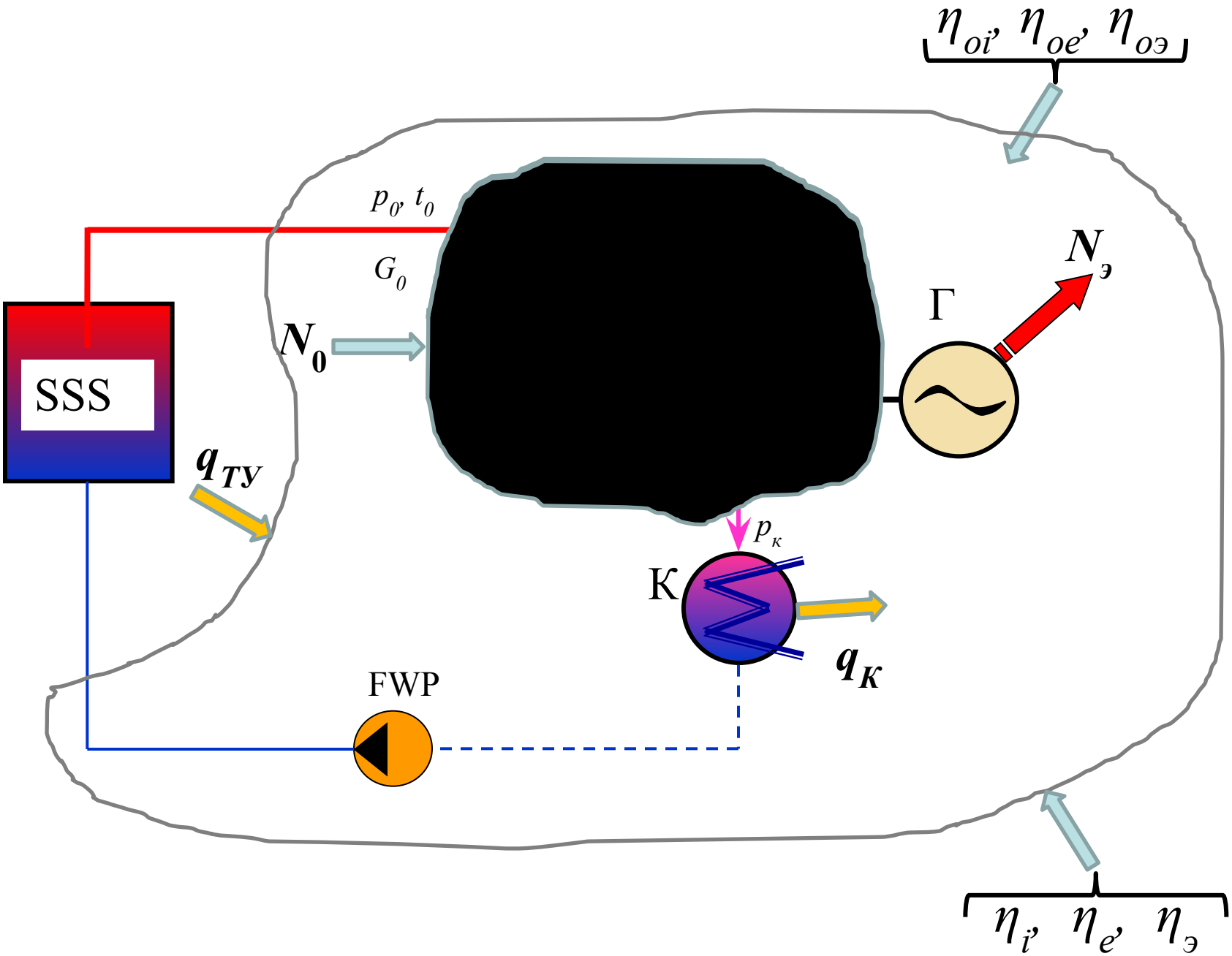
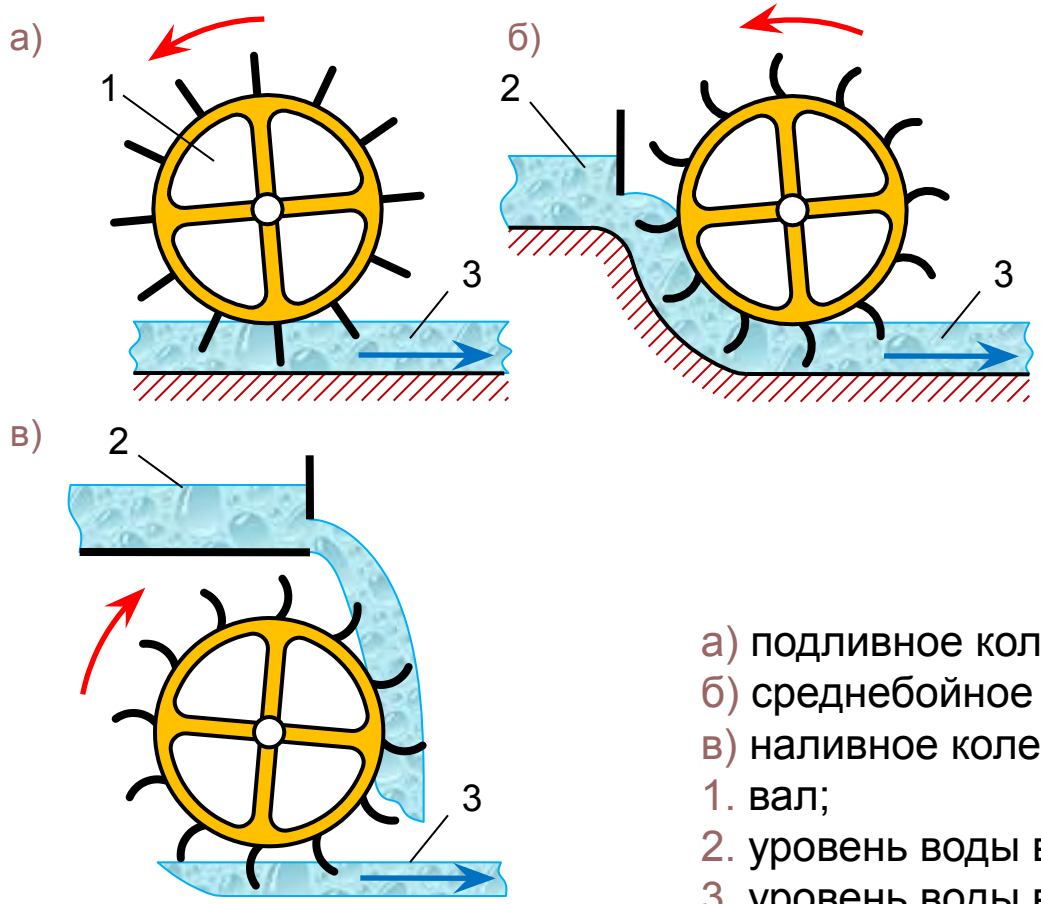

$\eta_{oi}, \eta_{oe}, \eta_{oэ}$
p_0, t_0
G_0
N_0
SSS
$q_{ТУ}$
Г
$N_э$
$p_к$
К
$q_К$
FWP
$\eta_i, \eta_e, \eta_э$

Power and EF of the turbine and turbine equipment

EF / *Power*	Relative EF	Absolute EF	Power
Ideal turbine	1	$\eta_t = \frac{H_0}{q_{ТУ}} = \frac{h_0 - h_{кt}}{h_0 - h_{пв}}$	$N_0 = GH_0$
Internal	$\eta_{oi} = \frac{N_i}{N_0} = \frac{H_i}{H_0}$	$\eta_i = \frac{N_i}{Q_{ТУ}} = \eta_t \eta_{oi}$	$N_i = GH_i = N_0 \eta_{oi}$
Effective	$\eta_{oe} = \frac{N_e}{N_0} = \eta_{oi} \eta$	$\eta_e = \frac{N_e}{Q_{ТУ}} = \eta_t \eta_{oe}$	$N_e = GH_i \eta_{oe} = N_0 \eta$
Electric	$\eta_{oэ} = \frac{N_э}{N_0} = \eta_{oi} \eta_м \eta_{эг}$	$\eta_э = \frac{N_э}{Q_{ТУ}} = \eta_t \eta_{oэ}$	$N_э = GH_0 \eta_{oi} \eta_м \eta_{эг} = N_0 \eta_{oэ}$

Турбомашины АЭС

Водяное колесо



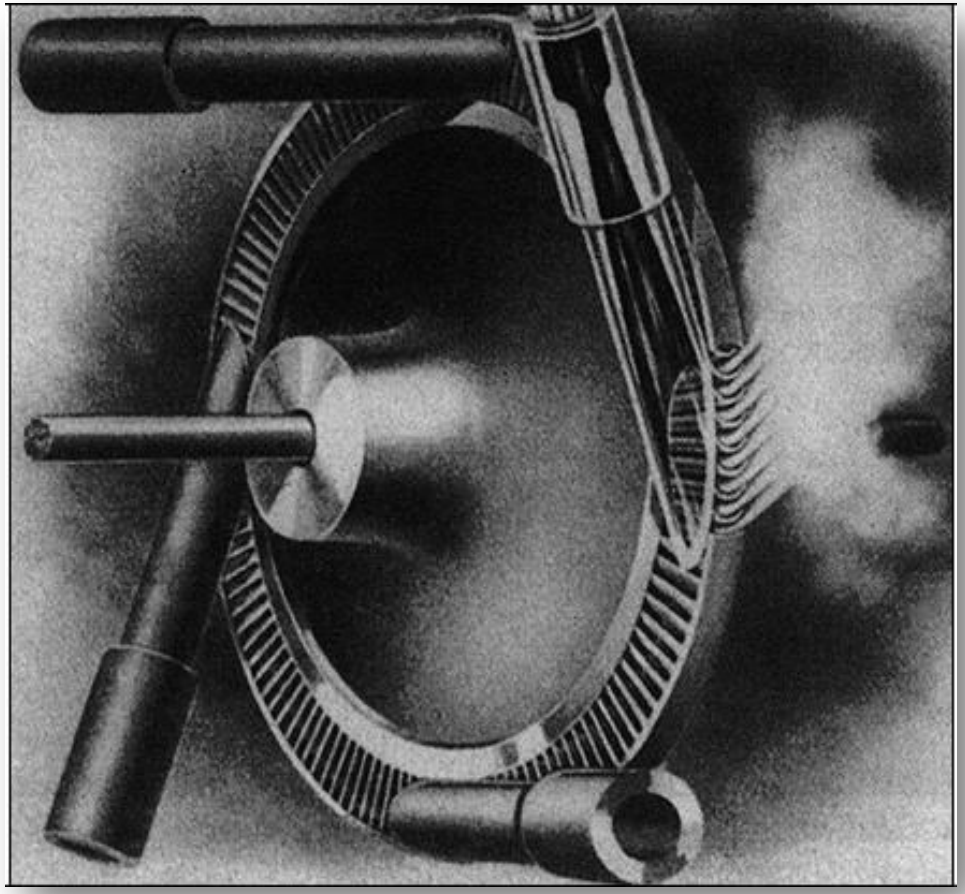
а) подливное колесо;
б) среднебойное колесо;
в) наливное колесо.
1. вал;
2. уровень воды в верхнем бьефе;
3. уровень воды в нижнем бьефе.

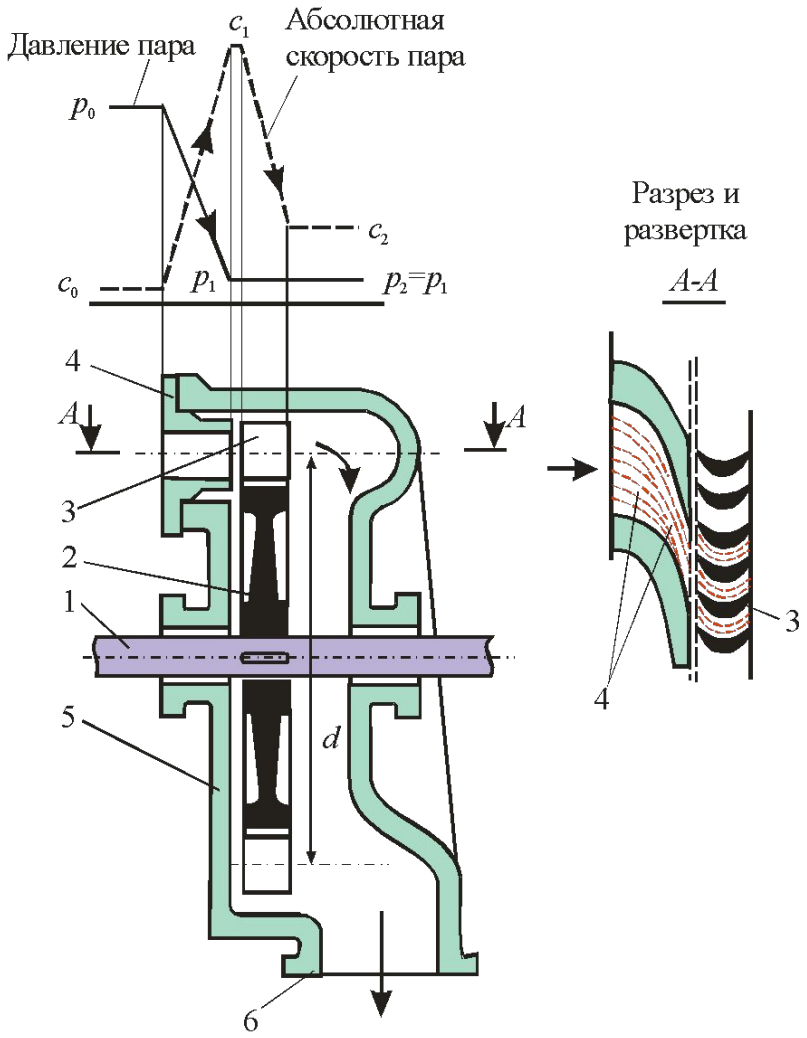
Эолипил Герона

Gustaf de Laval
(1845-1913)

Charles Algernon Parsons
(1854 –1931)

Турбина Лаваля

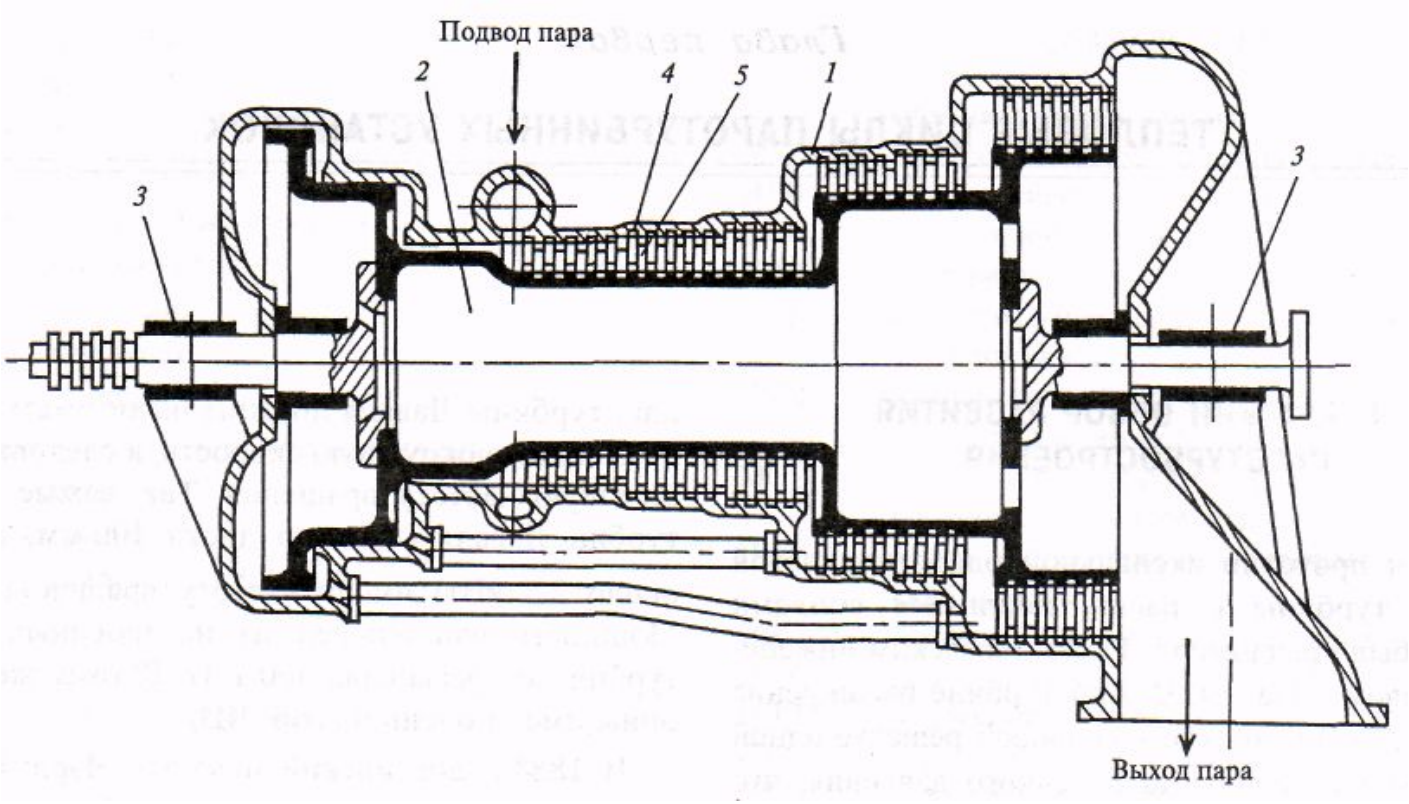




Схематический разрез одноступенчатой активной турбины:

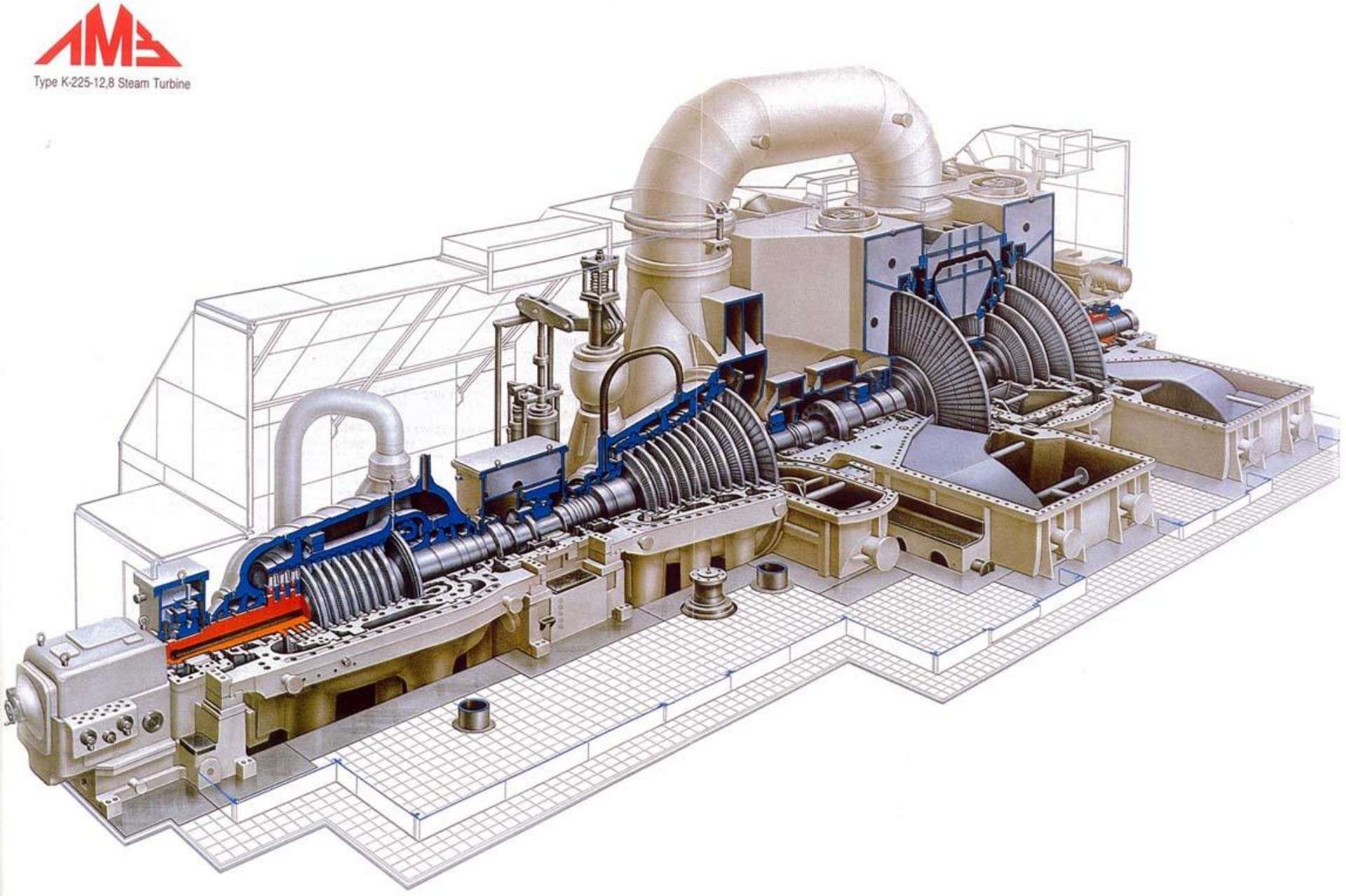
1 - вал; 2 - диск; *3* - рабочие лопатки; *4* - сопловая решетка; 5 - корпус; 6 - выпускной патрубок

Турбина Парсонса

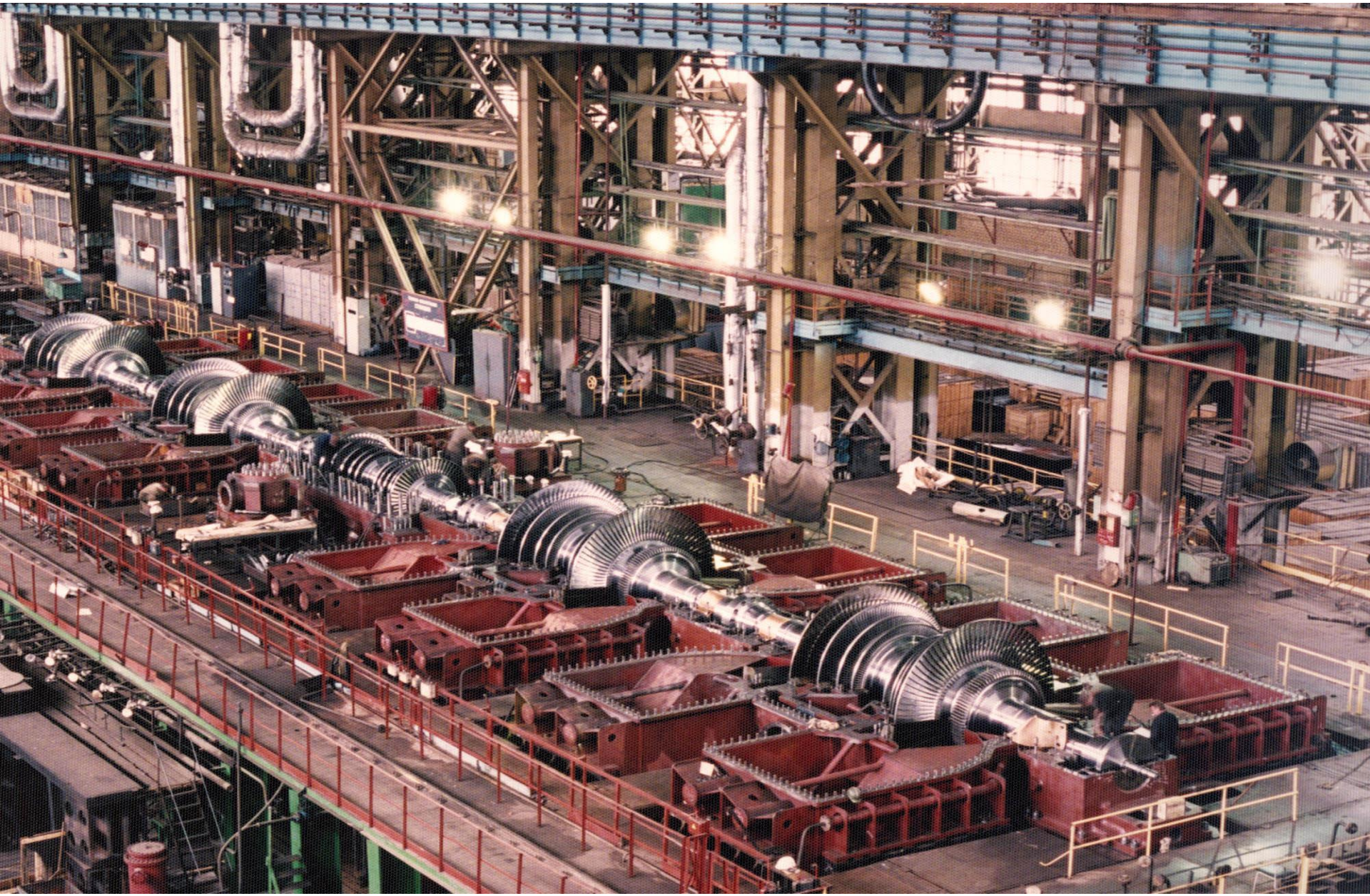


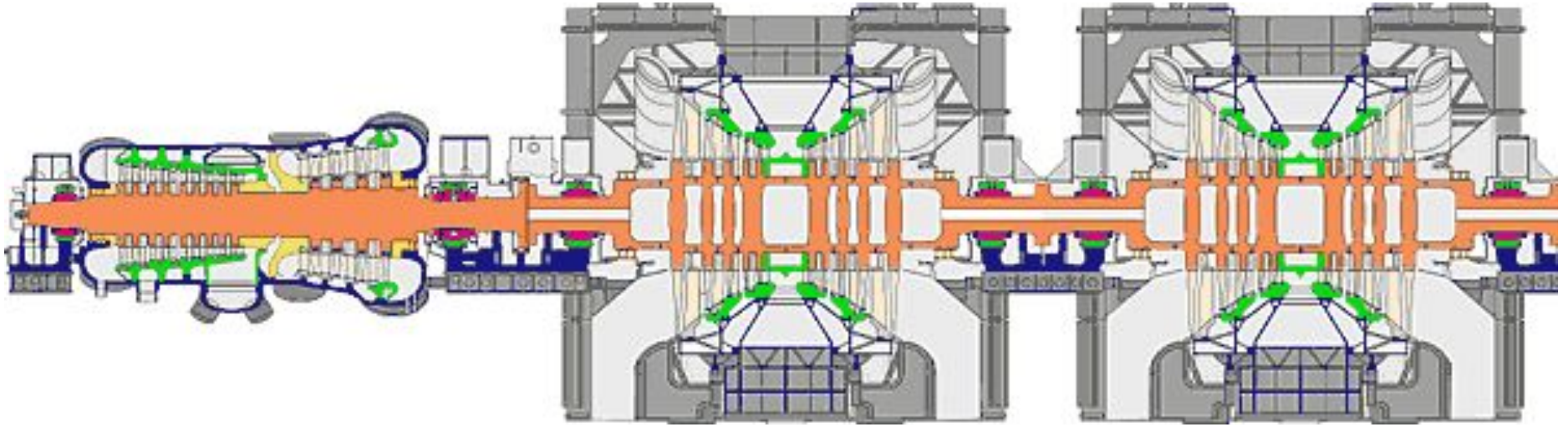
Многоступенчатая реактивная турбина:
1 -корпус; 2 - барабан; 3 - подшипник; 4 - сопловые лопатки одной из ступеней; 5 - рабочие лопатки одной из ступеней

Паровая турбина К-215-12,7



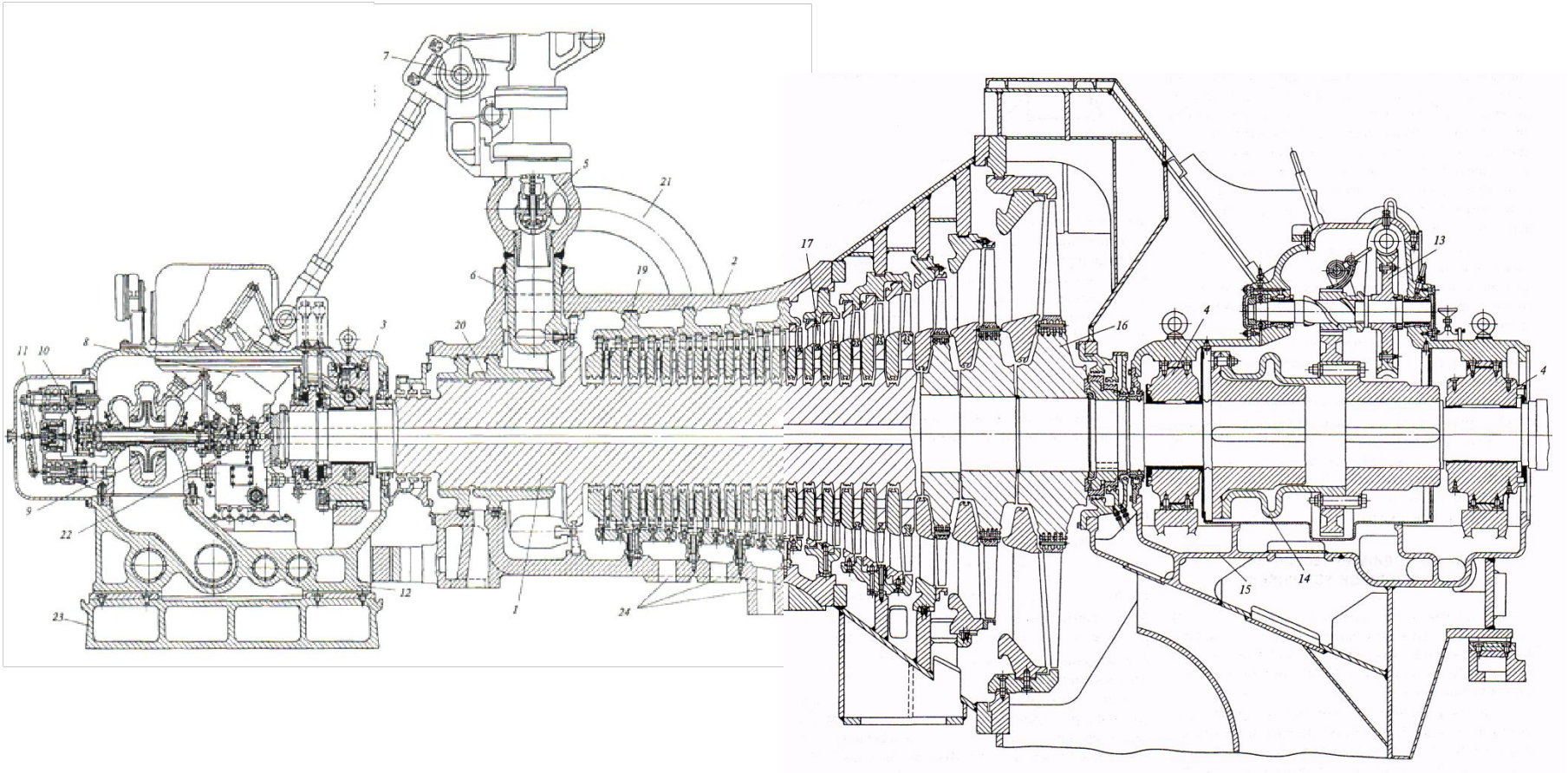
Паровая турбина К-1000-5,8/50 для АЭС на сборочно испытательном стенде ЛМЗ

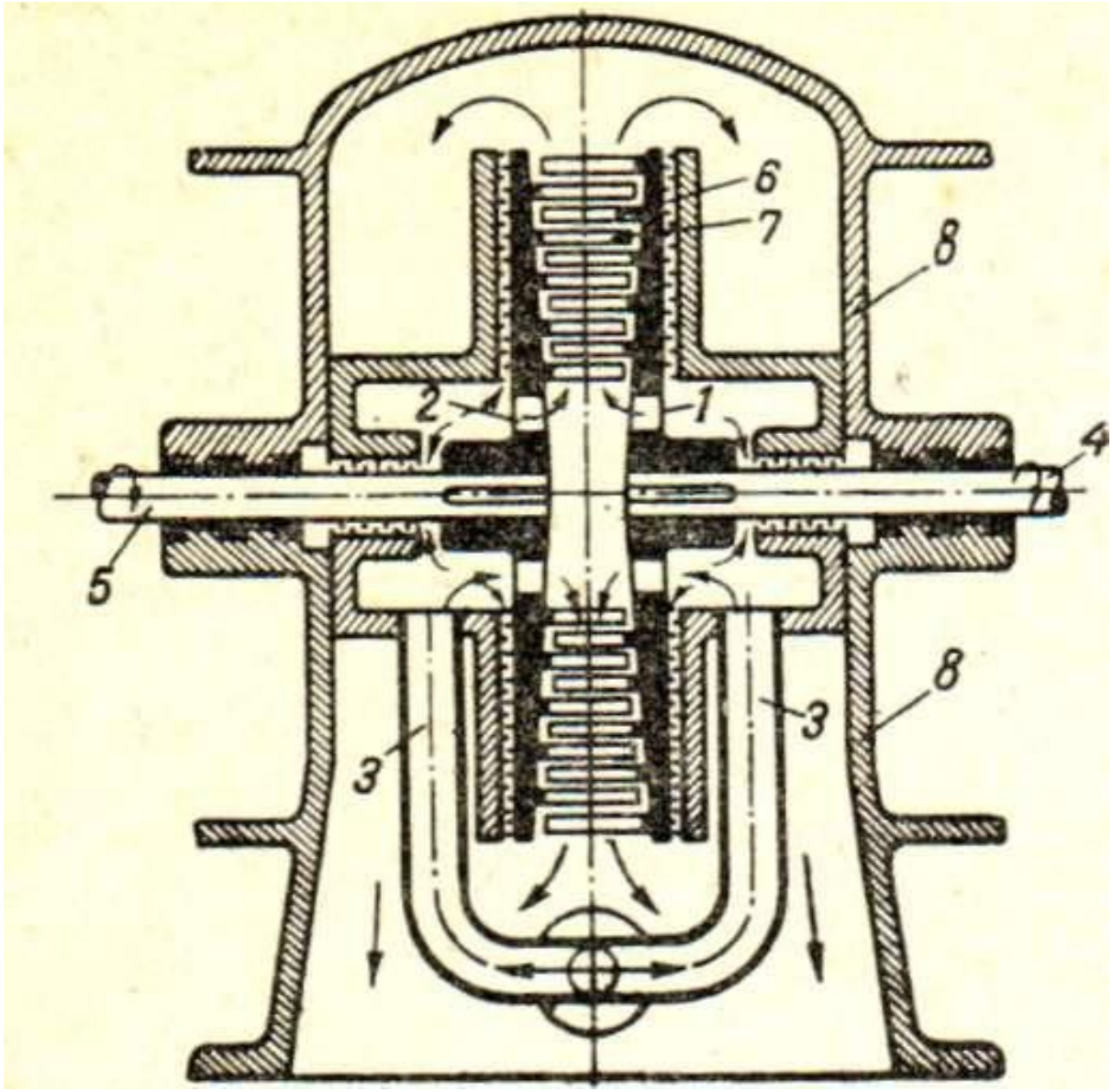




Продольный разрез турбины К-1200-6,8/25 ОАО “Силовые машины”

$l_{\text{посл.ст}}$ = 1740 мм

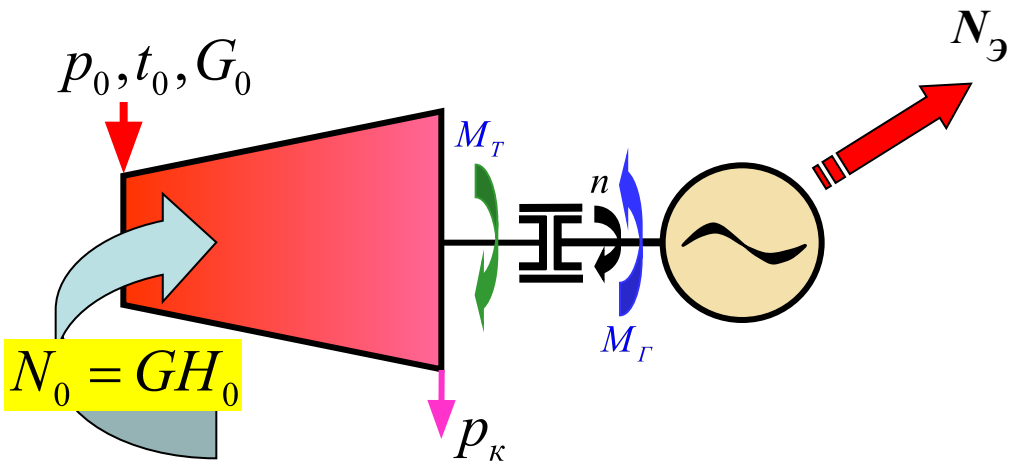

7
5
21
2
17
13
6
19
4
16
3
20
8
11
10
4
9
22
12
1
24
15
14
23



Схематический чертеж **радиальной турбины Юнгстрем.**

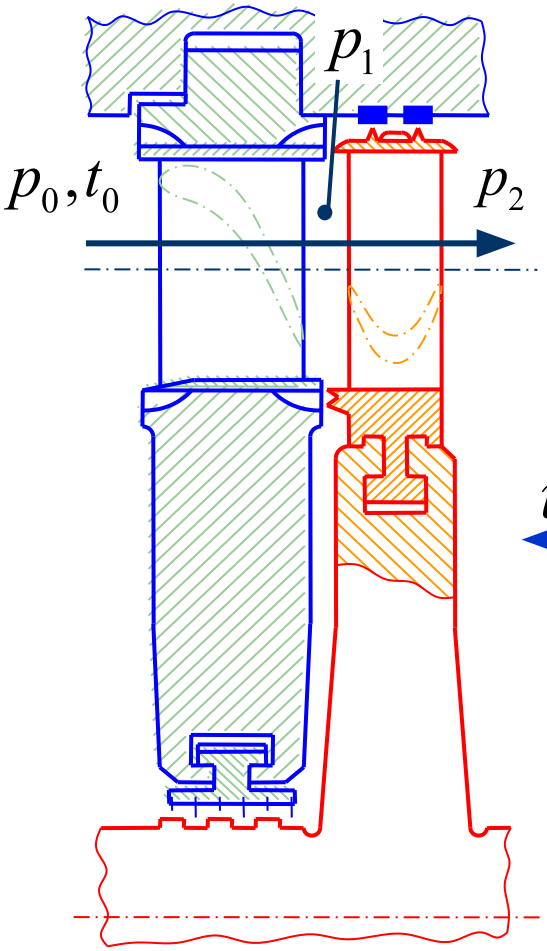
1,2 — диски турбины; 3 — паропроводы свежего пара; *4, 5* — валы турбины; *6,7* — лопатки промежуточных ступеней.

Назначение турбины

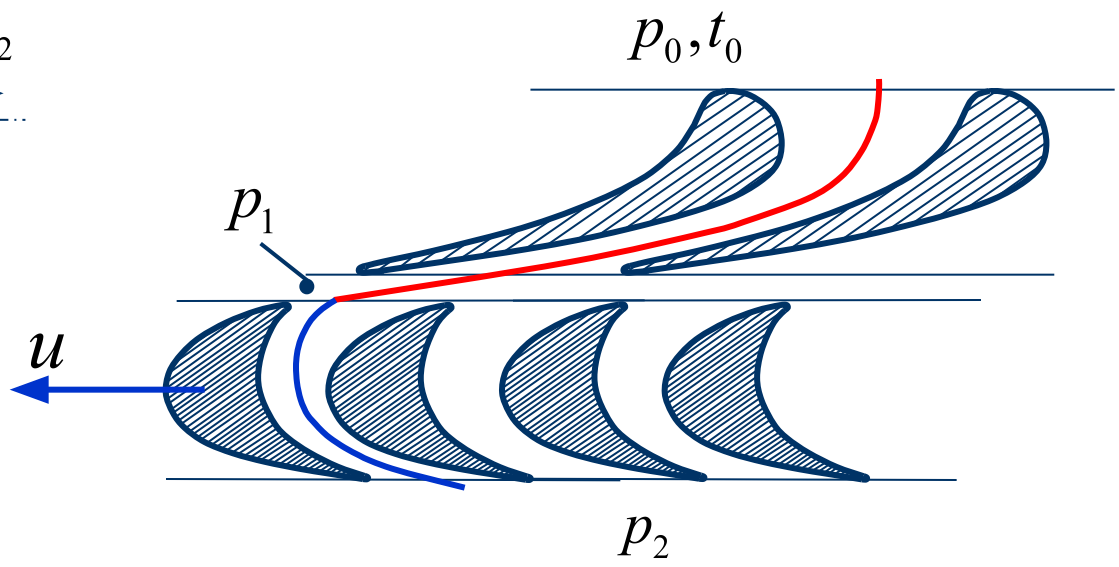


Турбина – двигатель, предназначенный для преобразования потенциальной энергии теплоты в механическую энергию вращения ротора турбины.

2. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА В КАНАЛАХ ТУРБИННЫХ СТУПЕНЕЙ



$p_0 > p_2$



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.

$$p\upsilon = RT$$

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

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

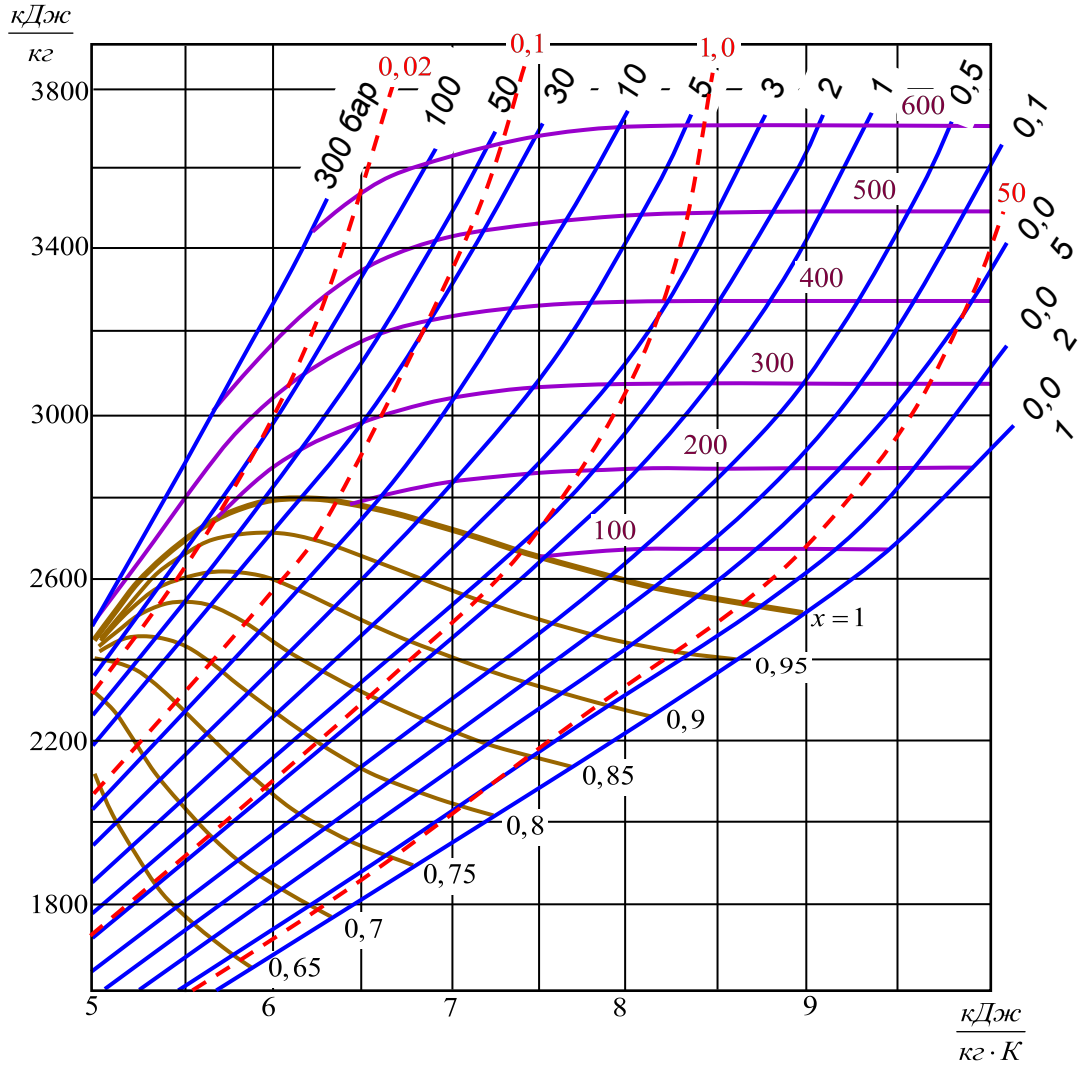
- ✔ для перегретого водяного пара $k = 1,26...1,33$

  для оценочных расчетов можно принять $k_{пп} = 1,3$
- ✔ для сухого насыщеного пара $k_{вп} = 1,135$
- ✔ для воздуха $k_{возд} = 1,4$

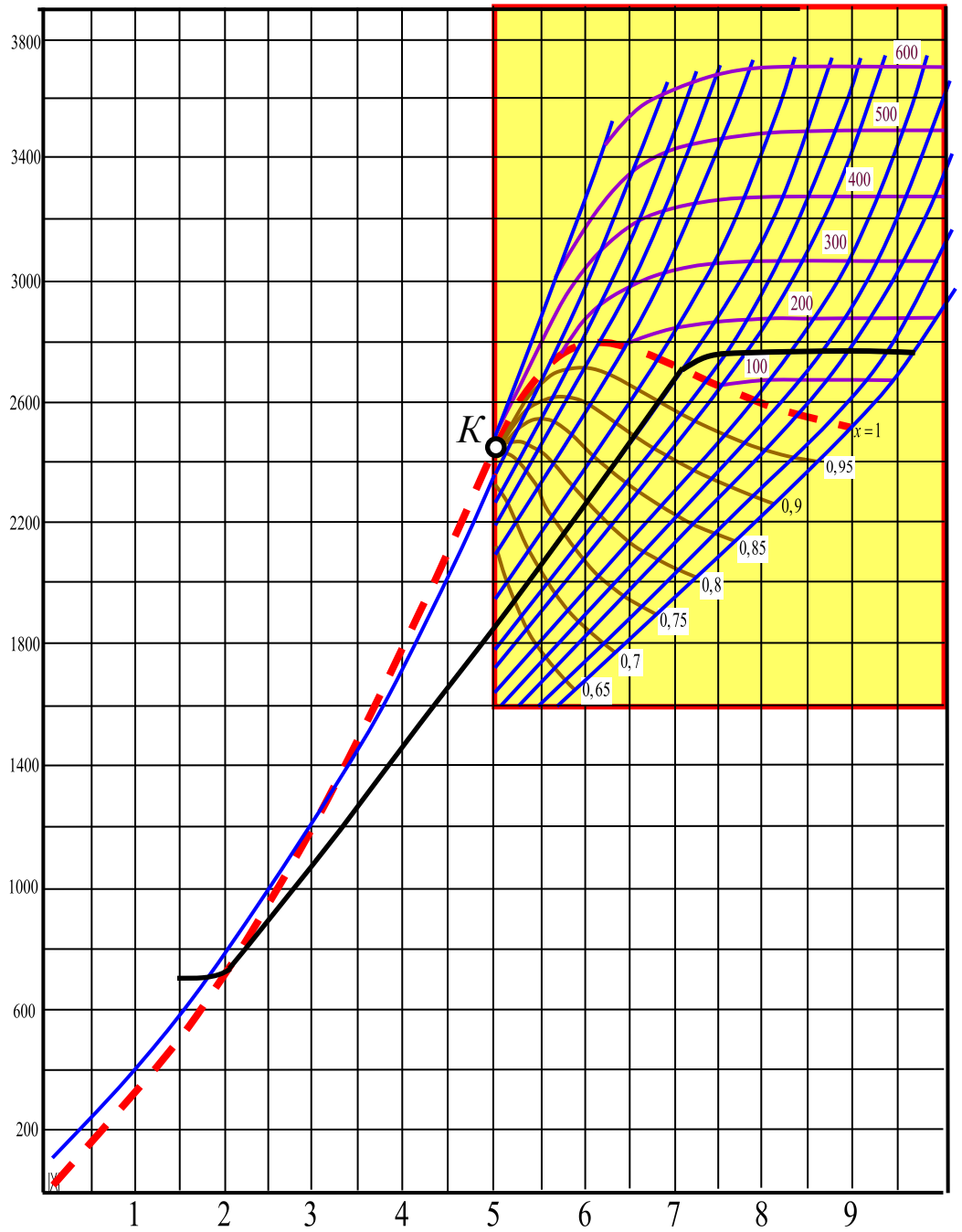
Уравнения состояния в виде формул используются для аналитического описания процессов.

Для практических расчетов используются:

- **таблицы термодинамических свойств;**
- **диаграммы,** построенные на основании таблиц;



изотерма.


3800
3400
3000
2600
2200
1800
1400
1000
600
200
1
2
3
4
5
6
7
8
9
K
600
500
400
300
200
100
x = 1
0,95
0,9
0,85
0,8
0,75
0,7
0,65

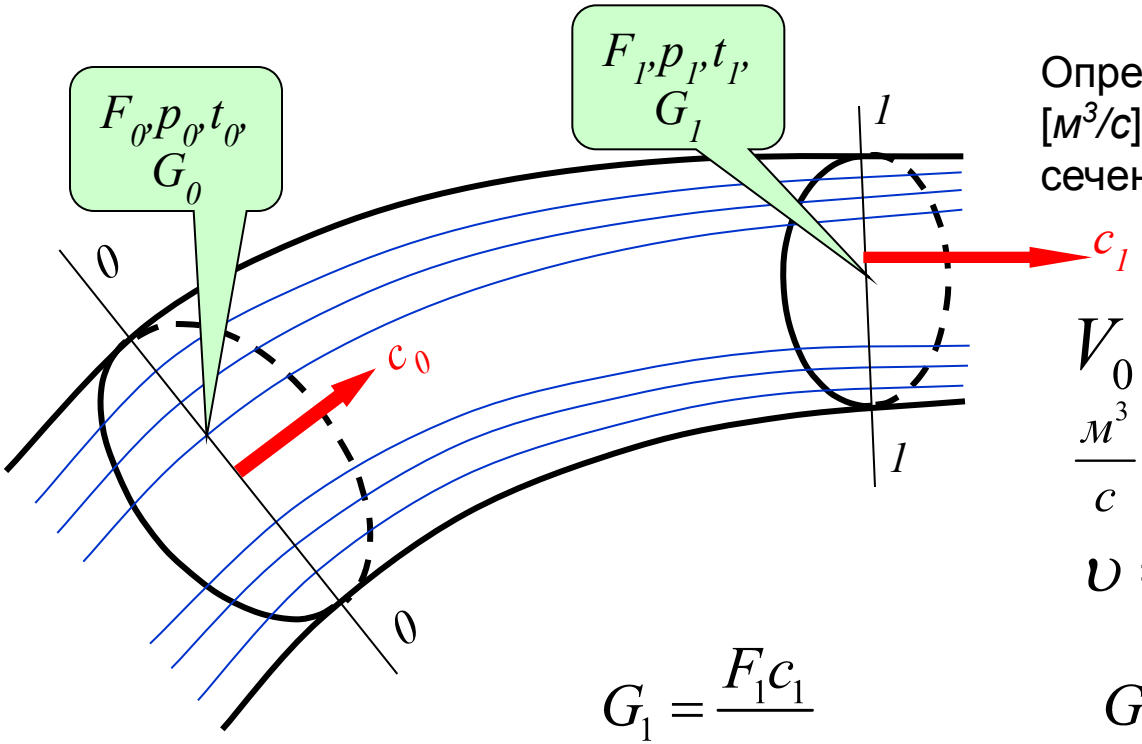
- электронные таблицы,
  выполненные на основе аппроксимации
  таблиц термодинамических свойств.

Изменение состояния происходит в результате совершения термодинамического процесса.

Для нас важен адиабатный процесс – без подвода теплоты извне.
Идеальный адиабатный (изоэнтропийный) процесс описывается уравнением:

$$p\upsilon_t^{\,k} = const$$

2.1.2. Уравнение неразрывности



Определим объемный расход [$м^3/с$], проходящий через сечение 0-0:

$$V_0 = F_0 c_0 = G_0 \upsilon_0$$

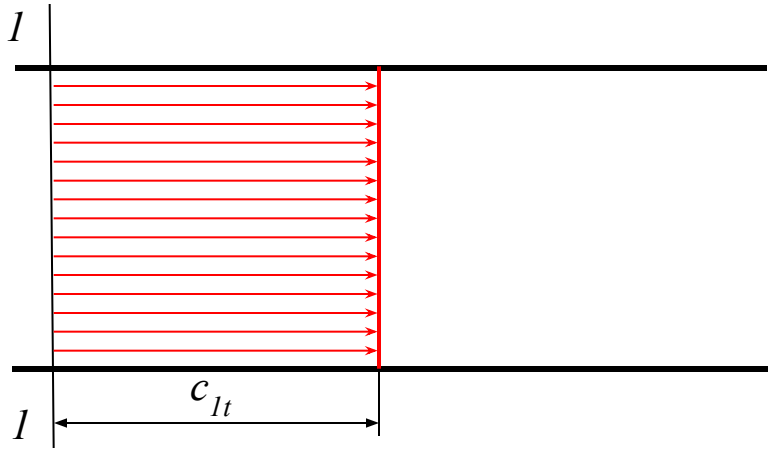
$$\frac{м^3}{с} = м^2 \frac{м}{с} = \frac{кг}{с}\frac{м^3}{кг}$$

$$\upsilon = f\left(p_0, t_0\right)$$

$$G_1 = \frac{F_1 c_1}{\upsilon_1} \qquad G_0 = \frac{F_0 c_0}{\upsilon_0}$$

$$G_0 = G_1 \qquad \frac{F_0 c_0}{\upsilon_0} = \frac{F_1 c_1}{\upsilon_1}$$

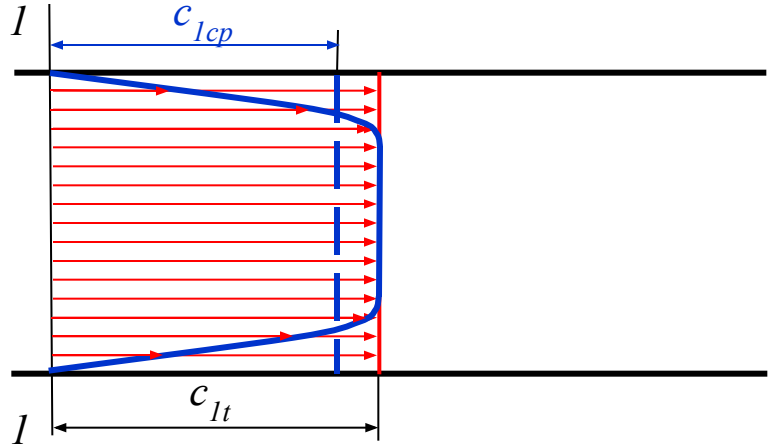
$$\boxed{G = F\frac{c}{\upsilon} = const}$$



а) Идеальное течение – без трения

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

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



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

$$G_{1\partial} = \int_{(F_1)} \frac{c_1}{\upsilon_1} dF_1 = F_1 \frac{c_{\text{ф}p}}{\upsilon_{\text{ф}p}}$$

при этом $c_1 = \gamma\left(F_1\right)$ и $\upsilon_1 = \varphi\left(F_1\right)$

$$\upsilon_{1cp} = f\left(p_1, t_1\right)$$

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

$$G_1 = F_1 \frac{c_1}{\upsilon_1}$$

В общем случае:

$$\boxed{G_i = F_i \frac{c_i}{\upsilon_i}}$$

Уравнение неразрывности в дифференциальной форме

$$G = F\frac{c}{\upsilon} = const$$

Прологарифмируем формулу уравнения неразрывности

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

Продифференцируем это выражение (памятуя, что $G = const$)

$$0 = \frac{dF}{F} + \frac{dc}{c} - \frac{d\upsilon}{\upsilon}$$

$$\boxed{\frac{dF}{F} = \frac{d\upsilon}{\upsilon} - \frac{dc}{c}}$$

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

Канал должен сужаться.

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

Канал должен расширяться.

2.1.3. Уравнение количества движения

А) <u>Понятие количества движения и энергии в динамических системах</u>

Второй закон Ньютона:

- для равноускоренного движения

$$R = ma$$

где ***R*** - сила, *н*; ***m*** - масса, *кг*; ***a*** - ускорение, *м/с*^{2}.

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

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

где ***s*** - расстояние; ***τ*** - время.

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

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

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

$$\int_0^{\tau} Rd\tau = \int_{c_0}^{c} mdc$$

$$R\tau = mc - mc_0$$

Уравнение количества движения

Импульс силы равен изменению количества движения

Изменение количества движения происходит под действием импульса силы

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

$$R = mc\frac{dc}{ds} \longrightarrow Rds = mcdc$$

$$\int_0^{s} Rds = \int_{c_0}^{c} mcdc$$

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

Сила умноженная на путь – механическая работа

Кинетическая энергия

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

I. Феноменологический подход

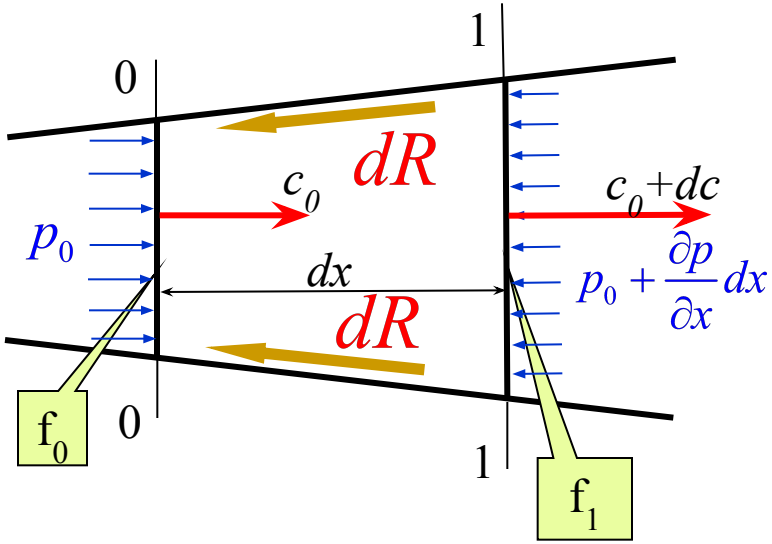
Если известен секундный расход массы $\boldsymbol{G}$ массы[*кг/с*] и скорости потока на входе $\boldsymbol{c_1}$ [*м/с*] и выходе канала $\boldsymbol{c_2}$ [*м/с*], то можно определить силу $\boldsymbol{R}$ [*н*], которая заставила измениться количеству движения

$$R' = G\left(\vec{c}_2 - \vec{c}_1\right)$$

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

$$R = -R' = G\left(\vec{c}_1 - \vec{c}_2\right)$$

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 $dx \to 0$: $\quad f_0 \to f_1 \to f$

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

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

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

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

$$-\upsilon dp - Rdx = \frac{dx}{d\tau}dc \xrightarrow{\frac{dx}{d\tau}=c} \boxed{cdc = -\upsilon dp - Rdx}$$

Уравнение изменения количества движения в одномерном потоке

Интегрируя от 0-0 до 1-1

$$\frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = \int_{p_1}^{p_0} \upsilon dp - \int_{x_0}^{x_1} Rdx$$

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

* <u>Теоретический процесс расширения</u> $R(x) = 0$

$$\frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2} = \int_{p_1}^{p_0} \upsilon dp \qquad \int_{p_1}^{p_0} \upsilon dp = l_{мехн} = h_0 - h_{1t}$$

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

** <u>Действительный процесс расширения</u>

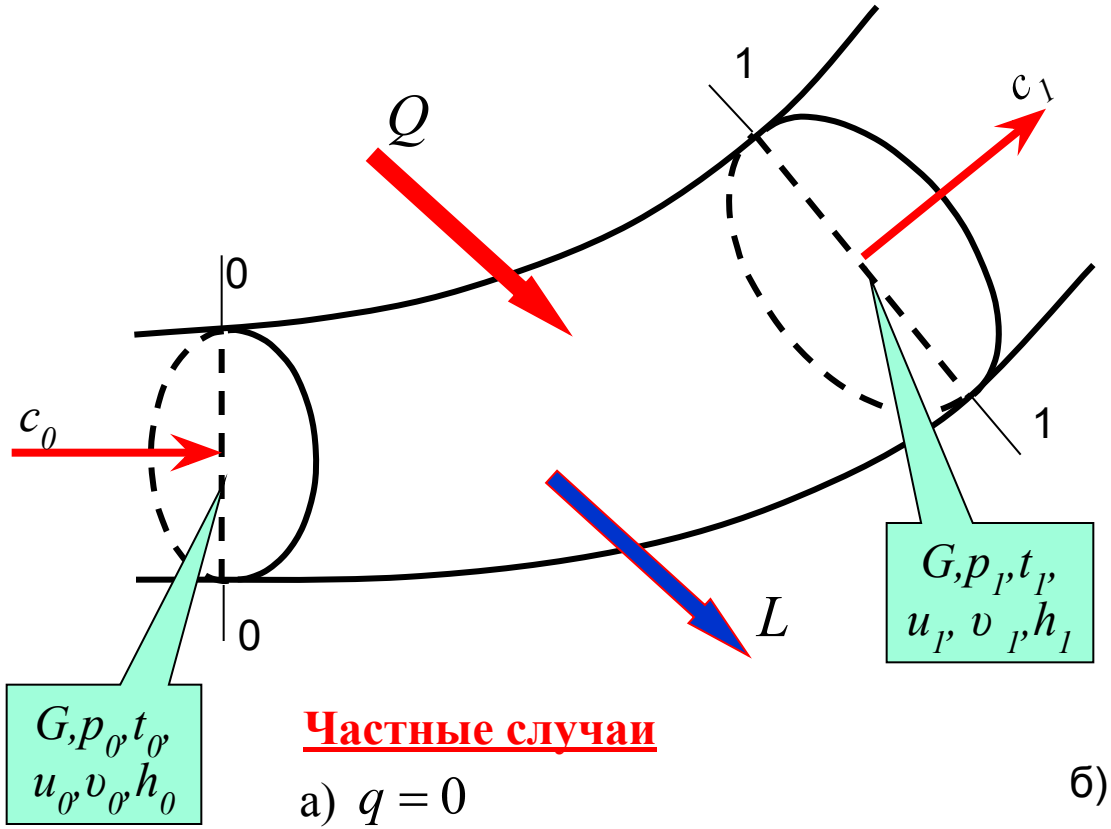
$R = f(x)$ Известно, что $R = f(\Delta, \mathrm{Re} = \varphi(c, \nu, d),$ кривизны канала, …)

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)



Подведенная энергия

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

Отведенная энергия

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

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

Частные случаи

а) $q = 0$

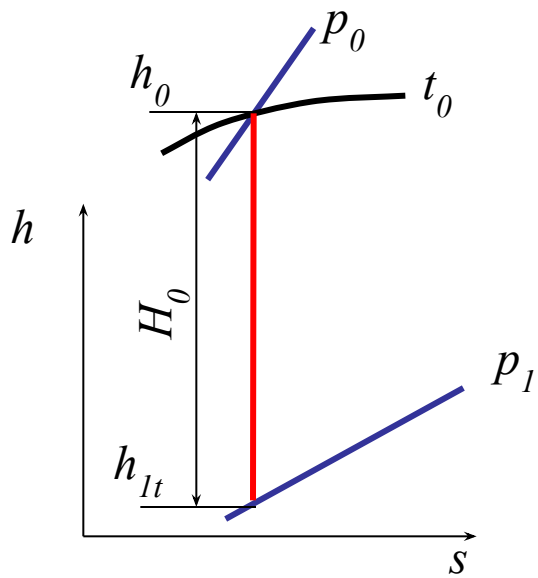
$$\frac{c_0^2}{2} + h_0 = \frac{c_1^2}{2} + h_1 + l$$

б) $q = 0, l = 0$

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

Задано p_0, t_0, p_1. Определить скорость на выходе из канала при $q = 0, l = 0$

* <u>Теоретический процесс расширения</u>



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

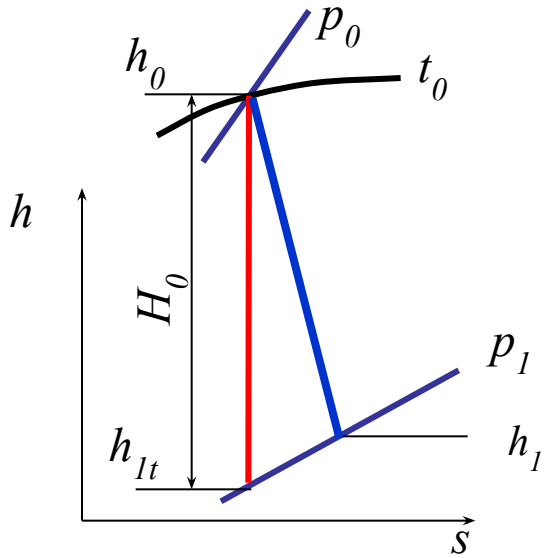
$$c_{1t} = \sqrt{2\left(h_0 - h_{1t}\right) + c_0^2}$$ ⟸ h в Дж/кг

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

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

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

** <u>Действительный процесс расширения</u>



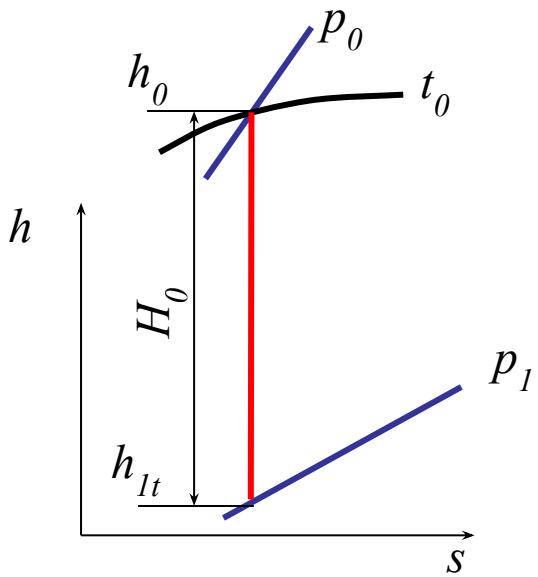
$$\frac{c_0^2}{2} + h_0 = \frac{c_1^2}{2} + h_1$$

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

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

Сравнение использования уравнений количества движения и сохранения энергии

Теоретический процесс расширения



Уравнение количества движения

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

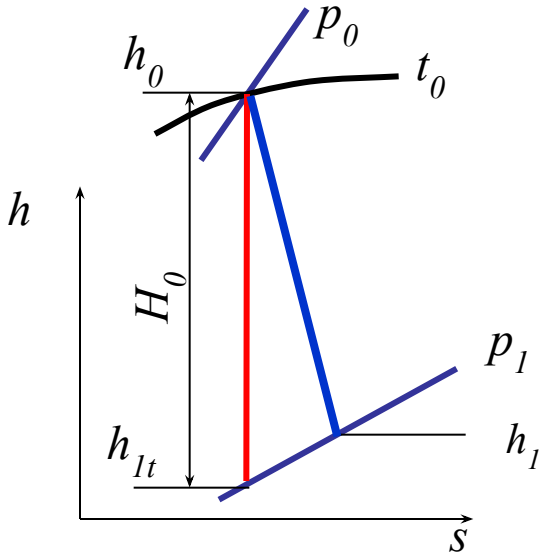
$$c_{1t} = \sqrt{2\left(h_0 - h_{1t}\right) + c_0^2}$$

Уравнение сохранения энергии

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

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

Действительный процесс расширения



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

Необходимо знать термодинамический процесс по длине канала

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

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

Необходимо знать начальное и конечное состояние

*** <u>Ускорение потока</u>

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

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

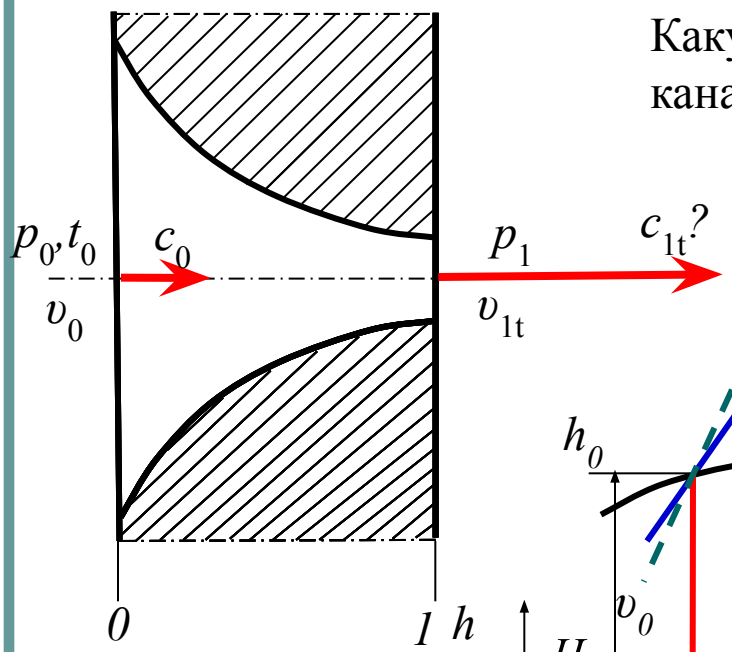
Если $h_1 > h_0$, то $c_1 < c_0$ поток замедляется (диффузорное течение)

2.2. Характеристики потока при изоэнтропийном расширении газа в каналах

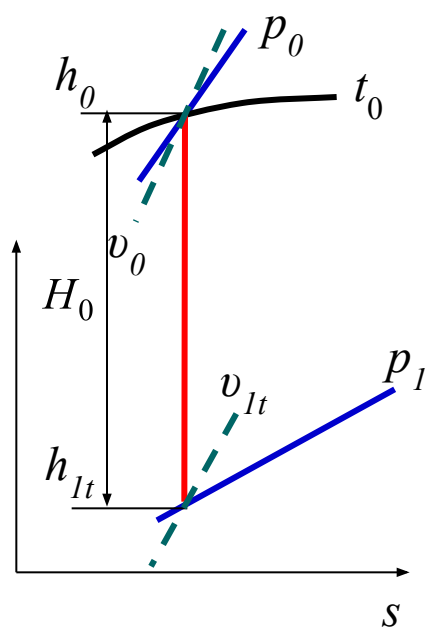
Канал, в котором поток плавно ускоряется, называется **сопловым** или просто **соплом.**

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)?



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

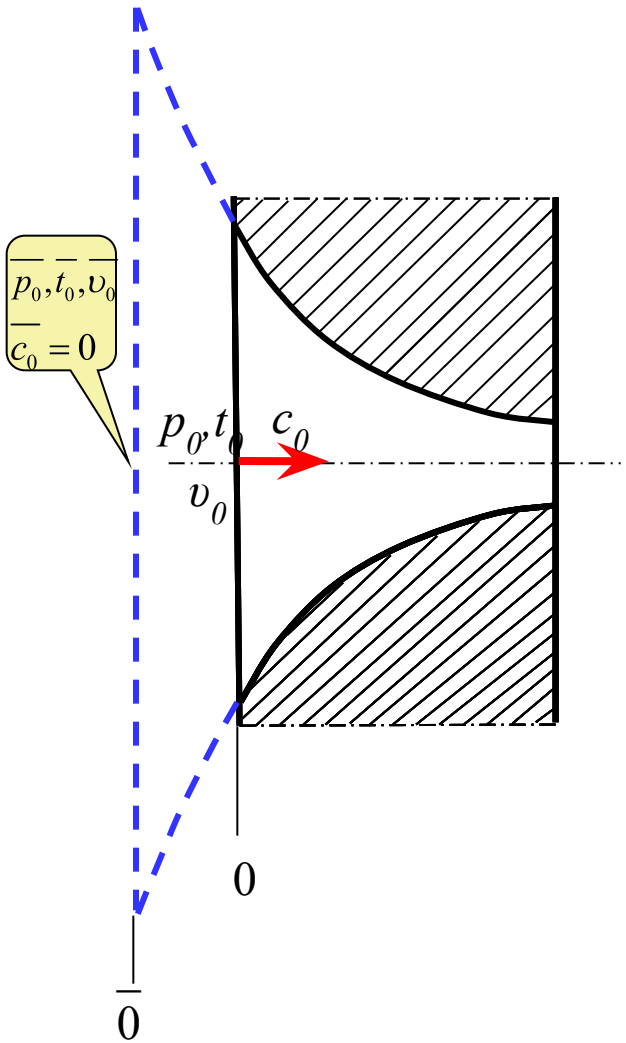
$H_0 = h_0 - h_{1t}$ - располагаемый теплоперепад на канал (по статическим параметрам)

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

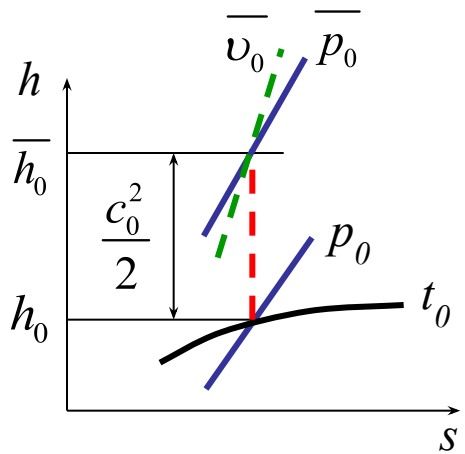
$$\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1}\left(p_0\upsilon_0 - p_1\upsilon_{1t}\right) + \frac{c_0^2}{2}$$

$$\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1}\left(p_0\upsilon_0 - p_1\upsilon_{1t}\right) + \frac{c_0^2}{2}$$

* Параметры торможения. Каким образом появилась скорость c_0?



$$\frac{c_0^2}{2} = \frac{k}{k-1}\left(\overline{p_0}\,\overline{\upsilon_0} - p_0\upsilon_0\right) = \overline{h_0} - h_0$$



$$\overline{p}_0 = p_0 + \frac{c_0^2}{2\upsilon_0};$$

$$\overline{\upsilon}_0 = \upsilon_0 + \frac{c_0^2}{2kp_0}$$

$$\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1}\left(\overline{p}_0\overline{\upsilon}_0 - p_1\upsilon_{1t}\right)$$

$$\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1}\left(\overline{p}_0\overline{\upsilon}_0 - p_1\upsilon_{1t}\right) = \overline{h}_0 - h_{1t}$$

$\overline{H}_0 = \overline{h}_0 - h_{1t}$ - располагаемый теплоперепад на канал (по параметрам торможения на входе)

$$\overline{H}_0 - H_0 = \frac{c_0^2}{2}$$

$$\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1}\overline{p}_0\overline{\upsilon}_0\left(1 - \frac{p_1\upsilon_{1t}}{\overline{p}_0\overline{\upsilon}_0}\right)$$

$$\frac{p_1\upsilon_{1t}}{\overline{p}_0\overline{\upsilon}_0} = \frac{p_1}{\overline{p}_0}\cdot\left(\frac{\overline{p}_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}} = \varepsilon\cdot\varepsilon^{-\frac{1}{k}} = \varepsilon^{\frac{k-1}{k}}$$

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

$$\overline{p}_0\overline{\upsilon}_0^{\,k} = p_1\upsilon_{1t}^k \Longrightarrow \frac{\upsilon_{1t}}{\overline{\upsilon}_0} = \left(\frac{\overline{p}_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}$$

б) Обозначим $\boxed{\varepsilon = \frac{p_1}{\overline{p}_0}}$ отношение давлений на канал (сопло)

$$\boxed{\frac{c_{1t}^2}{2} = \frac{k}{k-1}\overline{p}_0\overline{\upsilon}_0\left(1 - \varepsilon^{\frac{k-1}{k}}\right)}$$