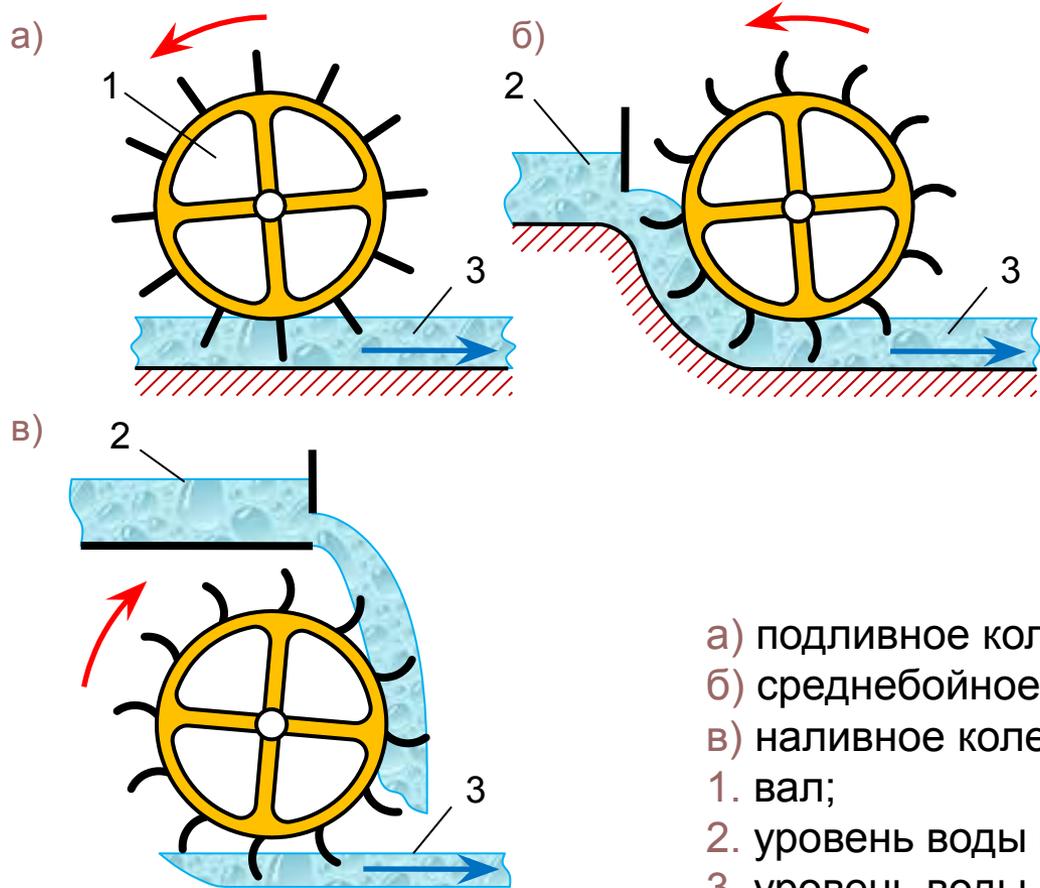


Power and EF of the *turbine and* turbine equipment

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> EF Power </div>	Relative EF	Absolute EF	Power
<i>Ideal turbine</i>	1	$\eta_t = \frac{H_0}{q_{TV}} = \frac{h_0 - h_{kt}}{h_0 - h_{nb}}$	$N_0 = GH_0$
<i>Internal</i>	$\eta_{oi} = \frac{N_i}{N_0} = \frac{H_i}{H_0}$	$\eta_i = \frac{N_i}{Q_{TV}} = \eta_t \eta_{oi}$	$N_i = GH_i = N_0 \eta_{oi}$
<i>Effective</i>	$\eta_{oe} = \frac{N_e}{N_0} = \eta_{oi} \eta$	$\eta_e = \frac{N_e}{Q_{TV}} = \eta_t \eta_{oe}$	$N_{\text{el}} = GH_{i\text{oe}} = N_0 \eta$
<i>Electric</i>	$\eta_{o\text{э}} = \frac{N_{\text{э}}}{N_0} = \eta_{oi} \eta_M \eta_{\text{э2}}$	$\eta_{\text{э}} = \frac{N_{\text{э}}}{Q_{TV}} = \eta_t \eta_{o\text{э}}$	$N_{\text{э}} = GH_0 \eta_{oi} \eta_M \eta_{\text{э2}} = N_0 \eta_{o\text{э}}$

Турбомашины АЭС

Водяное колесо



Эолипил Герона



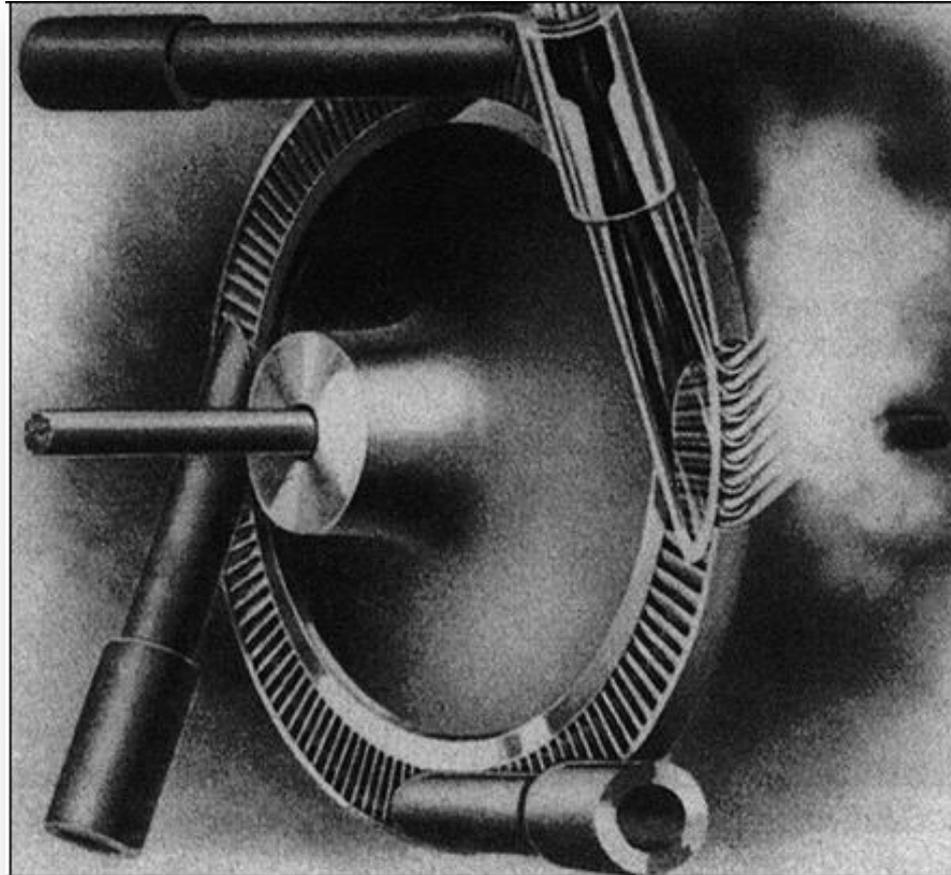


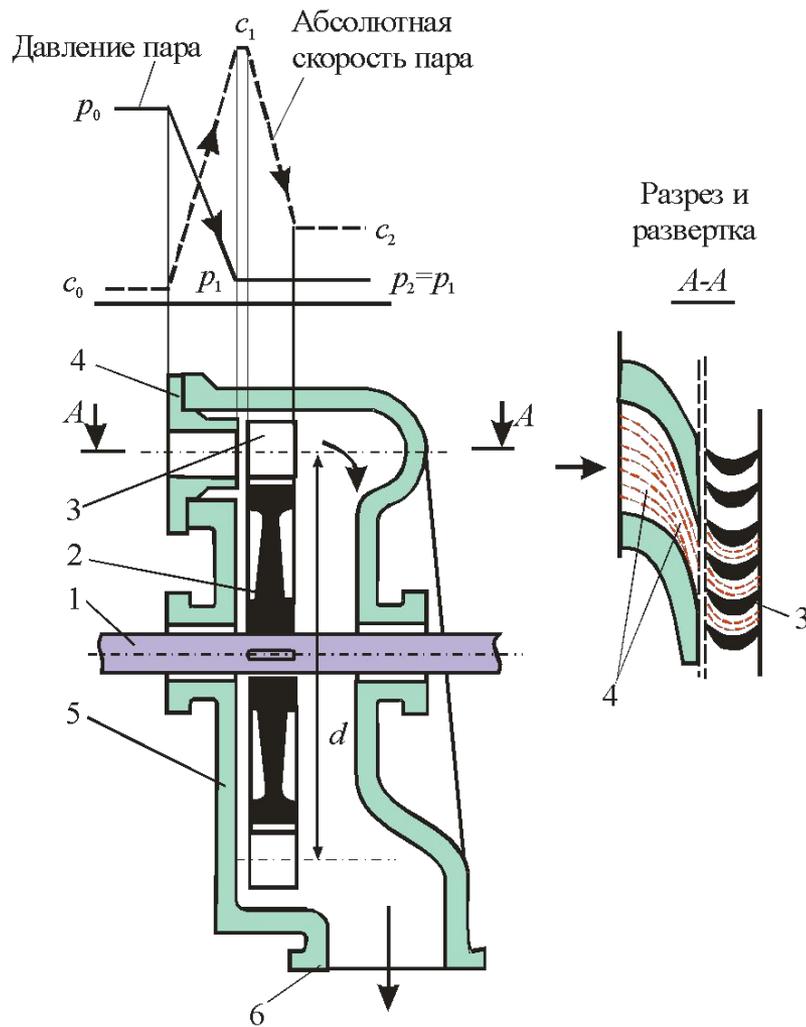
Gustaf de Laval
(1845-1913)



Charles Algernon Parsons
(1854 –1931)

Турбина Лаваля

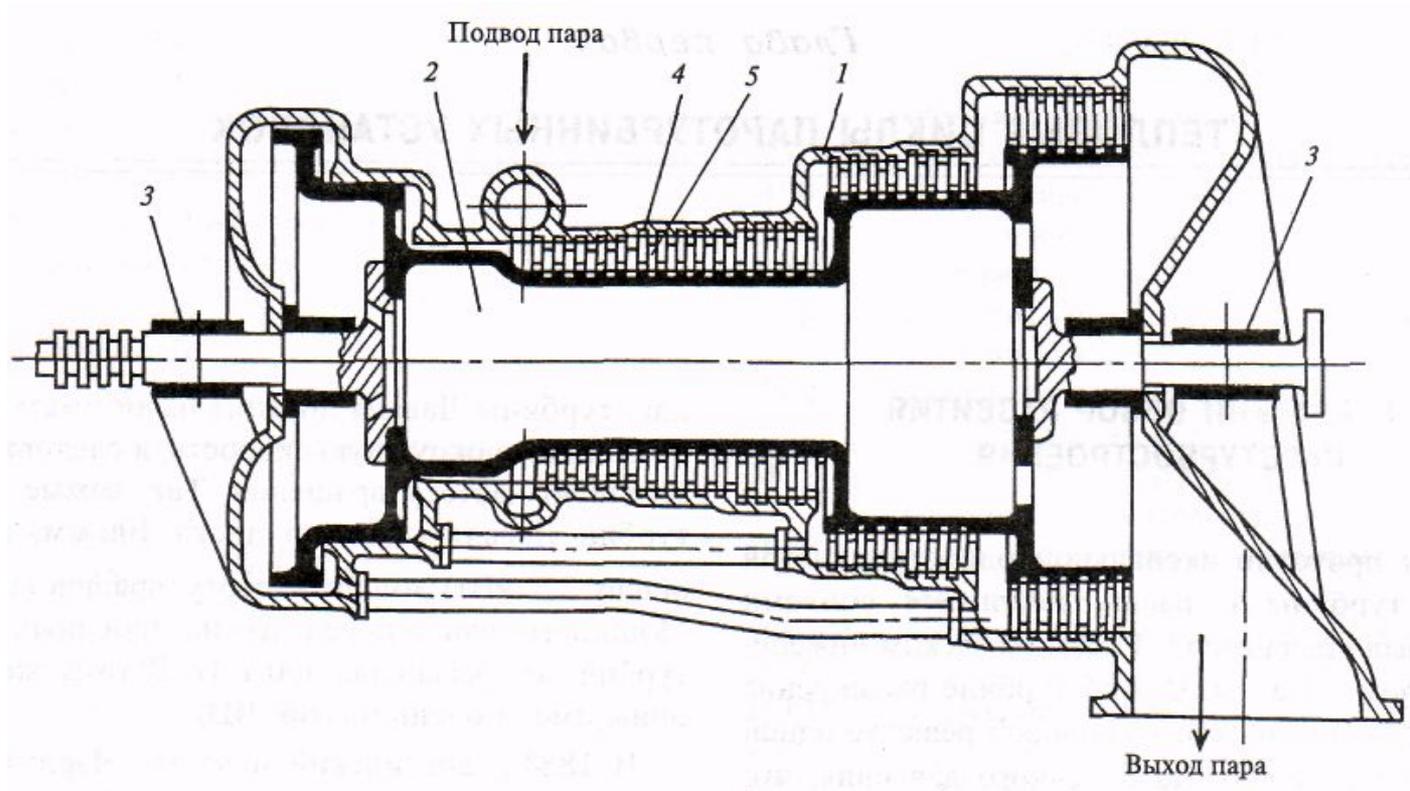




Схематический разрез одноступенчатой активной турбины:

1 - вал; 2 - диск; 3 - рабочие лопатки; 4 - сопловая решетка; 5 - корпус; 6 - выпускной патрубков

Турбина Парсонса



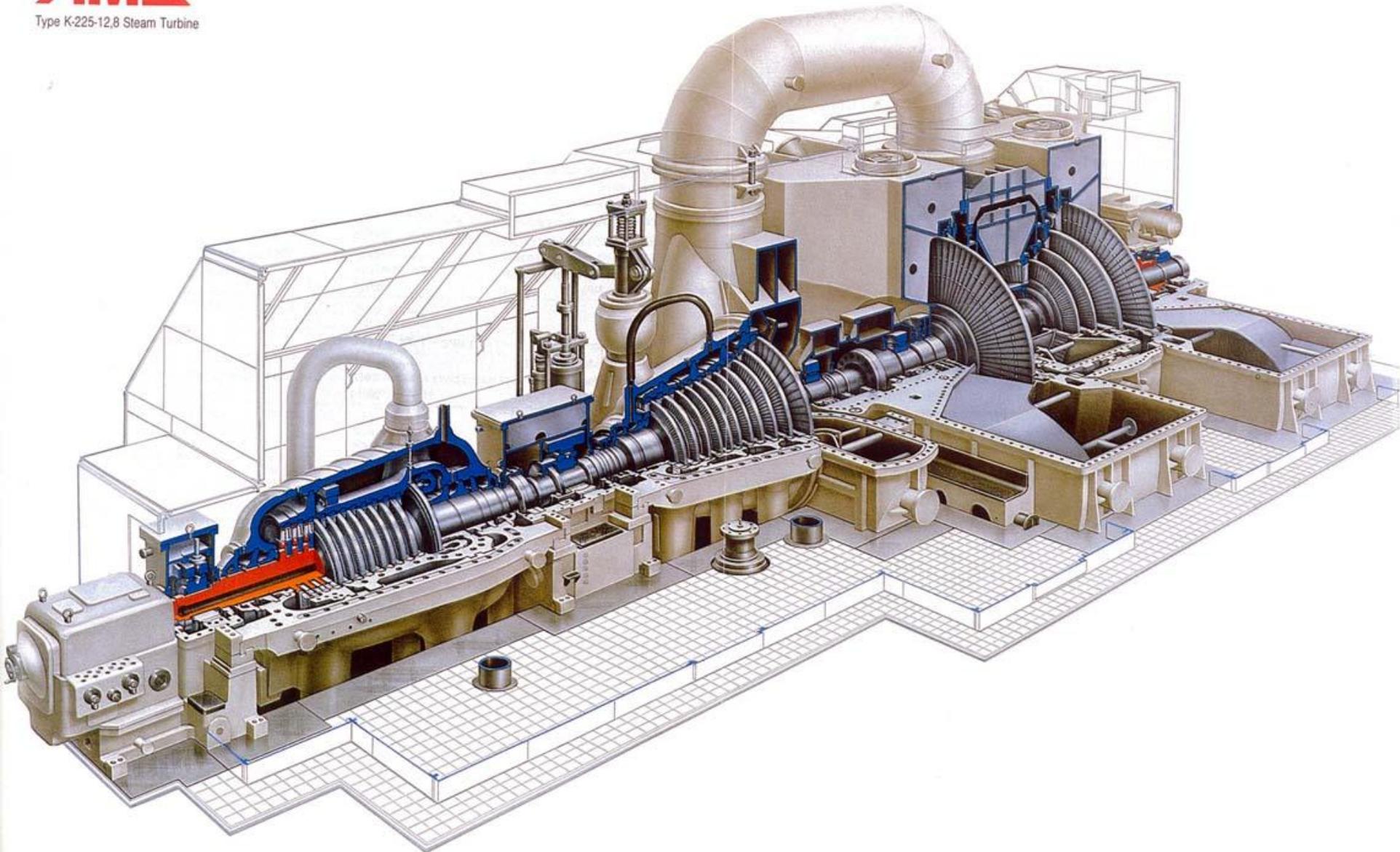
Многоступенчатая реактивная турбина:

1 - корпус; 2 - барабан; 3 - подшипник; 4 - сопловые лопатки одной из ступеней; 5 - рабочие лопатки одной из ступеней

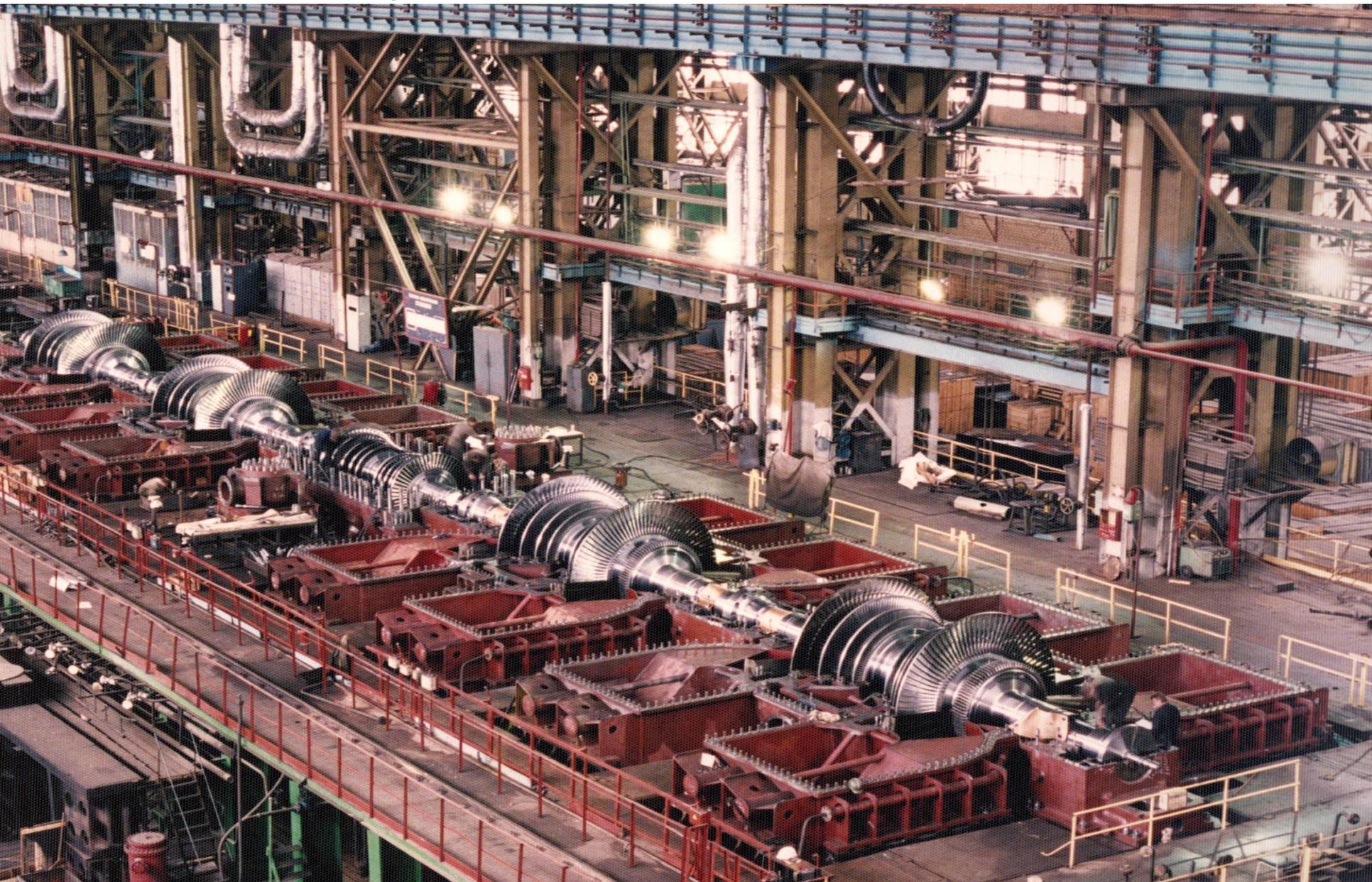
Паровая турбина К-215-12,7

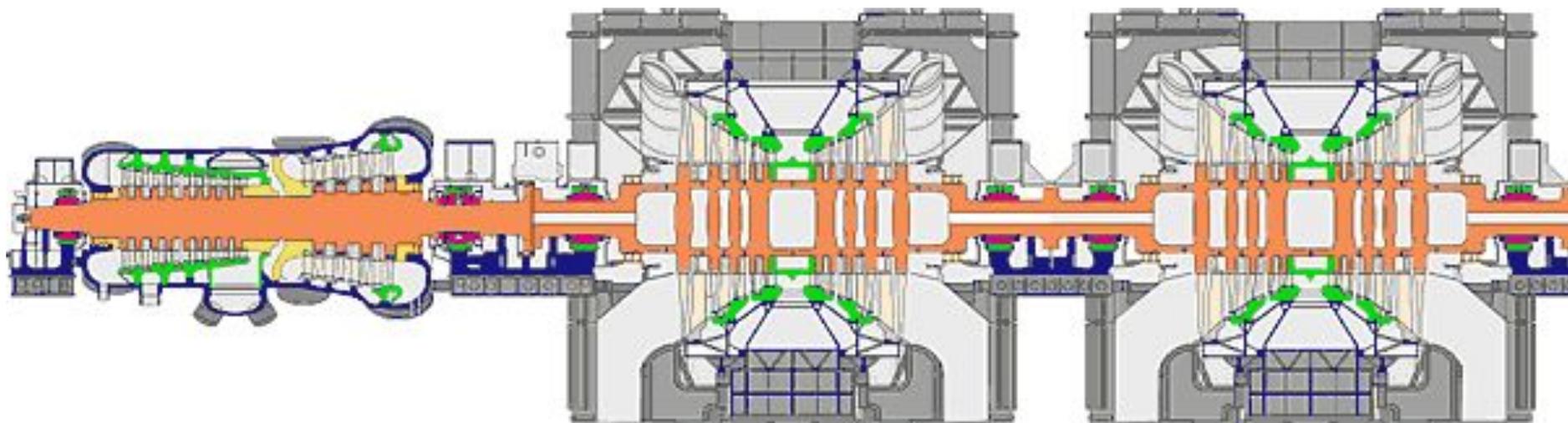


Type K-225-12,8 Steam Turbine



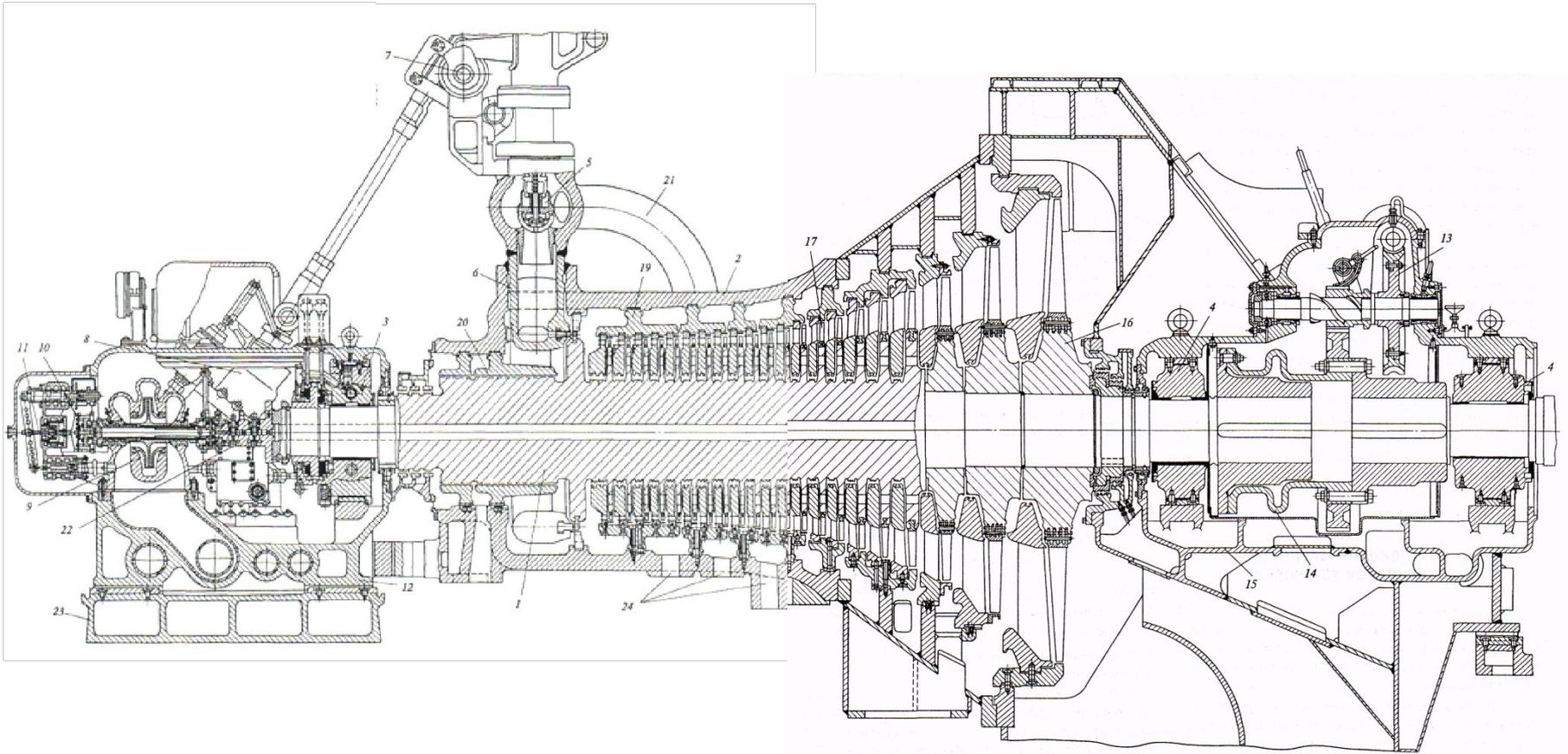
Паровая турбина К-1000-5,8/50 для АЭС на сборочно-испытательном стенде ЛМЗ

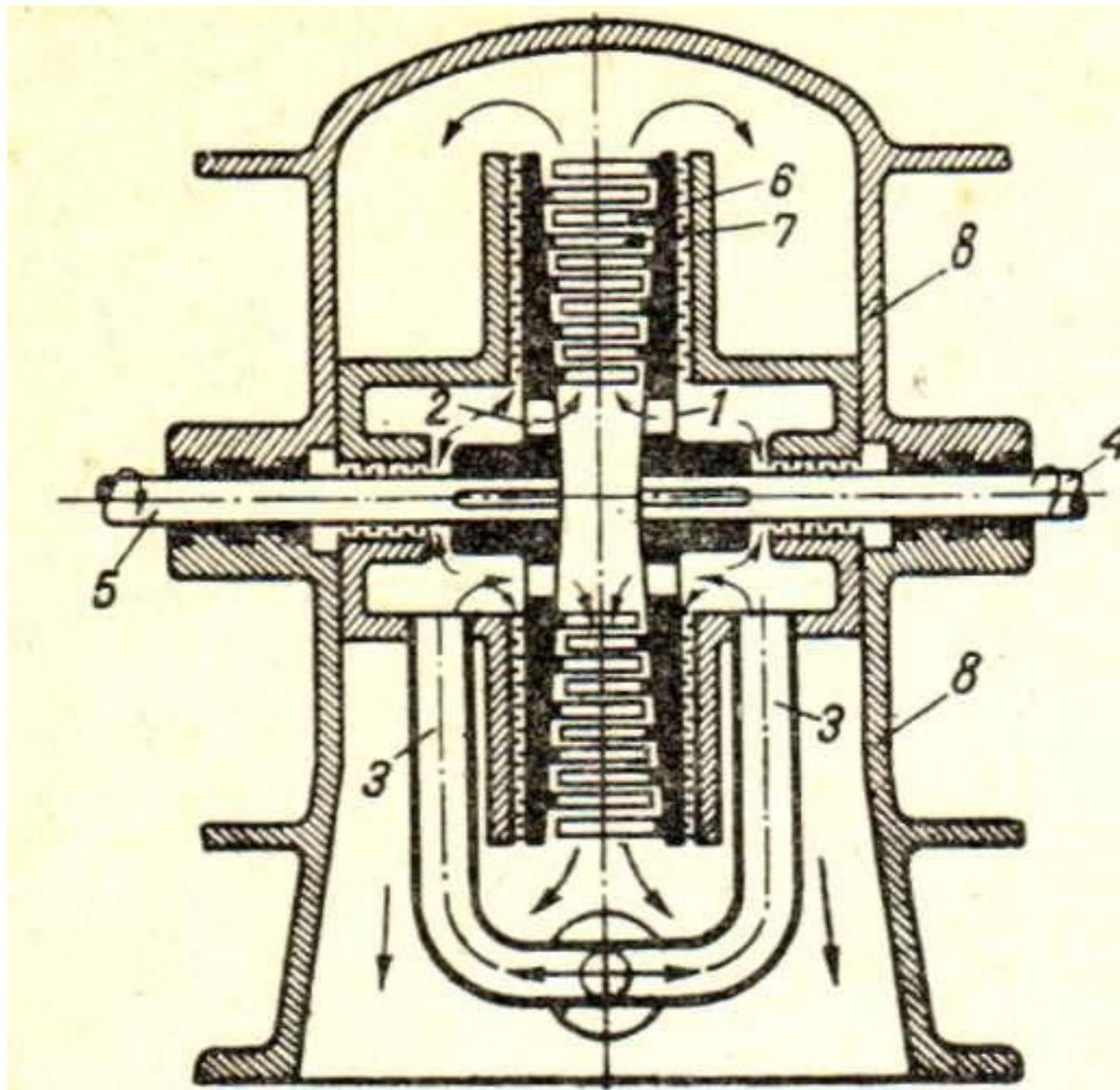




Продольный разрез турбины К-1200-6,8/25 ОАО “Силловые машины”

$l_{\text{посл.ст}} = 1740 \text{ мм}$

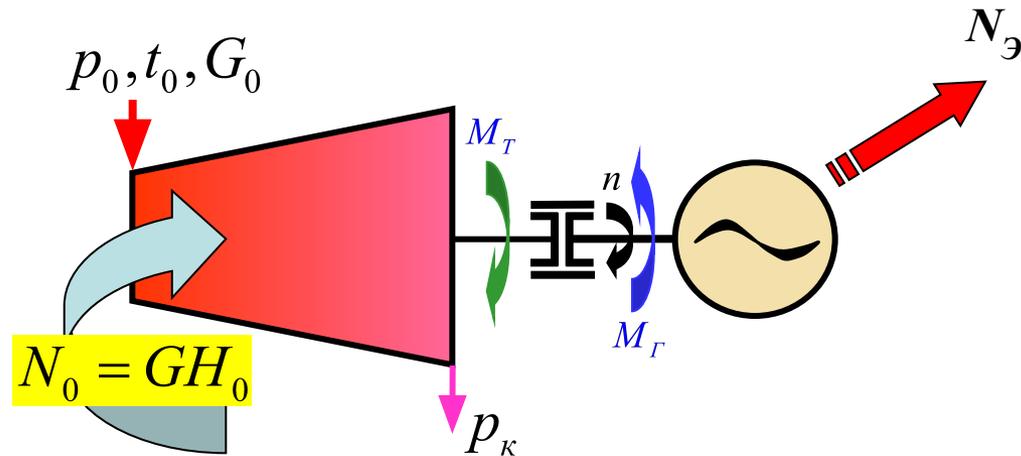




Схематический чертеж радиальной турбины Юнгстрем.

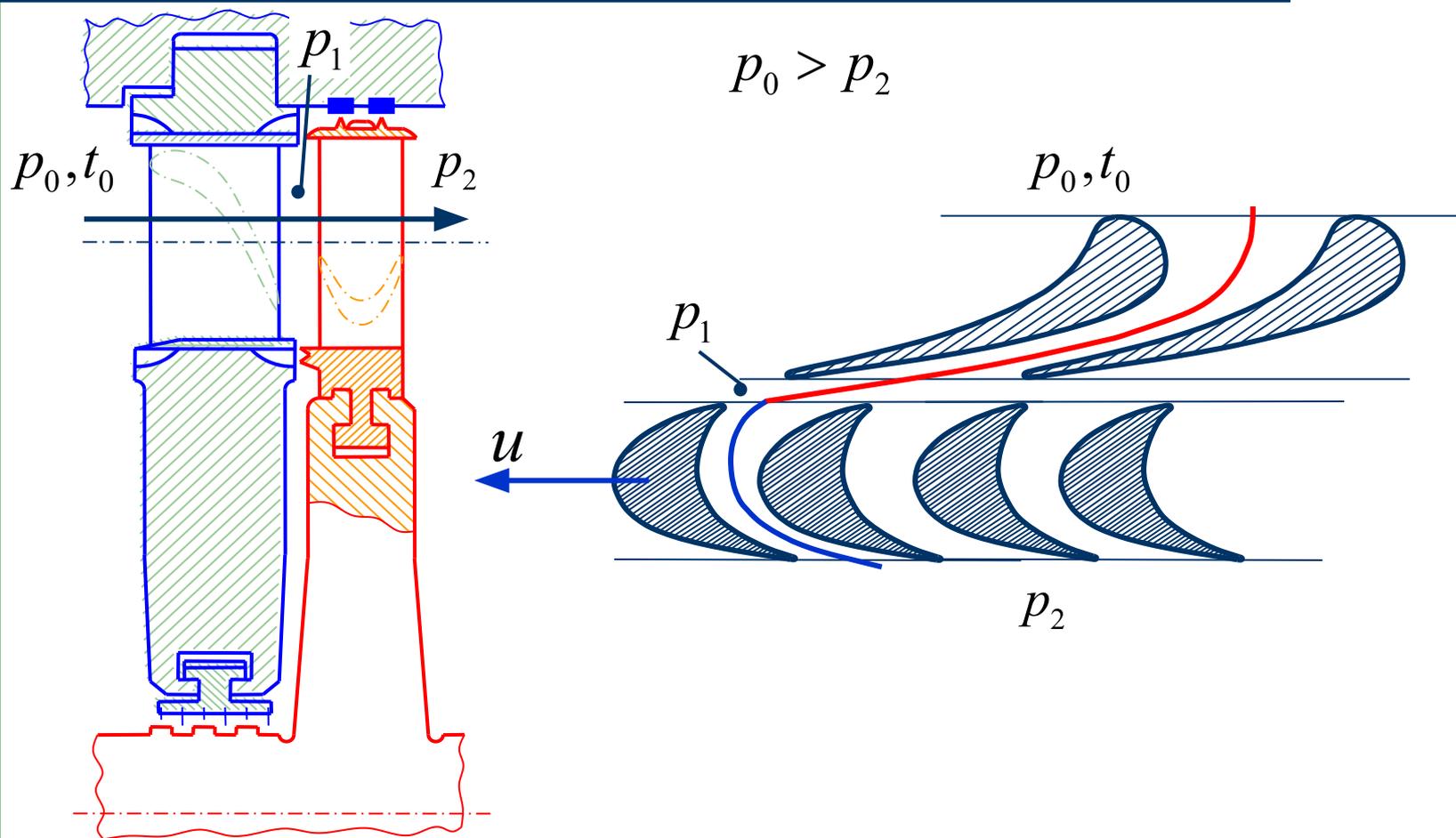
1,2 — диски турбины; 3 — паропроводы свежего пара; 4, 5 — валы турбины; 6,7 — лопатки промежуточных ступеней.

Назначение турбины



Турбина – двигатель, предназначенный для преобразования потенциальной энергии теплоты в механическую энергию вращения ротора турбины.

2. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА В КАНАЛАХ ТУРБИННЫХ СТУПЕНЕЙ



Вопросы, рассматриваемые в разделе
«2. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА В **КАНАЛАХ** ТУРБИННЫХ
СТУПЕНЕЙ»

2.1. Основные уравнения движения сжимаемой жидкости.

2.2. Характеристики потока при изоэнтропийном процессе расширения.

2.3. Реальное течение газа в каналах.

{ 2.4. Турбинные решетки. }

2.1. Основные уравнения движения сжимаемой жидкости

Система уравнений (!!!), *адекватно* описывающая течение газа в каналах:

- Уравнение состояния
- Уравнение неразрывности
- Уравнение количества движения
- Уравнение сохранения энергии

2.1. Основные уравнения движения сжимаемой жидкости

Система уравнений (!!!), *адекватно* описывающая течение газа в каналах:

- Уравнение состояния
- Уравнение неразрывности
- Уравнение количества движения
- Уравнение сохранения энергии

2.1.1. Уравнение состояния

Состояние вещества однозначно определено, если известны два **независимых** параметра.

$$pv = RT$$

$$h = \frac{k}{k-1} pv + const$$

где k - показатель адиабаты $k = \frac{c_p}{c_v}$

✓ для перегретого водяного пара $k = 1,26 \dots 1,33$

для оценочных расчетов можно принять $k_{nn} = 1,3$

✓ для сухого насыщенного пара $k_{вн} = 1,135$

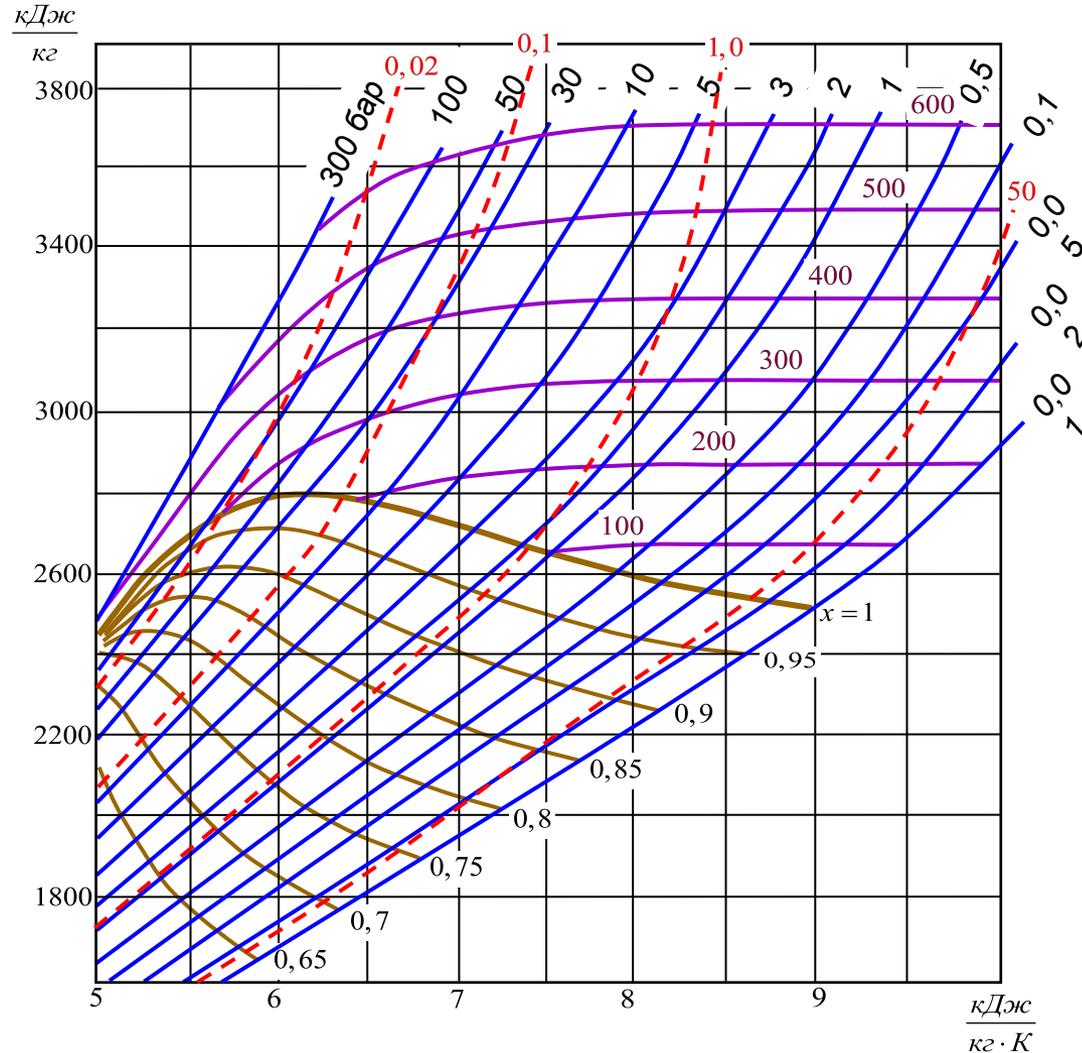
✓ для воздуха $k_{возд} = 1,4$

Уравнения состояния в виде формул используются для аналитического описания процессов.

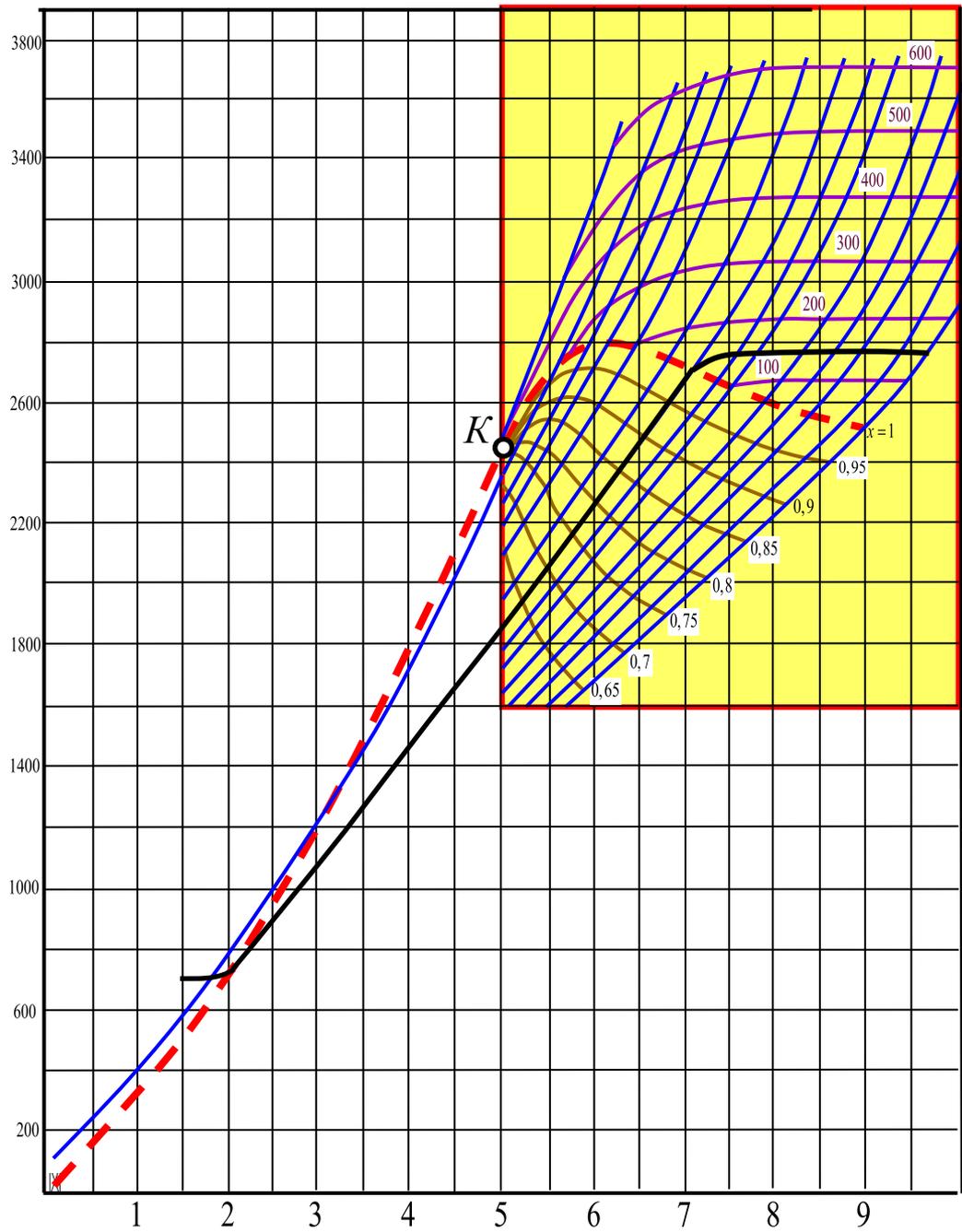
Для практических расчетов используются:

таблицы термодинамических свойств;

диаграммы, построенные на основании таблиц;



— изотерма.



- электронные таблицы,
выполненные на основе аппроксимации
таблиц термодинамических свойств.

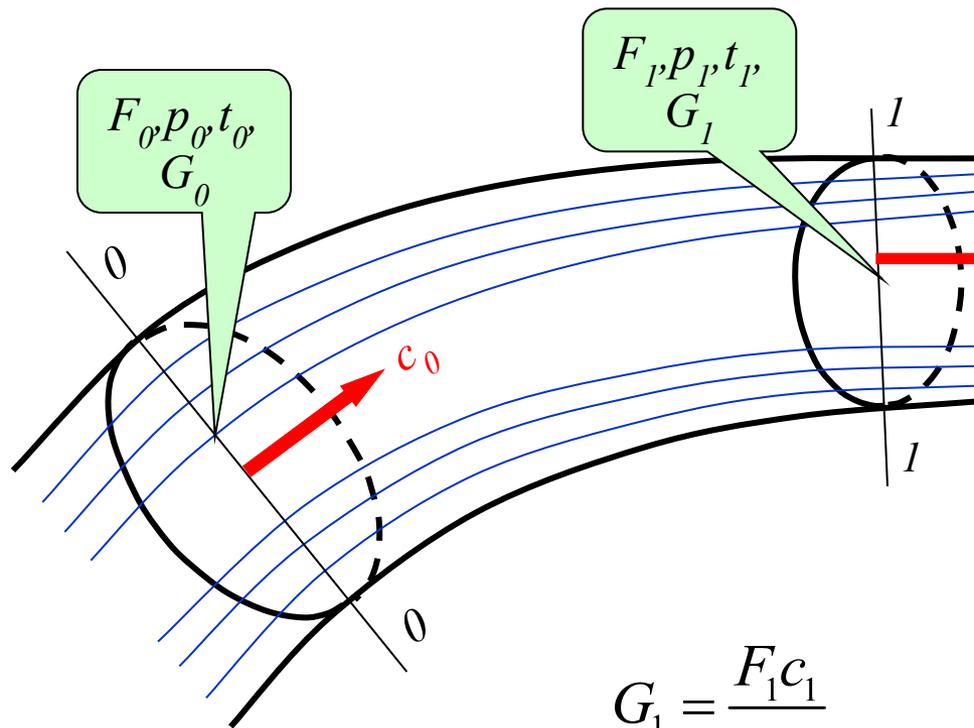
**Изменение состояния происходит в результате совершения
термодинамического процесса.**

Для нас важен **адиабатный** процесс – без подвода теплоты извне.

Идеальный адиабатный (**изоэнтروпийный**) процесс описывается уравнением:

$$p v_t^k = \text{const}$$

2.1.2. Уравнение неразрывности



Определим **объемный расход** [м³/с], проходящий через сечение 0-0:

$$V_0 = F_0 c_0 = G_0 v_0$$

$$\frac{\text{м}^3}{\text{с}} = \text{м}^2 \frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{кг} \text{ м}^3}{\text{с} \text{ кг}}$$

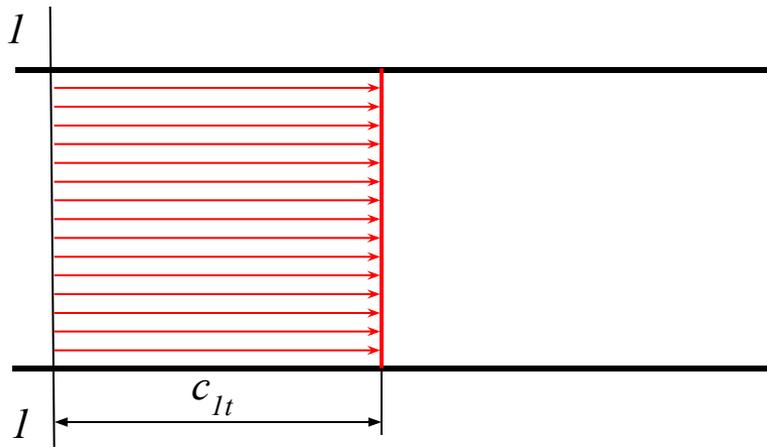
$$v = f(p_0, t_0)$$

$$G_0 = \frac{F_0 c_0}{v_0}$$

$$G_1 = \frac{F_1 c_1}{v_1}$$

$$G_0 = G_1 \quad \frac{F_0 c_0}{v_0} = \frac{F_1 c_1}{v_1}$$

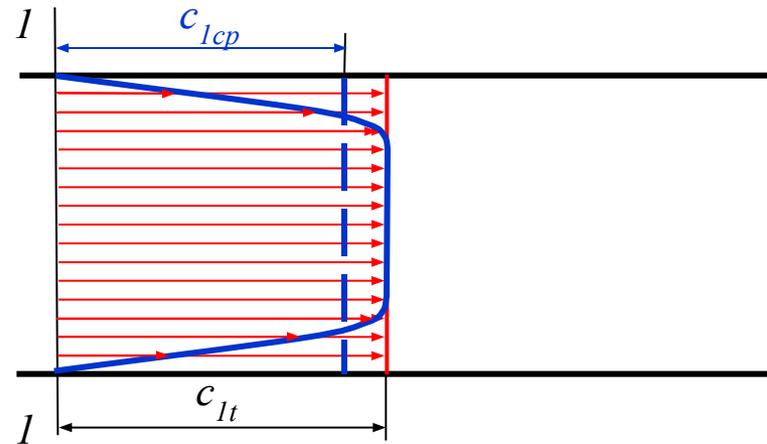
$$G = F \frac{c}{v} = \text{const}$$



а) Идеальное течение – без трения

$$G_{1t} = \frac{F_1 c_{1t}}{v_{1t}}$$

при этом $v_{1t} = f(p_1, t_{1t}) = \varphi(p_1, s_0)$



б) Действительное течение – с учетом сил вязкости (трение)

$$G_{1\partial} = \int_{(F_1)} \frac{c_1}{v_1} dF_1 = F_1 \frac{c_{\text{cp}}}{v_{\text{cp}}}$$

при этом $c_1 = \gamma(F_1)$ и $v_1 = \varphi(F_1)$

$$c_{1cp} = \frac{\int_{(F_1)} c_1 dF_1}{F_1}$$

$$G_1 = F_1 \frac{c_1}{v_1}$$

$$v_{1cp} = f(p_1, t_1)$$

В общем случае:

$$G_i = F_i \frac{c_i}{v_i}$$

Уравнение неразрывности в дифференциальной форме

$$G = F \frac{c}{v} = \text{const}$$

Прологарифмируем формулу уравнения неразрывности

$$\ln G = \ln F + \ln c - \ln v$$

Продифференцируем это выражение (памятуя, что $G = \text{const}$)

$$0 = \frac{dF}{F} + \frac{dc}{c} - \frac{dv}{v}$$

$$\frac{dF}{F} = \frac{dv}{v} - \frac{dc}{c}$$

А) Если $\frac{dc}{c} > \frac{dv}{v}$, то $dF < 0$

Канал должен сужаться.

Б) Если $\frac{dc}{c} < \frac{dv}{v}$, то $dF > 0$

Канал должен расширяться.

2.1.3. Уравнение количества движения

А) Понятие количества движения и энергии в динамических системах

Второй закон Ньютона:

- для равноускоренного движения

$$R = ma$$

где R - сила, н; m - масса, кг; a - ускорение, м/с².

- для движения с переменным ускорением (дифференциальная форма уравнения):

$$R = m \frac{\partial^2 s}{\partial \tau^2}$$

где s - расстояние; τ - время.

$$\frac{\partial^2 s}{\partial \tau^2} = \frac{d}{d\tau} \left(\frac{ds}{d\tau} \right) = \frac{dc}{d\tau}$$

$$\frac{ds}{d\tau} = c \quad \text{- скорость, м/с.}$$

$$R = m \frac{dc}{d\tau} \xrightarrow[\text{переменные}]{\text{разделим}} R d\tau = m dc$$

$$\int_0^{\tau} R d\tau = \int_{c_0}^c m dc$$

$$R\tau = mc - mc_0 \quad \text{Уравнение количества движения}$$

Импульс силы равен изменению количества движения
 Изменение количества движения происходит под действием импульса силы

$$\frac{\partial^2 s}{\partial \tau^2} = \frac{dc}{d\tau} \frac{ds}{ds} = \frac{ds}{d\tau} \frac{dc}{ds} = c \frac{dc}{ds}$$

$$R = mc \frac{dc}{ds} \longrightarrow R ds = m c dc$$

$$\int_0^s R ds = \int_{c_0}^c m c dc$$

$$Rs = \frac{mc^2}{2} - \frac{mc_0^2}{2}$$

Сила умноженная на путь – механическая работа

Кинетическая энергия

Б) Применение уравнения количества движения при движении жидкости (газа) в канале.

I. Феноменологический подход

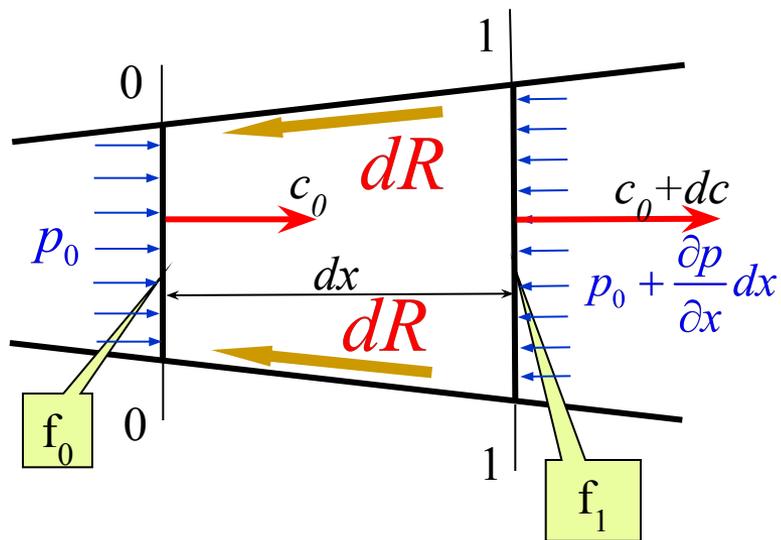
Если известен секундный расход массы G массы [кг/с] и скорости потока на входе c_1 [м/с] и выходе канала c_2 [м/с], то можно определить силу R [н], которая заставила измениться количеству движения

$$R' = G \left(\overline{c_2} - \overline{c_1} \right)$$

Т.к. по третьему закону Ньютона сила действия равна силе противодействия, то можно определить силу, с которой поток действует на стенки канала

$$R = -R' = G \left(\overline{c_1} - \overline{c_2} \right)$$

II. Проблема определения действительной скорости



$$f_0 p_0 - f_1 \left(p_0 + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) - dR = dm \frac{dc}{d\tau}$$

при $dx \rightarrow 0$: $f_0 \rightarrow f_1 \rightarrow f$

$$-f \frac{\partial p}{\partial x} dx - dR = dm \frac{dc}{d\tau} \quad \Bigg| : dm = \frac{f dx}{v}$$

$$-v \frac{\partial p}{\partial x} - R = \frac{dc}{d\tau}$$

где $R = \frac{dR}{dm}$ - сила сопротивления, отнесенная к 1 кг массы протекающего газа.

Для установившегося режима $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dp}{dx}$

$$-v dp - R dx = \frac{dx}{d\tau} dc \quad \xrightarrow{\frac{dx}{d\tau} = c} \quad \boxed{cdc = -v dp - R dx}$$

Уравнение изменения количества движения в одномерном потоке

Интегрируя от 0-0 до 1-1

$$\frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = \int_{p_1}^{p_0} v dp - \int_{x_0}^{x_1} R dx$$

$$\frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = \int_{p_1}^{p_0} \nu dp - \int_{x_0}^{x_1} R dx$$

* Теоретический процесс расширения

$$R(x) = 0$$

$$\frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2} = \int_{p_1}^{p_0} \nu dp$$

$$\int_{p_1}^{p_0} \nu dp = l_{\text{мехн}} = h_0 - h_{1t}$$

$$\frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2} = h_0 - h_{1t}$$

** Действительный процесс расширения

$$R = f(x)$$

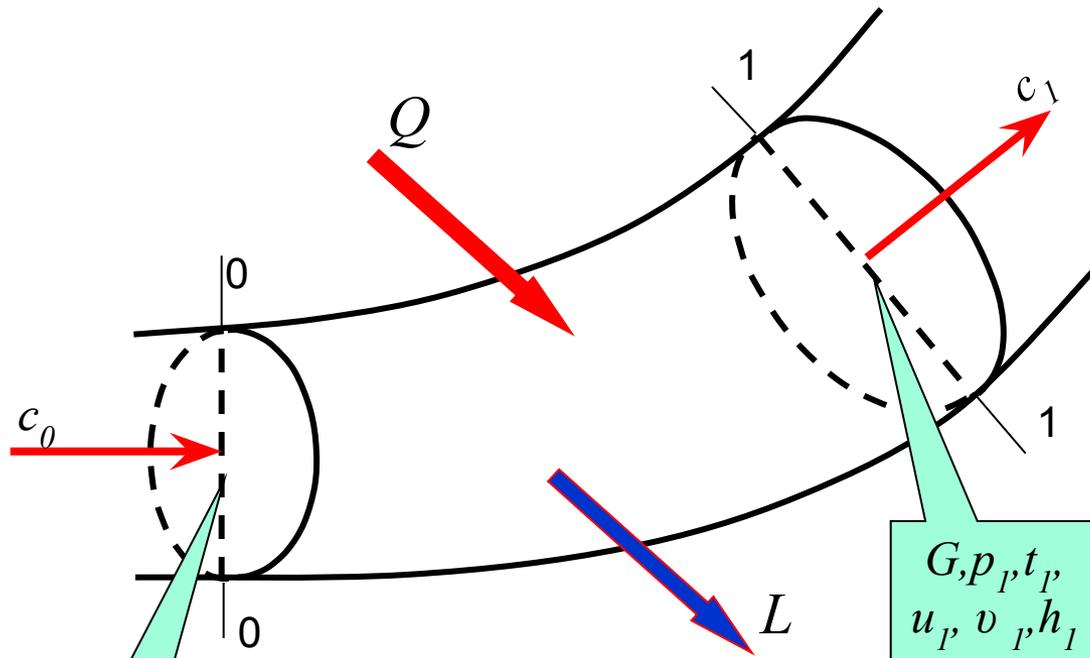
Известно, что $R = f(\Delta, Re = \varphi(c, \nu, d), \text{ кривизны канала, } \dots)$

в частности, возможностью отрыва пограничного слоя при диффузорном характере течения

В теории турбин уравнение количества движения для потока в канале при действительном течении заменяется экспериментальными данными.

2.1.4. Уравнение сохранения энергии

(для потока)



G, p_0, t_0
 u_0, v_0, h_0

Частные случаи

а) $q = 0$

$$\frac{c_0^2}{2} + h_0 = \frac{c_1^2}{2} + h_1 + l$$

б) $q = 0, l = 0$

$$\frac{c_0^2}{2} + h_0 = \frac{c_1^2}{2} + h_1$$

Подведенная энергия

$$\frac{Gc_0^2}{2} + Gh_0 + Q$$

Отведенная энергия

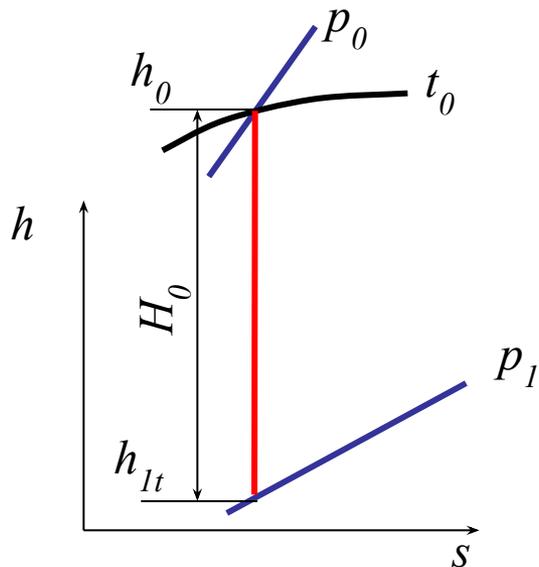
$$\frac{Gc_1^2}{2} + Gh_1 + L$$

$$\frac{c_0^2}{2} + h_0 + q = \frac{c_1^2}{2} + h_1 + l$$

Задано p_0, t_0, p_1 . Определить скорость на выходе из канала при

$$q = 0, l = 0$$

* Теоретический процесс расширения



$$\frac{c_0^2}{2} + h_0 = \frac{c_{1t}^2}{2} + h_{1t} \quad \frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2} = h_0 - h_{1t}$$

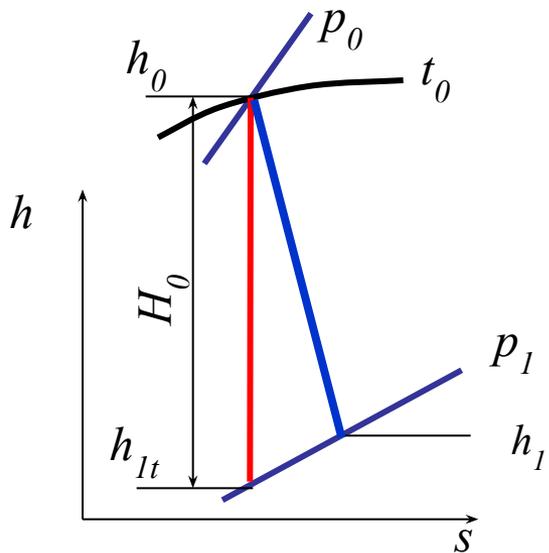
$$c_{1t} = \sqrt{2(h_0 - h_{1t}) + c_0^2} \quad \leftarrow h \text{ в Дж/кг}$$

Если h в кДж/кг $\Rightarrow c_{1t} = \sqrt{2000(h_0 - h_{1t}) + c_0^2}$

$$c_{1t} = 44,7 \sqrt{(h_0 - h_{1t}) + \frac{c_0^2}{2000}}$$

$H_0 = h_0 - h_{1t}$ -располагаемый теплоперепад на канал

** Действительный процесс расширения



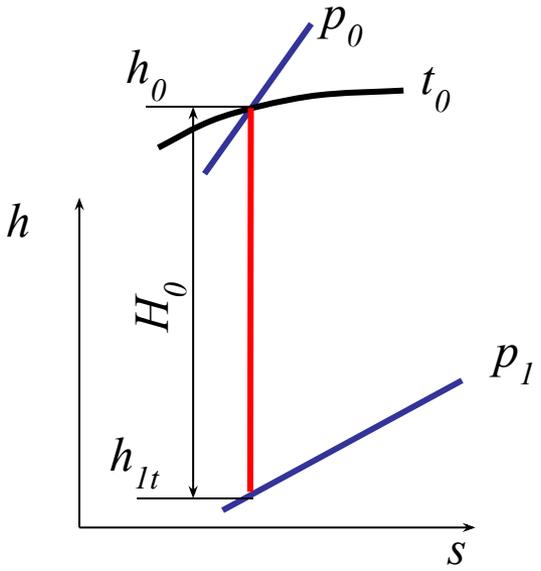
$$\frac{c_0^2}{2} + h_0 = \frac{c_1^2}{2} + h_1$$

$$c_1 = 44,7 \sqrt{(h_0 - h_1) + \frac{c_0^2}{2000}}$$

$H_i = h_0 - h_1$ - действительный теплоперепад на канал

Сравнение использования уравнений количества движения и сохранения энергии

Теоретический процесс расширения



Уравнение количества движения

$$\frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2} = h_0 - h_{1t}$$

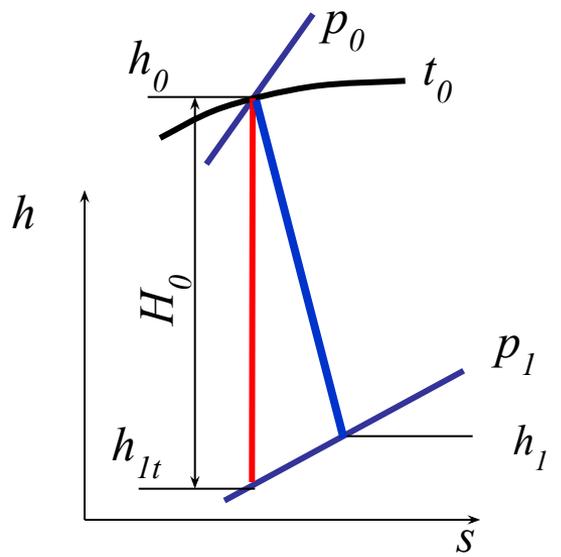
$$c_{1t} = \sqrt{2(h_0 - h_{1t}) + c_0^2}$$

Уравнение сохранения энергии

$$\frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2} = h_0 - h_{1t}$$

$$c_{1t} = \sqrt{2(h_0 - h_{1t}) + c_0^2}$$

Действительный процесс расширения



$$\frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = \int_{p_1}^{p_0} v dp - \int_{x_0}^{x_1} R dx$$

Необходимо знать термодинамический процесс по длине канала

$$\frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = h_0 - h_1$$

$$c_1 = \sqrt{2(h_0 - h_1) + c_0^2}$$

Необходимо знать начальное и конечное состояние

*** Ускорение потока

$$\frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = h_0 - h_1$$

Если $h_1 < h_0$, то $c_1 > c_0$ поток **ускоряется** (конфузорное течение)

Если $h_1 > h_0$, то $c_1 < c_0$ поток **замедляется** (диффузорное течение)

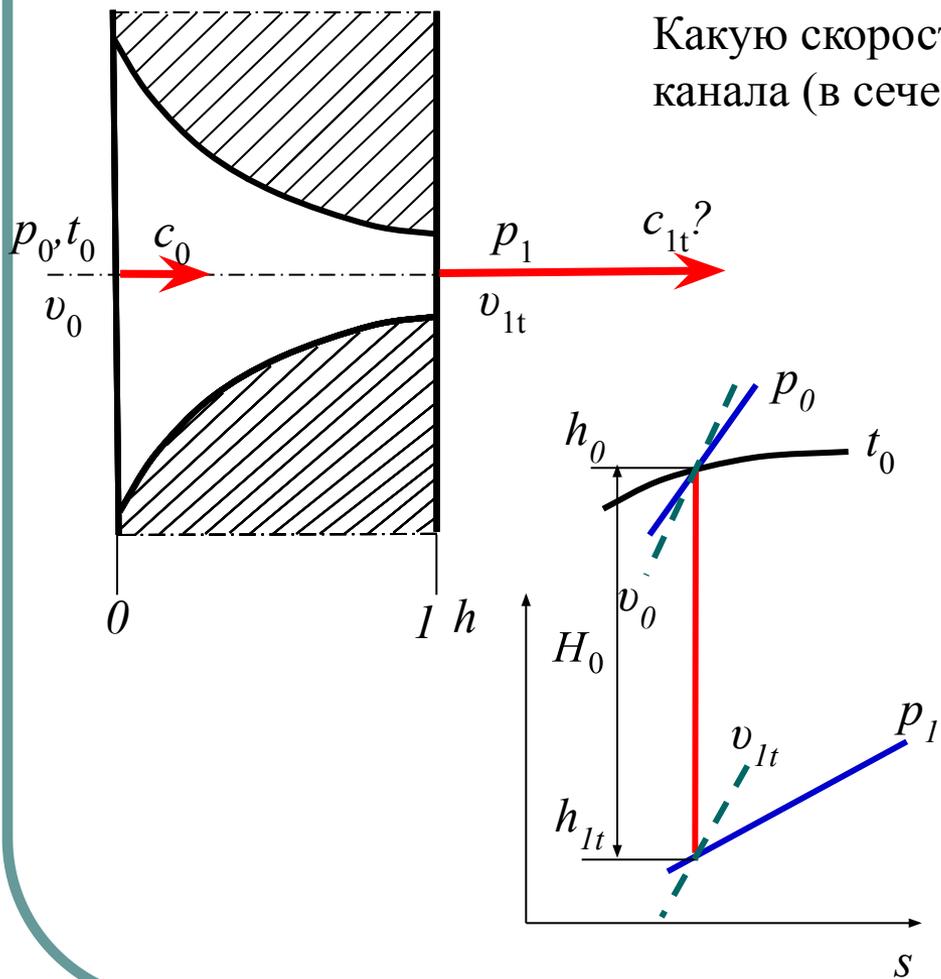
2.2. Характеристики потока при изоэнтروпийном расширении газа в каналах

Канал, в котором поток плавно ускоряется, называется **сопловым** или просто **соплом**.

Канал, в котором поток плавно замедляется, называется **диффузорным** или просто **диффузором**.

2.2.1. Ускорение потока в канале

Какую скорость будет иметь поток на выходе из канала (в сечении 1)?



$$\frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2} = h_0 - h_{1t}$$

$H_0 = h_0 - h_{1t}$ - располагаемый теплоперепад на канал (по статическим параметрам)

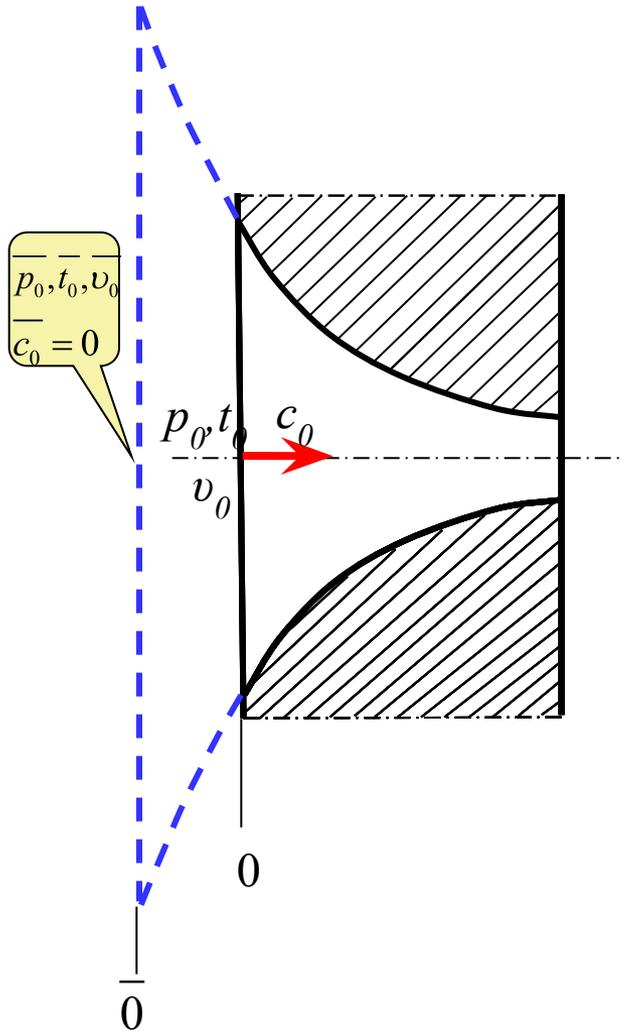
$$h = \frac{k}{k-1} p v + const$$

$$\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1} (p_0 v_0 - p_1 v_{1t}) + \frac{c_0^2}{2}$$

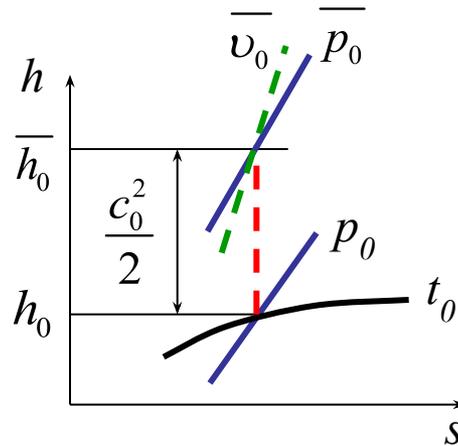
$$\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1} (p_0 v_0 - p_1 v_{1t}) + \frac{c_0^2}{2}$$

* Параметры торможения.

Каким образом появилась скорость c_0 ?



$$\frac{c_0^2}{2} = \frac{k}{k-1} (\overline{p_0 v_0} - p_0 v_0) = \overline{h_0} - h_0$$



$$\overline{p_0} = p_0 + \frac{c_0^2}{2v_0};$$

$$\overline{v_0} = v_0 + \frac{c_0^2}{2kp_0}$$

$$\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1} (\overline{p_0} \overline{v_0} - p_1 v_{1t})$$

$$\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1} \left(\overline{p_0 v_0} - p_1 v_{1t} \right) = \overline{h_0} - h_{1t}$$

$\overline{H_0} = \overline{h_0} - h_{1t}$ - располагаемый теплоперепад на канал (по параметрам торможения на входе)

$$\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1} \overline{p_0 v_0} \left(1 - \frac{p_1 v_{1t}}{\overline{p_0 v_0}} \right)$$

$$\overline{H_0} - H_0 = \frac{c_0^2}{2}$$

$$\frac{p_1 v_{1t}}{\overline{p_0 v_0}} = \frac{p_1}{p_0} \cdot \left(\frac{\overline{p_0}}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = \varepsilon \cdot \varepsilon^{-\frac{1}{k}} = \varepsilon^{\frac{k-1}{k}}$$

а) По уравнению изоэнтропы $p v^k = const$ имеем

$$\overline{p_0 v_0}^k = p_1 v_{1t}^k \longrightarrow \frac{v_{1t}}{v_0} = \left(\frac{\overline{p_0}}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}$$

б) Обозначим

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

отношение давлений на канал (соплю)

$$\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1} \overline{p_0 v_0} \left(1 - \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} \right)$$