

# Общая энергетика

Францева Алина  
Алексеевна

II-203

# Рекомендуемая литература

1. *Баскаков А.П., Берг Б.В., Вит О.И. Теплотехника.* – М.: Энергия, 1982
2. *Быстрицкий Г.Ф. Общая энергетика: Учеб. пособие для сред. проф. образования: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений.* – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 208 с.
3. *Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции: Учебник для вузов / Под ред. В.Я. Гиршфельда.* – М: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
4. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача* – М.: Энергия, 1981. – 440 с.
5. **Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, Д.П. Лебедева. Т.1.** – М: Энергоатомиздат, 1975. – 744 с.
6. **Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, Д.П. Лебедева. Т.2.** – М: Энергоатомиздат, 1976. – 896 с.

**Методические пособия** <http://tes.power.nstu.ru> → В помощь студенту → методические указания и справочные материалы → h-s диаграмма воды и водяного пара

<http://tes.power.nstu.ru> → *Боруш О.В.* → читаемые дисциплины → Общая энергетика

1. *Шаров Ю. И., Бородихин И.В. Общая энергетика.* Программа, методические указания и контрольные задания № 2524 – Изд-во НГТУ, 2003. – 52 с.
2. *Ю.И. Шаров, П.А. Щинников. Основы теплопередачи.* Сборник лабораторных работ. Методические указания. №4010 - НГТУ, 2010. – 16 с.
3. *Ю.И. Шаров, И.В. Бородихин. Техническая термодинамика. Исследование термодинамических процессов поршневого компрессора.* Методические указания. №2523 - НГТУ, 2003. – 14с.
4. *Ю.И. Шаров, И.В. Бородихин. Теплотехника. Испытания холодильной установки ИФ-56.* Методические указания. №2133 - НГТУ, 2001. – 14с.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

- Ю.И. Шаров, П.А. Щинников. Основы теплопередачи. Сборник лабораторных работ. Методические указания. № 4010 - НГТУ, 2011. – 37 с.
  - ЛР № 1а «Определение коэффициента теплопроводности методом цилиндрического слоя»
  - ЛР № 1б «Определение степени черноты поверхности методом двух эталонов»
  - ЛР № 2 «Исследование процесса теплоотдачи от горизонтального цилиндра к воздуху в условиях свободной конвекции»
- О.К. Григорьева, О.В. Боруш. Исследование термодинамических процессов поршневого компрессора. Методические указания. №4262 - НГТУ, 2013. – 16 с.
  - ЛР № 3 «Исследование термодинамических процессов поршневого компрессора»
- Ю.И. Шаров. Определение характеристик холодильной установки. Методические указания. №3815 - НГТУ, 2010. – 16 с.
  - ЛР № 4 «Определение характеристик холодильной установки»

# РГР

- <http://tes.power.nstu.ru/> → в помощь студенту → Справочные материалы → Методические указания → 31. Шаров Ю.И., Бородихин И.В. **Общая энергетика**. Программа, методические указания и контрольные задания. – Новосибирск: НГТУ. -2003, -52 с.
- Контрольная работа № 1:      Задача 6.1  
Задача 6.2  
Задача 6.3  
Задача 6.4 (цикл Ренкина в  $ph$  -  
диаграмме и процесс расширения пара в турбине  $hs$  – диаграмме)
- Контрольная работа № 2      Задача 7.1  
Задача 7.2  
Задача 7.3  
Задача 7.4

<http://tes.power.nstu.ru/> → в помощь студенту → Справочные материалы → схемы  
→  $ts$ - и  $hs$ -диаграмма воды и водяного пара

# Теория теплообмена

Способы переноса теплоты

**Теплопроводность** – перенос теплоты непосредственным контактом структурных частиц вещества (молекулы, атомы, электроны) с различными температурами (молекулярный процесс)

**Конвекция** – перенос теплоты при перемещении и перемешивании всей массы неравномерно нагретых жидкости или газа

**Излучение (радиация)** - процесс передачи теплоты внутренней энергии тела в виде электромагнитных волн

**Конвективный теплообмен (теплопередача)** – одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью

**Конвективная теплоотдача** – конвективный теплообмен, протекающий между стенкой и жидкостью

**Радиационно-кондуктивный теплообмен** - совместный теплообмен излучением и теплопроводностью

**Сложный теплообмен** - совокупность всех трех видов теплообмена

# Теплопроводность

**Температурное поле** – совокупность значений температуры в данный момент времени для всех точек изучаемого пространства

$$t = f(x, y, z, \tau)$$

**Нестационарное температурное поле** –  $\partial t / \partial \tau \neq 0$

**Стационарное температурное поле** –  $\partial t / \partial \tau = 0$

**Изотермическая поверхность** – поверхность тела с одинаковой температурой

**Температурный градиент** – это вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры

$$\text{grad}t = |\mathbf{grad}t| = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} [\Delta t / \Delta n] \Delta n = \partial t / \partial n$$

**Тепловой поток** – количество теплоты, проходящее через изотермическую поверхность  $F$  в единицу времени

$$Q$$

**Плотностью теплового потока** – тепловой поток, проходящий через единицу площади

$$q = Q / F,$$

# Теплопроводность

**Закон Фурье**  $\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}t$

**Коэффициент теплопроводности** – представляет собой количество теплоты, переносимой в единицу времени через единицу поверхности материала при снижении температуры на один градус на единицу длины

**Общее дифференциальное уравнение теплопроводности**

$$\frac{dt}{d\tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial c^2} \right) + \frac{q_v}{\rho} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{\rho}$$

**Стационарная задача**  $0 = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{\rho}$

# Стационарная теплопроводность

## Для плоской стенки

Плотность теплового потока

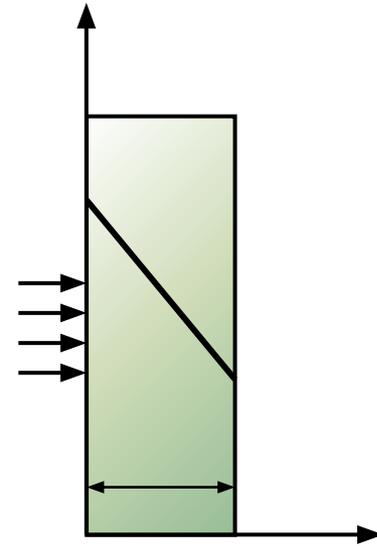
$$q = -\lambda \cdot (t_{ct2} - t_{ct1}) / (x_{ct2} - x_{ct1}) = \lambda \cdot \Delta t / \Delta x = \lambda \cdot \Delta t / \delta$$

Количество теплоты

$$Q = q \cdot F \cdot \tau = (t_{ct1} - t_{ct2}) / R \cdot F \cdot \tau$$

Температура тела в точке  $x$ :

$$t(x) = t_{ct1} - (t_{ct1} - t_{ct2}) \cdot x / \delta$$



## Для плоской многослойной стенки

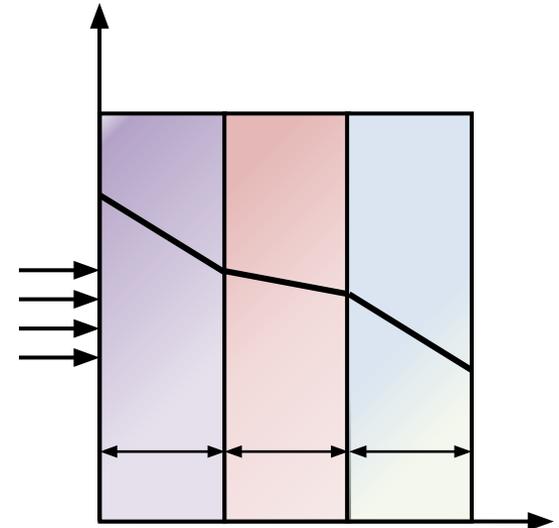
$$q = (t_{ct1} - t_{ct2}) / (\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3) = (t_{ct1} - t_{ct2}) / R_o$$

$$R_o = (\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3)$$

Температура слоев

$$t_{cl1} = t_{ct1} - q \cdot (\delta_1 / \lambda_1)$$

$$t_{cl2} = t_{cl1} - q \cdot (\delta_2 / \lambda_2)$$



# Стационарная теплопроводность

## Для цилиндрической стенки

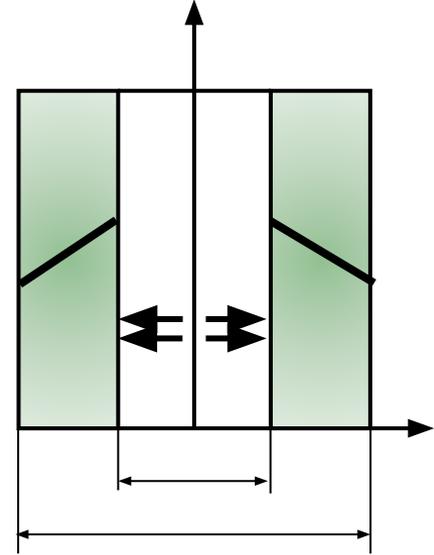
$$Q = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l \cdot \Delta t / \ln(d_2/d_1)$$

Линейная плотность теплового потока

$$q_l = Q/l = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \Delta t / \ln(d_2/d_1),$$

Температура тела внутри стенки

$$t(x) = t_{\text{ср1}} - (t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}) \cdot \ln(d_x/d_1) / \ln(d_2/d_1)$$



## Для многослойной цилиндрической стенки

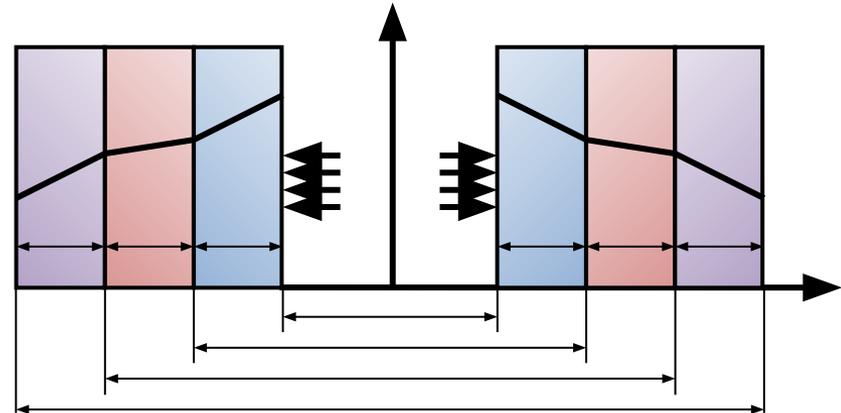
$$Q = 2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}) / [\ln(d_2/d_1)/\lambda_1 + \ln(d_3/d_2)/\lambda_2 + \ln(d_4/d_3)/\lambda_3]$$

$$q_l = 2 \cdot \pi \cdot (t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}) / [\ln(d_2/d_1)/\lambda_1 + \ln(d_3/d_2)/\lambda_2 + \ln(d_4/d_3)/\lambda_3]$$

Температура между слоями

$$t_{\text{сл1}} = t_{\text{ср1}} - q_l \cdot \ln(d_2/d_1) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda_1)$$

$$t_{\text{сл2}} = t_{\text{сл1}} - q_l \cdot \ln(d_3/d_2) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda_2)$$



# Конвективный теплообмен

Факторы, влияющие на процесс конвективной теплоотдачи

## 1. Природа возникновения движения жидкости вдоль поверхности стенки

**Свободная (естественная) конвекция** – теплообмен при самопроизвольном движении жидкости (газа) в поле тяжести, обусловленном разностью плотностей её горячих и холодных слоев

**Вынужденная конвекция** – теплообмен при движении, создаваемом вследствие разности давлений, которые создаются насосом, вентилятором и др. устройствами

## 2. Режим движения жидкости

**Ламинарное движение** – упорядоченное, слоистое, спокойное, без пульсаций движение

**Турбулентное движение** – беспорядочное, хаотическое, вихревое движение

**Переходный режим движения** – движение при возникновении пульсаций и вихрей

## 3. Физические свойства жидкостей и газов: $\lambda$ , $c$ , $\rho$ , $\alpha$ , $\mu$ , $\beta = 1/T$

**4. Форма** (плоская, цилиндрическая), **размеры и положение поверхности** (горизонтально, вертикально)

# Конвективный теплообмен

## Закон Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}) \cdot F \quad q = \alpha \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}})$$

или

Коэффициент теплоотдачи является функцией многих параметров

$$\alpha = f(X; \Phi; l_0; x_c; y_c; z_c; w_0; \theta; \lambda; a; c_p; \rho; \nu; \beta)$$

$X$  – характер движения среды (свободный, вынужденный)

$\Phi$  – форма поверхности

$l_0$  – характерный размер поверхности (длина, высота, диаметр и т.д.)

$x_c; y_c; z_c$  – координаты

$w_0$  – скорость среды (жидкость, газ)

$\theta = (t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}})$  – температурный напор

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды

$a$  – коэффициент температуропроводности среды

$c_p$  – изобарная удельная теплоемкость среды

$\rho$  – плотность среды

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости среды

$\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения среды

# Конвективный теплообмен

## Метод теории подобия

**Подобные явления** – такие физические явления, которые одинаковы качественно по форме и по содержанию, т.е. имеют одну физическую природу, развиваются под действием одинаковых сил и описываются одинаковыми по форме дифференциальными уравнениями и краевыми условиями

## Критерии подобия

- **Критерий Нуссельта**, характеризует конвективный теплообмен между поверхностью стенки и жидкостью (газом)

$$Nu = \alpha \cdot l_0 / \lambda$$

- **Критерий Рейнольдса** – характеризует соотношение сил инерции и вязкости и определяет характер течения жидкости (газа)

$$Re = w \cdot l_0 / \nu$$

- **Критерий Грасгофа** – характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости (газе) вследствие разности плотностей

$$Gr = (\beta \cdot g \cdot l_0^3 \cdot \Delta t) / \nu^2$$

- **Критерий Прандтля** – характеризует физические свойства жидкости (газа)

$$Pr = \nu / a = (\mu \cdot c_p) / \lambda$$

- **Критерий Пекле** – характеризует соотношение молекулярного и конвективного переносов теплоты

$$Pe = w \cdot l_0 / a = Pr \cdot Re$$

# Конвективный теплообмен

## Критериальные уравнения

### *Свободная конвекция в общем виде*

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot Pe^k$$

### *Свободная конвекция в неограниченном пространстве*

$$Nu_{\text{ж}} = C (Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}})^m (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^n$$

### *Вынужденная конвекция*

- при течении жидкости в гладких трубах и каналах

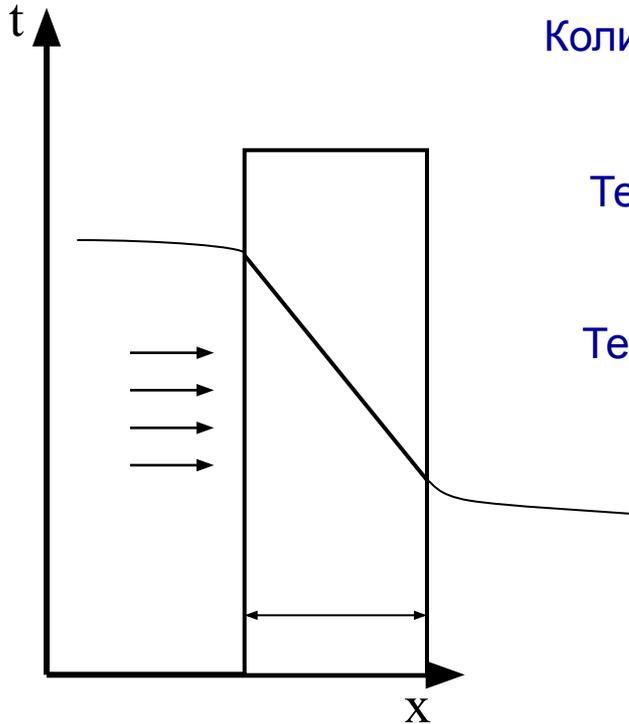
$$Nu_{\text{ж}} = C \cdot Re_{\text{ж}}^m \cdot Pr_{\text{ж}}^n \cdot (Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}})^k \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \cdot \epsilon_l$$

- при обтекание горизонтальной поверхности

$$Nu_{\text{ж}} = C \cdot Re_{\text{ж}}^m \cdot Pr_{\text{ж}}^n \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25}$$

# Теплопередача

## Для плоской стенки



Количество теплоты, переданной от горячей жидкости к стенке

$$Q = \alpha_1 \cdot (t_{ж1} - t_{c1}) \cdot F$$

Тепловой поток, переданный через стенку

$$Q = \lambda/\delta \cdot (t_{c1} - t_{c2}) \cdot F$$

Тепловой поток от второй поверхности стенки к холодной среде

$$Q = \alpha_2 \cdot (t_{c2} - t_{ж2}) \cdot F$$

Суммарный тепловой поток

$$Q = (t_{ж1} - t_{ж2}) \cdot F \cdot k$$

## Для цилиндрической стенки

Тепловой поток

$$Q = \pi \cdot l \cdot (t_{ж1} - t_{ж2}) \cdot k_l$$

# Излучение

Спектр излучения большинства твердых и жидких тел непрерывен

Газы обладают **селективным** (*избирательным*) излучением, т.е. испускают лучи не всех длин волн

**Полный лучистый поток** ( $Q$ ) – суммарное излучение с поверхности тела по всем направлениям полусферического пространства

**Излучательная способность тела** – интегральный лучистый поток, излучаемый единицей поверхности по всем направлениям

$$E = dQ/dF,$$

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D$$

$$A + R + D = 1$$

# Излучение

**Абсолютно черная поверхность** – поглощает все падающие на нее лучи

**Абсолютно белая поверхность** – отражает полностью все падающие на нее лучи

**Абсолютно прозрачное** для тепловых лучей тело:  $D = 1$ ,  $R = 0$  и  $A = 0$ .

**Зеркальная поверхность** – отражает лучи под тем же углом, под которым они падают

**Свойство тел поглощать или отражать тепловые лучи зависят в основном от состояния поверхности, а не от ее цвета**

**Интенсивность излучения** (спектральная интенсивность)

$$E_{0\lambda} = dE_{0\lambda}/d\lambda$$

**Закон Стефана-Больцмана**

$$E_{0\lambda} = C_0 \cdot (T/100)^4$$

# Излучение

**Серое тело** – такое тело, излучательная способность которого не зависит от длины волны

$$E_{\lambda} / E_{0\lambda} = \varepsilon = \text{const}$$

**Степень черноты** – доля излучения серого тела по отношению к излучению абсолютно черного тела при одинаковых температурах

## Интегральное излучение серого тела

$$E_{\lambda} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot (T/100)^4$$

## Теплообмен излучением между твердыми телами

$$Q = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot F_1 \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

# Излучение

## Теплообмен излучением для газов

Уравнение Стефана-Больцмана при излучении газа в пустоту

$$E_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{г}} \cdot \sigma_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 \right]$$

Лучистый теплообмен между газом и окружающей его серой оболочкой

$$Q = \varepsilon_{\text{ст.эф}} \cdot F_{\text{с}} \cdot \sigma_0 \cdot \left[ \varepsilon_{\text{г}} \cdot \left( \frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \varepsilon_{\text{г}} \cdot \left( \frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right]$$

# Техническая термодинамика

**Термодинамика** – наука, изучающая энергию и законы ее превращения из одного вида в другой

**Техническая термодинамика** (ТТ) – раздел термодинамики, рассматривающий взаимопревращения тепловой и механической энергии

**Термодинамическая система** (ТС) – совокупность макроскопических тел, находящихся во взаимодействии между собой и окружающей средой

**Изолированная система** - т/д система не взаимодействующая с окружающей средой (нет обмена веществом и энергией)

**Адиабатная (теплоизолированная) система** – система, которая исключает обмен теплотой с окружающей средой

**Закрытая система** – не допускает обмен своим веществом с окружающей средой

**Открытая система** – допускает обмен своим веществом с окружающей средой

# Параметры состояния

**Параметры состояния** – величины, которые характеризуют физическое состояние системы

**Удельный объем** – объем занимаемый массой в 1 кг этого тела

$$v = V / m, \quad [\text{м}^3/\text{кг}]$$

**Плотность вещества**

$$\rho = m / V = 1 / v, \quad [\text{кг}/\text{м}^3]$$

**Температура** – характеризует степень нагретости тел

$$T = t + 273,15 \quad [\text{К}]$$

**Давление** – определяется как сила, действующая по нормали к единице поверхности тела

$$P = F / S, \quad [\text{Н}/\text{м}^2] = [\text{Па}]$$

# Параметры состояния

## Внесистемные единицы давления

1 кгс/м<sup>2</sup> = 9,81 Па = 1 мм.водн.ст.

1 ат. (техн.атмосфера) = 1 кгс/см<sup>2</sup> = 98,1 кПа

1 атм. (физическая атмосфера) = 101,325 кПа = 760 мм.рт.ст.

1 ат. = 0,968 атм

1 мм.рт.ст. = 133,32 Па

1 бар = 0,1 МПа = 100 кПа = 10<sup>5</sup> Па

**Абсолютное давление (P)** – действительное давление рабочего тела внутри сосуда

**Избыточное давление (P<sub>и</sub>)** – разность между абсолютным давлением в сосуде и давлением окружающей среды

Абсолютное давление

1) при давлении сосуда больше давления окружающей среды:  $P = P_{и} + P_{о}$

2) при давлении сосуда меньше давления окружающей среды:  $P = P_{о} - P_{в}$

# Уравнение состояния

**Уравнение состояния** – математическое уравнение, связывающее основные т/д параметры состояния :  $f(P, v, T) = 0$

**Равновесное состояние** – состояние тела, при котором во всех его точках объема  $P, v, T$  и все другие физические свойства одинаковы

**Идеальный газ** – газ, у которого отсутствуют силы взаимного притяжения и отталкивания между молекулами

## Уравнение идеального газа

Для 1 кг газа:  $P \cdot v = R \cdot T$

Для произвольного количества газа:  $P \cdot V = m \cdot R \cdot T$

Уравнение Клапейрона-Менделеева:  $P \cdot v = R_{\mu} \cdot T / \mu$

# Первый закон термодинамики

**Теплота** – энергия, передаваемая самопроизвольно от более нагретого тела к менее нагретому телу

*Количество теплоты:*  $Q$ , [Дж]

**Работа** – количество энергии, передаваемой при условии перемещения всего тела или его части в пространстве под действием сил ( $L$ , [Дж])

*Работа совершенная над телом* – количество энергии, полученное телом в форме работы

*Затраченная телом работа* – количество энергии, отданное телом в форме работы

**Внутренняя энергия** – совокупность всех видов энергий, заключенной в теле или системе тел

# Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики – закон сохранения и превращения энергии

“Энергия не исчезает и не возникает вновь, она лишь переходит из одного вида в другой в различных физических процессах”.

Для термодинамических процессов закон устанавливает взаимосвязь между теплотой, работой и изменением внутренней энергии т/д системы:

“Теплота, подведенная к системе, расходуется на изменение энергии системы и совершение работы”

$$Q = (U_2 - U_1) + L$$

Если:

$Q > 0$  – теплота подводится к системе

$Q < 0$  – теплота отводится от системы

$L > 0$  – работа совершается системой

$L < 0$  – работа совершается над системой

# Теплоемкость, энтальпия и энтропия

**Теплоемкость** – количество теплоты, которое требуется для изменения температуры на один градус

$$C = dQ / dT ,$$

Удельные теплоемкости:

массовая –  $c = C / m ,$

молярная -  $c_{\mu} = C / \nu ,$

объемная -  $c' = C / V = c \cdot \rho ,$

Уравнение Майера

$$c_p - c_v = R$$

**Средняя теплоемкость** в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$

$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c \Big|_{t_2}^{t_2} - c \Big|_{t_1}^{t_1}}{t_2 - t_1}$$

# Теплоемкость, энтальпия и энтропия

**Энтальпия** – термодинамическая функция, имеющая смысл полной энергии системы

$$h = u + P \cdot v,$$

**Энтропия** – параметр состояния, который характеризует

←  
Меру ценности теплоты, её  
работоспособности

←  
Меру потери работы из-за  
необратимости реальных  
процессов

←  
**Меру беспорядка системы**

Удельная энтропия:  $ds = dq / T,$

# Второй закон термодинамики

Устанавливает

- ✓ возможен или невозможен тот или иной процесс
- ✓ в каком направлении протекает процесс
- ✓ когда достигается термодинамическое равновесие
- ✓ и при каких условиях можно получить максимальную работу



«Теплота не может самопроизвольно переходить от более холодного тела к более нагретому»

«Там где есть разница температур, возможно совершение работы»

# Смесь идеальных газов

**Газовая смесь** – смесь отдельных газов, не вступающих между собой в химические реакции

**Парциальное давление** – это давление, которое имел бы каждый газ, входящий в состав смеси, если бы этот газ находился один в том же количестве, в том же объеме и при той же температуре, что и в смеси

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = \sum P_i$$

Состав смеси задается

$$r_i = V_i / V_{\text{см}}$$

$$g_i = m_i / m_{\text{см}}$$

$$r_i' = v_i / v_{\text{см}}$$

$$\begin{aligned} V_1 + V_2 + \dots + V_n &= V_{\text{см}} \\ m_1 + m_2 + \dots + m_n &= m_{\text{см}} \\ r_1 + r_2 + \dots + r_n &= 1 \\ g_1 + g_2 + \dots + g_n &= 1 \end{aligned}$$

$$g_i = r_i \cdot \mu_i / \mu_{\text{см}} \quad \mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot r_i)$$

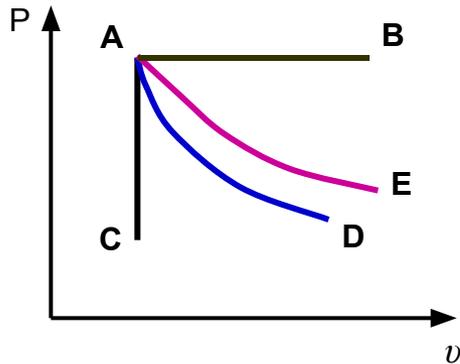
$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n (g_i \cdot R_i) = R_{\mu} \sum_{i=1}^n (g_i / \mu_i) = 1 / \sum_{i=1}^n (r_i / R_i)$$

# Термодинамические процессы

**Термодинамический процесс** – последовательное изменение состояния рабочего тела, происходящее в результате энергетического взаимодействия рабочего тела с окружающей средой

**Обратимый процесс** – процесс, который может быть проведен в обратном направлении так, что рабочее тело и окружающая среда пройдут через те же промежуточные состояния

## Процессы



**AB** – изобарный процесс

**AC** – изохорный процесс

**AD** – адиабатный процесс

**AE** – изотермический процесс

# Термодинамические процессы

Процесс	Рисунок	Уравнение ИГ	I закон термодинамики	Энтропия
Изохорный		$P_2/P_1 = T_2/T_1$	$l = 0;$ $q = \Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1)$	$\Delta s = c_v \cdot \ln(T_2/T_1)$
Изобарный		$v_2/v_1 = T_2/T_1$	$l = P \cdot (v_2 - v_1);$ $q = \Delta u + l = c_p \cdot (t_2 - t_1)$	$\Delta s = c_p \cdot \ln(T_2/T_1)$
Изотермический		$P_1 / P_2 = v_2 / v_1$	$\Delta u = 0;$ $q = l = R \cdot T \cdot \ln(v_2/v_1)$	
Адиабатный		$P \cdot v^k = \text{const};$ $k = c_p/c_v$	$l = -\Delta u = -c_v \cdot (t_2 - t_1) =$ $= R \cdot (T_1 - T_2)/(k - 1) =$ $= R \cdot T_1 \cdot [1 - (v_1/v_2)^{k-1}]/(k - 1)$	$\Delta s = 0$
Политропный	$n = \pm \infty, v = \text{const},$ $n = 0, P = \text{const},$ $n = 1, T = \text{const},$ $n = k, P \cdot v^k = \text{const}.$	$P \cdot v^n = \text{const},$ $n - \text{показатель}$ $\text{политропы}$	$l = R \cdot (T_1 - T_2)/(n - 1) =$ $= R \cdot T_1 \cdot [1 - (v_1/v_2)^{n-1}]/(n - 1)$ $q = c_n \cdot (T_2 - T_1),$ $c_n = c_v \cdot (n - k)/(n - 1)$	$\Delta s = c_v \cdot \ln(T_2/T_1) +$ $+ c_p \cdot \ln(v_2/v_1)$

**Реальные газы** - газы, молекулы которых связаны между собой силами взаимодействия, которые уменьшаются с увеличением расстояния между молекулами

$$P \cdot v / (R \cdot T) = c - \text{коэффициент сжимаемости}$$

### Уравнение Ван-дер-Ваальса

$$(P + a/v^2) \cdot (v - b) = R \cdot T$$

$a$ ,  $b$  – постоянные величины, первая учитывает силы взаимодействия, вторая учитывает размер молекул

$a/v^2$  – характеризует добавочное давление, под которым находится реальный газ вследствие сил сцепления между молекулами и называется *внутренним давлением*

# Понятия о водяном паре

Одно из распространенных рабочих тел в паровых турбинах, паровых машинах, в атомных установках, теплоносителем в различных теплообменниках – водяной пар

**Пар** – газообразное тело в состоянии, близком к кипящей жидкости

**Парообразование** – процесс превращения вещества из жидкого состояния в парообразное

**Испарение** – парообразование, происходящее с поверхности жидкости

**Кипение** – процесс парообразования во всей массе жидкости при некоторой определенной температуре, зависящей от природы жидкости и давления

**Конденсация** – процесс обратный парообразованию

**Сублимация** – процесс перехода твердого вещества непосредственно в пар

**Десублимация** – процесс перехода пара в твердое состояние

**Насыщенный пар** – имеет максимальную плотность, когда скорость конденсации равна скорости испарения

**Сухой насыщенный пар** – пар, в момент испарения последней капли жидкости в ограниченном пространстве без изменения температуры и давления

**Влажный насыщенный пар** – механическая смесь сухого и мельчайших капелек жидкости

**Перегретый пар** – температура выше температуры насыщенного пара того же давления

# Понятия о водяном паре

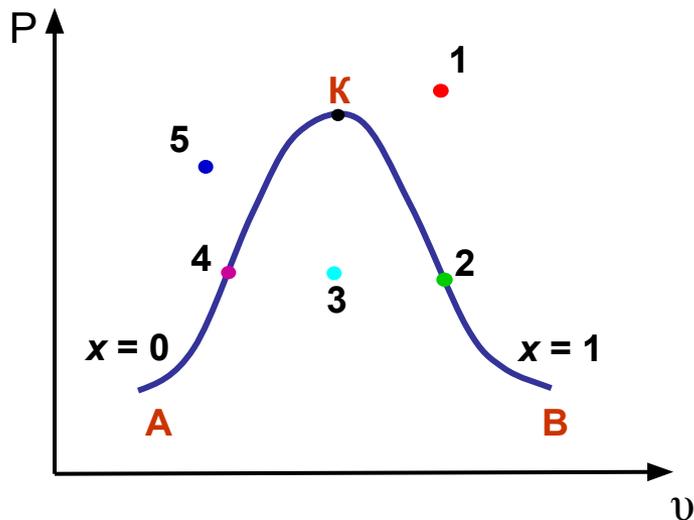
**Степень сухости** – массовая доля сухого пара во влажном паре

$$x = m'' / (m'' + m')$$

**Степень влажности** – массовая доля жидкости во влажном паре

$$y = 1 - x$$

## Фазовая диаграмма для воды и водяного пара



## Параметры влажного пара

$$s = x \cdot s'' + (1 - x) \cdot s'$$

$$h = x \cdot h'' + (1 - x) \cdot h'$$

$$v = x \cdot v'' + (1 - x) \cdot v'$$

# Влажный воздух

**Влажный воздух** – смесь сухого воздуха и водяного пара

**Насыщенный влажный воздух** – смесь сухого воздуха и насыщенного водяного пара (т.е. во влажном воздухе находится максимально возможное для данной температуры количество водяного пара)

**Ненасыщенный влажный воздух** – содержит при данной температуре водяной пар в перегретом состоянии

По закону Дальтона общее давление влажного воздуха

$$P = P_{\text{в}} + P_{\text{п}}$$

**Абсолютная влажность воздуха** – количество водяных паров, находящихся в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха

Абсолютная влажность равна плотности пара при его парциальном давлении и температуре воздуха

**Относительная влажность воздуха** – отношение абсолютной влажности ненасыщенного воздуха к абсолютной влажности насыщенного воздуха при той же температуре

$$\varphi = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{н}} = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{н}} \cdot 100\%$$

**Влагосодержание** – отношение массы пара к массе сухого воздуха

$$d = M_{\text{п}} / M_{\text{в}}$$

$$d = 0,622 \varphi \cdot P_{\text{н}} / (P - \varphi \cdot P_{\text{н}})$$

# Расчет теплообменных аппаратов

## Типы теплообменных аппаратов

**Теплообменный аппарат** – устройство для передачи теплоты от одних тел к другим

### Регенеративный

(горячий теплоноситель отдает свою теплоту аккумулирующему устройству, которое периодически отдает теплоту второй жидкости – холодному теплоносителю, т. е. одна и та же поверхность нагрева омывается то горячей, то холодной жидкостью)

### Смесительный

(передача теплоты от горячей к холодной жидкости происходит при непосредственном смешении обеих жидкостей)

### Рекуперативный

(теплота от горячей к холодной жидкости передается через разделительную стенку, при этом обе среды движутся одновременно)

## Схемы движения жидкостей

### Прямоток

направление движения горячего и холодного теплоносителей совпадают

### Противоток

горячий и холодный теплоносители движутся навстречу друг другу

### Перекрестный ток

горячий теплоноситель движется перпендикулярно движению холодного теплоносителя

# Расчет теплообменных аппаратов

Различают конструкторский и поверочный расчеты т/о аппаратов

**Цель конструкторского расчета** - определение поверхности теплообмена, необходимой для передачи заданного количества тепла

**Цель поверочного расчета** - определение конечных температур теплоносителей при известных геометрических размерах теплообменника

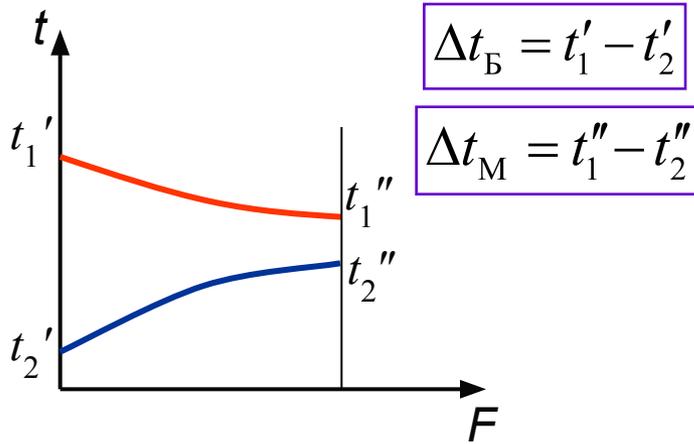
## Расчетные уравнения

Уравнение теплопередачи:  $Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}$

Уравнение теплового баланса  $Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_2'' - t_2')$

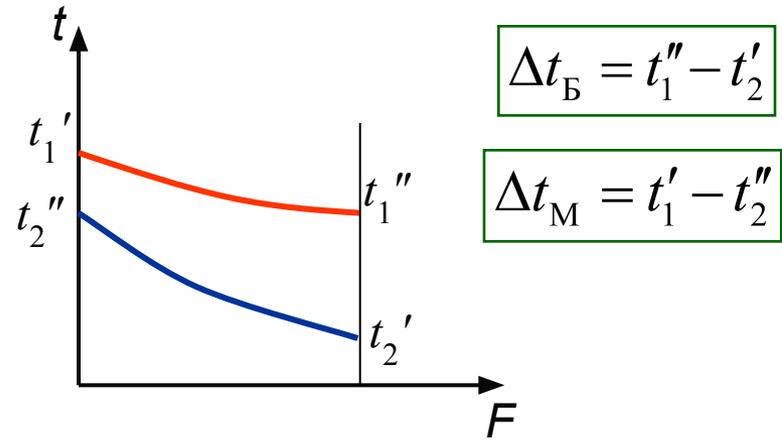
# Расчет теплообменных аппаратов

Температурный график  
для аппаратов с прямотоком



$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{Б}} - \Delta t_{\text{М}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{Б}}}{\Delta t_{\text{М}}}\right)}$$

Температурный график  
для аппаратов с противотоком



$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{Б}} + \Delta t_{\text{М}}}{2}$$

# Термодинамика потока

## Первый закон термодинамики

$$q = \Delta u + \Delta e + l_{\text{прот}} + l_{\text{техн}} = h_2 - h_1 + (w_2^2 - w_1^2)/2 + g \cdot (z_2 - z_1) + l_{\text{техн}}$$

$\Delta e = (w_2^2 - w_1^2)/2 + g \cdot (z_2 - z_1)$  – изменение энергии системы, состоящее из изменения кинетической и потенциальной энергий

**Сопло** – канал, по которому при перемещении газа происходит расширение газа с уменьшением давления и увеличением скорости

**Диффузор** – канал, по которому при перемещении газа происходит сжатие рабочего тела с увеличением его давления и уменьшением скорости

## Критическое давление и скорость

**Скорость истечения** (на выходе из канала)

$$w_2 = \sqrt{2 \cdot (h_1 - h_2)} = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{k}{k-1}\right) \cdot P_1 \cdot v_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}$$

**Массовый секундный расход газа**

$$m = \frac{f \cdot w}{v_2} = f \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{k}{k-1}\right) \cdot \frac{P_1}{v_1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}$$

# Термодинамика потока

**Критическое давление** – давление в выходном сечении канала, при котором достигается максимальный расход газа

$$P_K = P_2 = \beta_K \cdot P_1$$

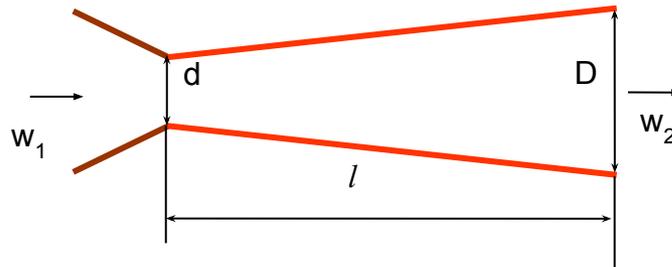
**Критическая скорость** – скорость газа в выходном сечении канала, при давлении равном или меньшем критического

$$w_K = \sqrt{2 \cdot \left( \frac{k}{k+1} \right) \cdot P_1 \cdot v_1}$$

Критическая скорость зависит только от начальных параметров, его природы и **равна** скорости звука газа ( $a$ ) при критических параметрах

$$w_K = a = \sqrt{k \cdot P_K \cdot v_K}$$

**Сопло Лавая** – комбинированное сопло, предназначено для использования больших перепадов давления и для получения скоростей истечения, превышающих критическую или скорость звука



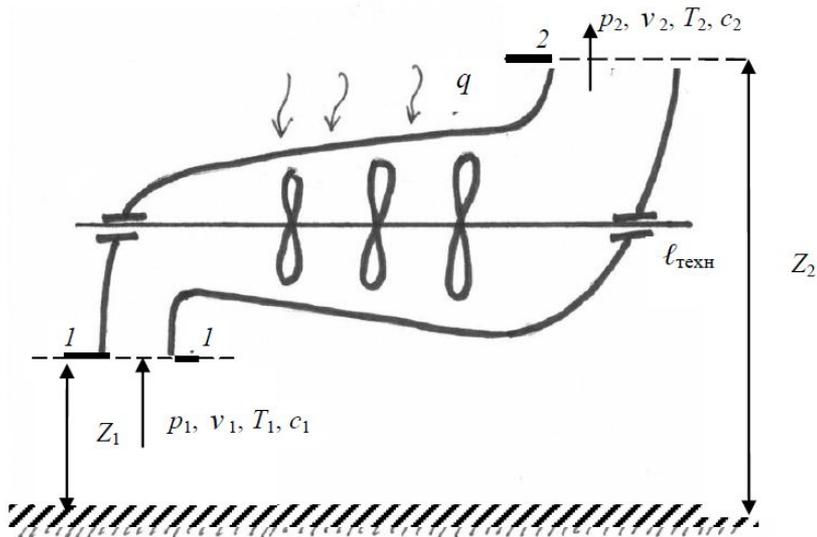
# Термодинамика потока

**Дросселирование** – явление, при котором пар или газ переходит с высокого давления на низкое без совершения внешней работы и без подвода или отвода теплоты

Любой кран, вентиль, задвижка, клапан и прочие местные сопротивления, уменьшающие проходное сечение трубопровода, вызывают **дросселирование**

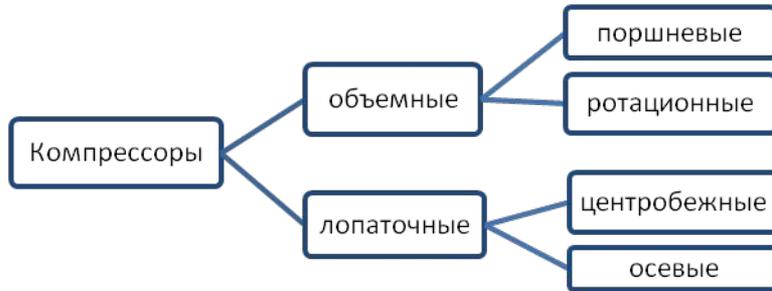
**Дросселирование** – необратимый процесс, при котором увеличивается энтропия и уменьшается работоспособность рабочего тела

**Уравнение процесса дросселирования**  $h_1 = h_2$

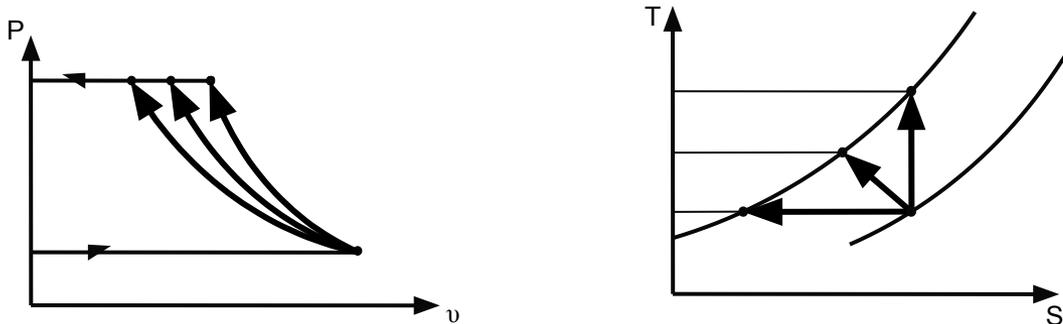


# Анализ процессов в компрессоре

**Компрессор** – устройство, предназначенное для сжатия газа



## Одноступенчатый поршневой компрессор



**Теоретическая работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг газа**

$$L_T = P_1 \cdot v_1 \cdot \ln(P_2/P_1)$$

$$L_{ад} = k(P_2 \cdot v_2 - P_1 \cdot v_1)/(k - 1) = k \cdot P_1 \cdot v_1 [(P_2/P_1)^{(k-1)/k} - 1]/(k - 1)$$

$$L_{пол} = n(P_2 \cdot v_2 - P_1 \cdot v_1)/(n - 1) = n \cdot P_1 \cdot v_1 [(P_2/P_1)^{(n-1)/n} - 1]/(n - 1)$$

# Анализ процессов в компрессоре

## Относительный внутренний КПД компрессора

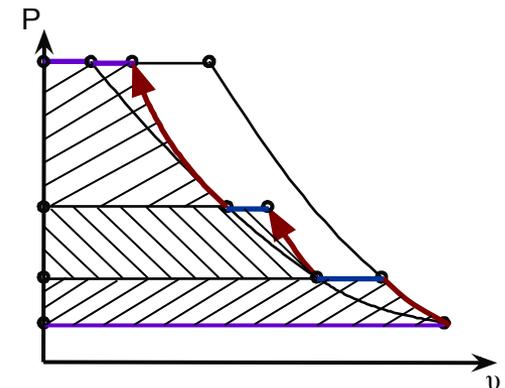
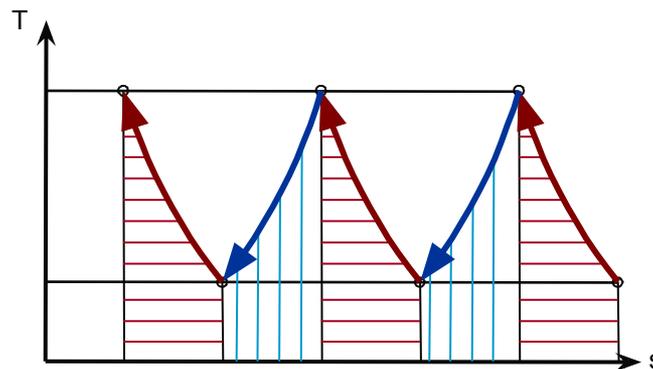
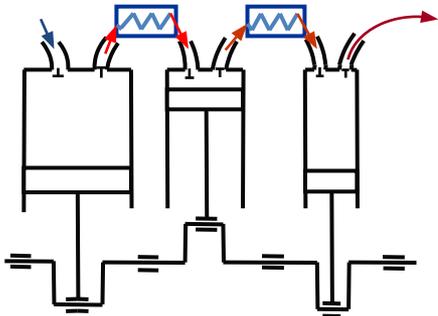
**Изотермический КПД** (отношение работы, затраченной на привод компрессора при изотермическом сжатии к затраченной работе действительного компрессора)

$$\eta_{\text{из}} = \frac{\ln(\pi_{\kappa})}{\left(\frac{n}{n-1}\right) \cdot \left(\pi_{\kappa}^{\frac{n-1}{n}} - 1\right)}$$

**Адиабатный КПД** (отношение работы, затраченной на привод компрессора при адиабатном сжатии к затраченной работе действительного компрессора)

$$\eta_{\text{ад}} = \frac{\left(\pi_{\kappa}^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) \cdot \frac{k}{k-1}}{\left(\pi_{\kappa}^{\frac{n-1}{n}} - 1\right) \cdot \frac{n}{n-1}}$$

## Многоступенчатый поршневой компрессор

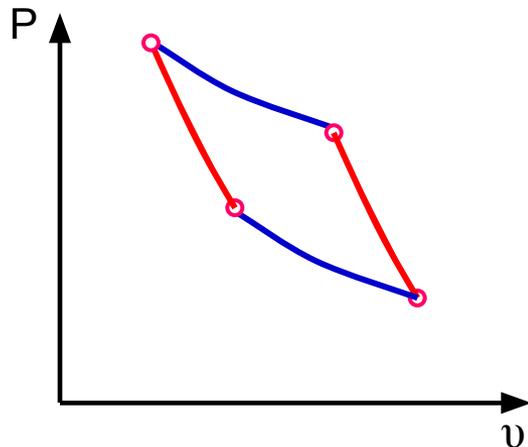


# Термодинамические циклы

## Цикл Карно

**Цикл** – совокупность замкнутых процессов

**Цикл Карно** – круговой цикл, состоящий из 2-х изотермических и 2-х адиабатных процессов



1-2 – обратимое адиабатное расширение

2-3 – изотермическое сжатие, отвод теплоты  $q_2$   
к холодному источнику от рабочего тела

3-4 – обратимое адиабатное сжатие

4-1 – изотермическое расширение, подвод теплоты  $q_1$   
от горячего источника к рабочему телу

**Термический коэффициент полезного действия**

$$\eta_t = L_{\text{ц}} / Q_{\text{ц}} = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = (T_1 - T_2) / T_1$$

# Термодинамические циклы

## Цикл двигателей внутреннего сгорания (ДВС)

**Цикл Отто:** с подводом теплоты при постоянном объеме (карбюраторные ДВС)

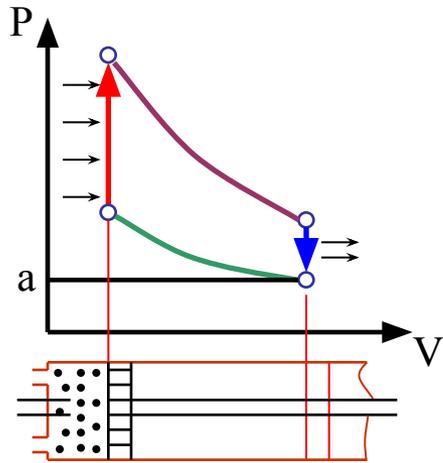


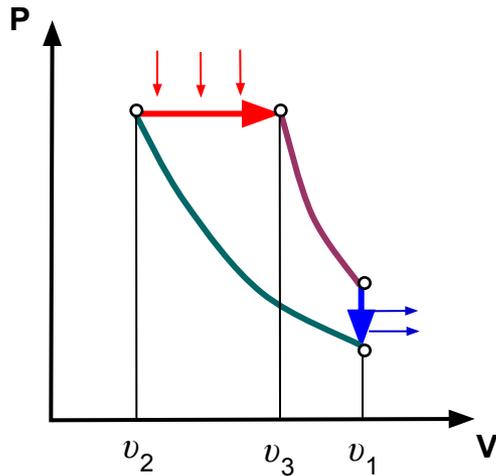
Диаграмма реального двигателя

### Термический к.п.д. цикла Отто

$$\eta_t = 1 - q_2/q_1 = 1 - c_v \cdot (T_4 - T_1) / (c_v \cdot (T_3 - T_2)) = 1 - 1/\epsilon^{k-1}$$

# Термодинамические циклы

**Цикл Дизеля:** с подводом теплоты при постоянном давлении (компрессорные дизели)



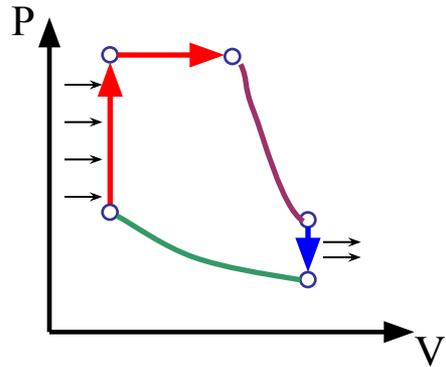
PV диаграмма цикла

**Термический к.п.д. цикла Дизеля**

$$\eta_t = 1 - q_2/q_1 = 1 - \frac{c_v \cdot (T_4 - T_1)}{(c_p \cdot (T_3 - T_2))} = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \cdot \varepsilon^{k-1} (\rho - 1)}$$

# Термодинамические циклы

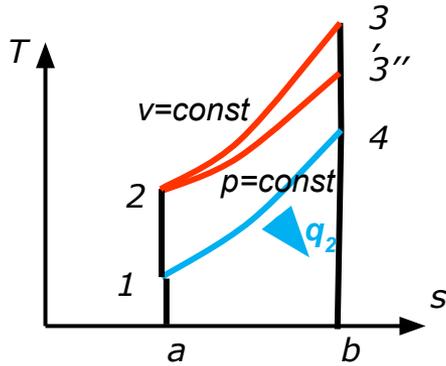
**Цикл Тринклера:** смешанный подвод теплоты ( $V=\text{const}$  и  $P=\text{const}$ )



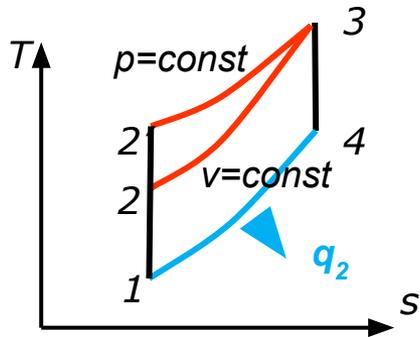
**Термический к.п.д. цикла Тринклера**

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{2v}}{q_{1v} + q_{1p}} = 1 - \frac{(T_5 - T_1)}{(T_3 - T_2) + k(T_4 - T_3)} = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]}$$

## Сравнение циклов Отто и Дизеля при $\epsilon = \text{const}$

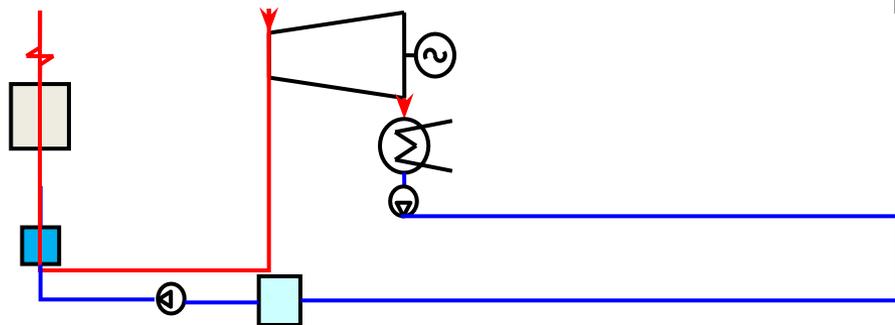


## Сравнение циклов ДВС $T_3 = \text{const}$

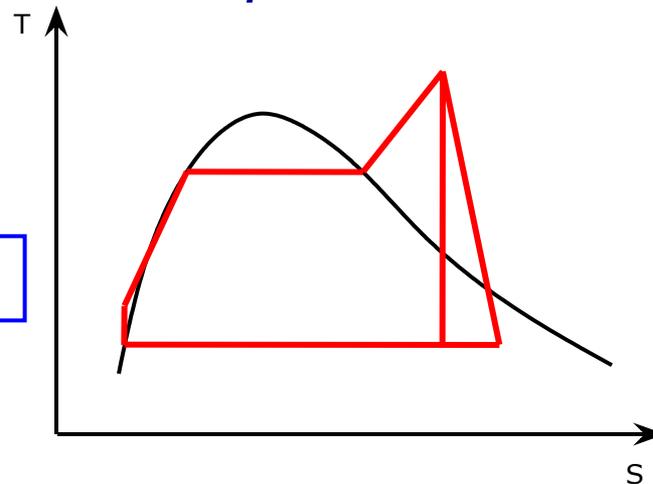


# Цикл паротурбинной установки

Схема ПТУ



Цикл Ренкина



$$\eta_t = (q_1 - q_2) / q_1$$

$$q_1 = h_1 - h_3 \quad q_2 = h_2 - h_2'$$

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_2')}{h_1 - h_3}$$

или

$$\eta_t = a / q_1$$

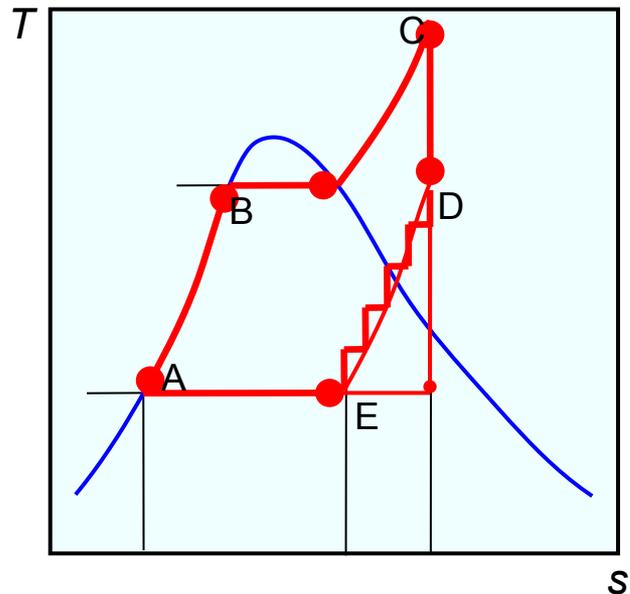
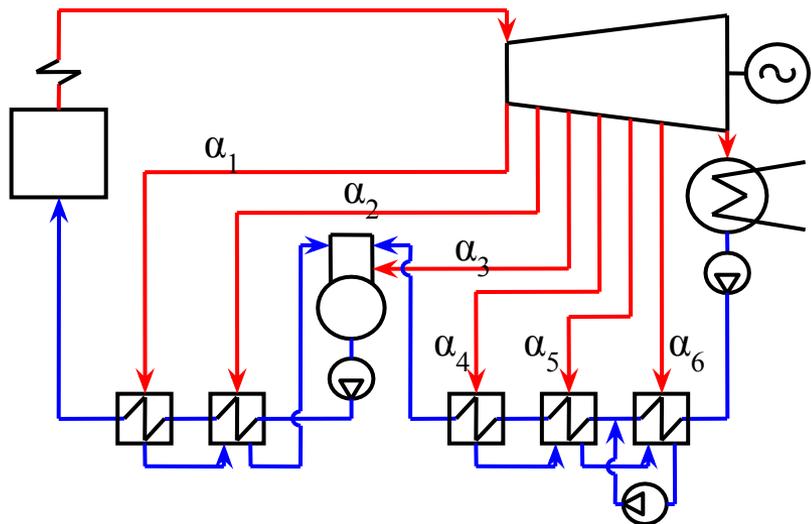
$$a = a_T - a_H, \quad a_T = h_1 - h_2, \quad a_H = h_3 - h_2'$$

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_2')}{h_1 - h_3}$$

$$a_T \gg a_H \quad h_3 = h_2', \quad \eta_t = \frac{(h_1 - h_2)}{h_1 - h_3}$$

# Цикл паротурбинной установки

Схема с регенеративным подогревом питательной воды

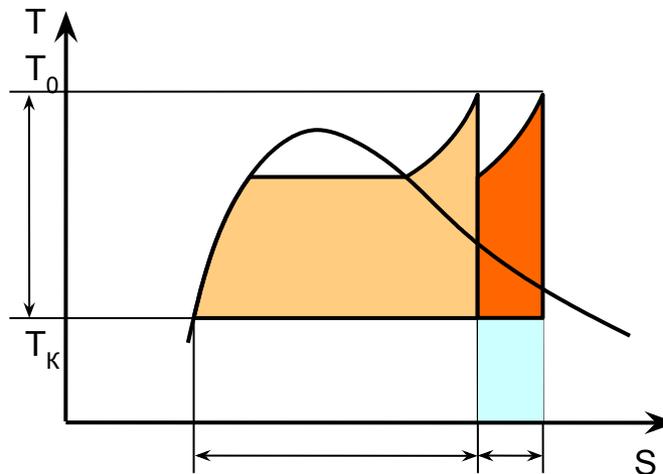
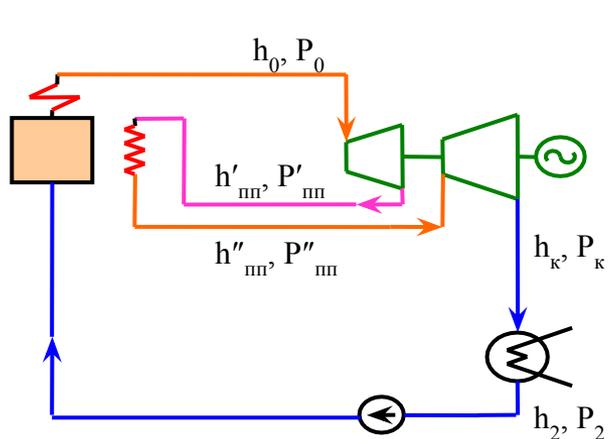


Термический КПД цикла Ренкина с регенерацией

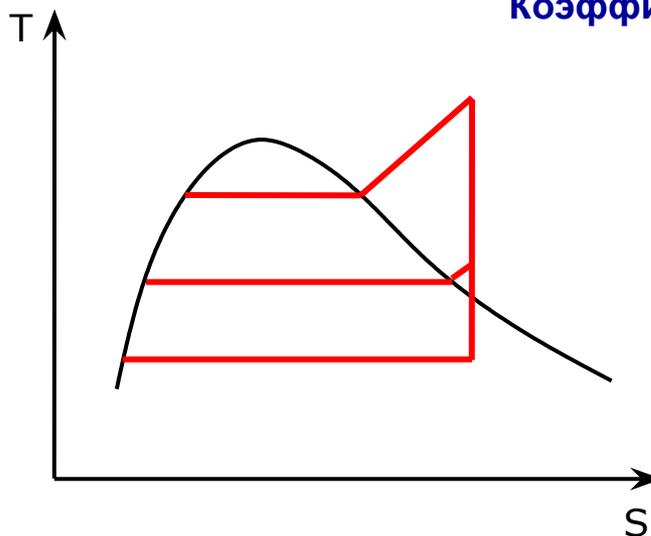
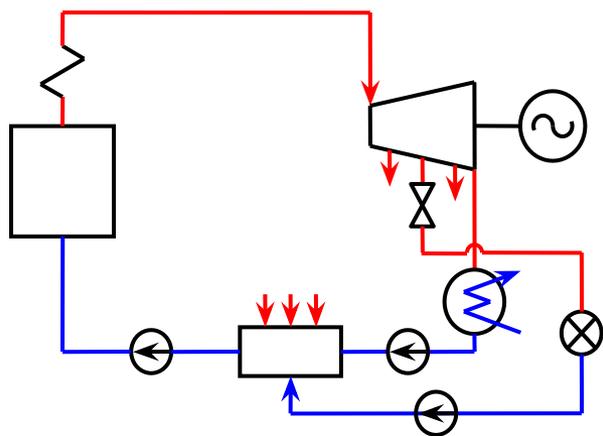
$$\eta_{tp}^p = l/q_1 = \frac{h_0 - \sum \alpha_k \cdot h_r - \alpha \cdot h}{h_0 - h_{не}}$$

# Цикл паротурбинной установки

## Схема и цикл с промежуточным перегревом пара



## Схема и цикл теплофикационной установки

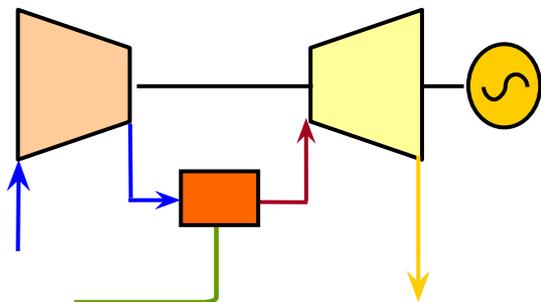


Коэффициент использования теплоты

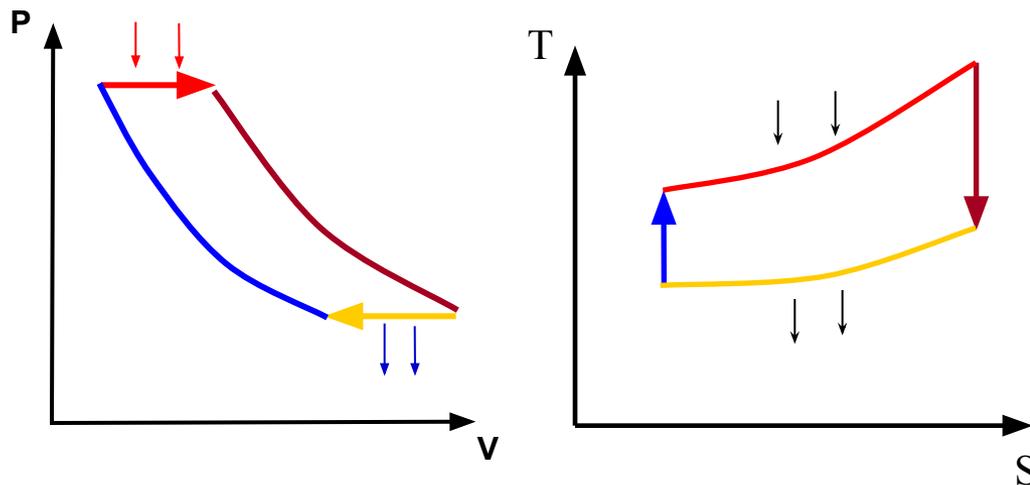
$$\eta_{\text{и}} = \frac{q_{\text{пол}} + q_2}{q_1}$$

# Цикл газотурбинной установки

## Схема ГТУ



## Цикл ГТУ

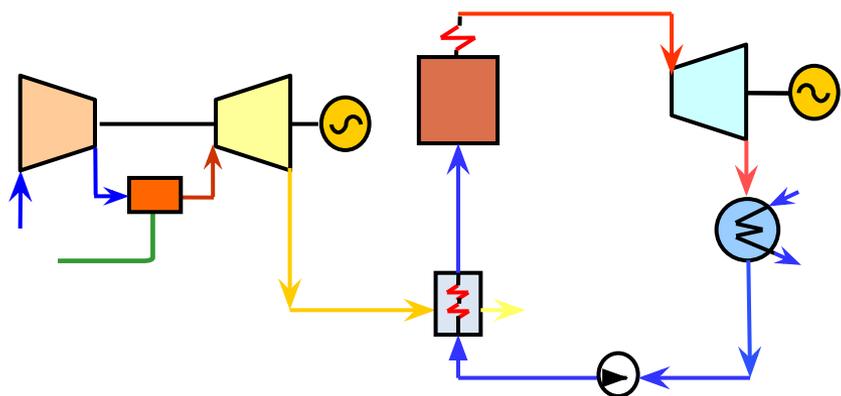


## КПД цикла ГТУ

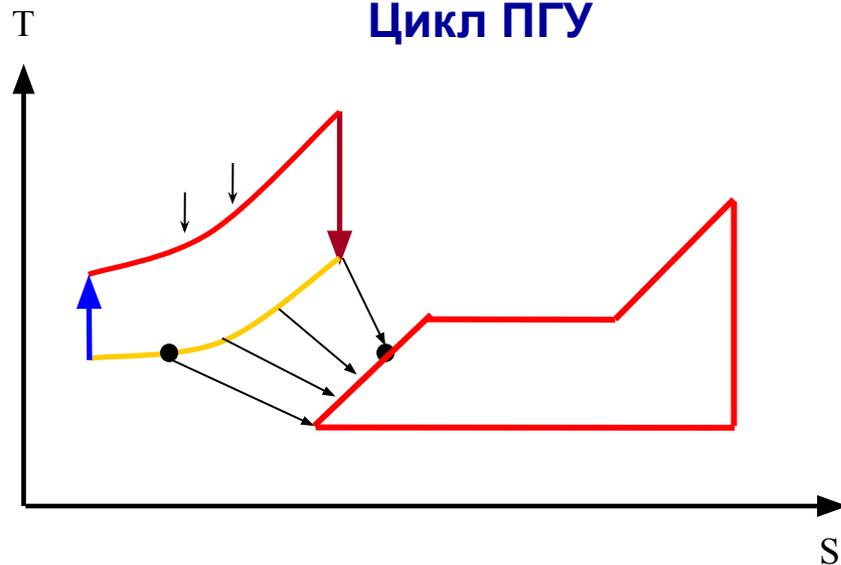
$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}$$

# Цикл парогазовой установки

Схема ПГУ

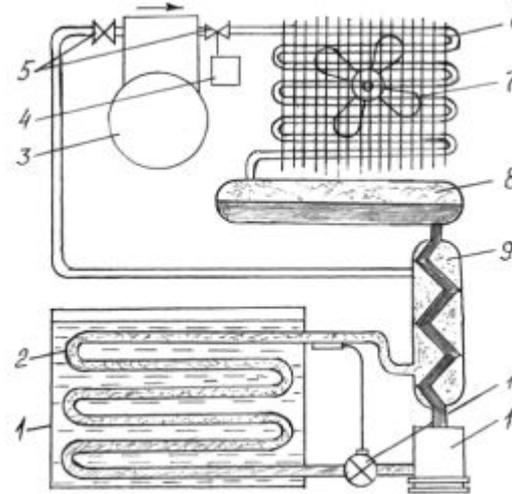
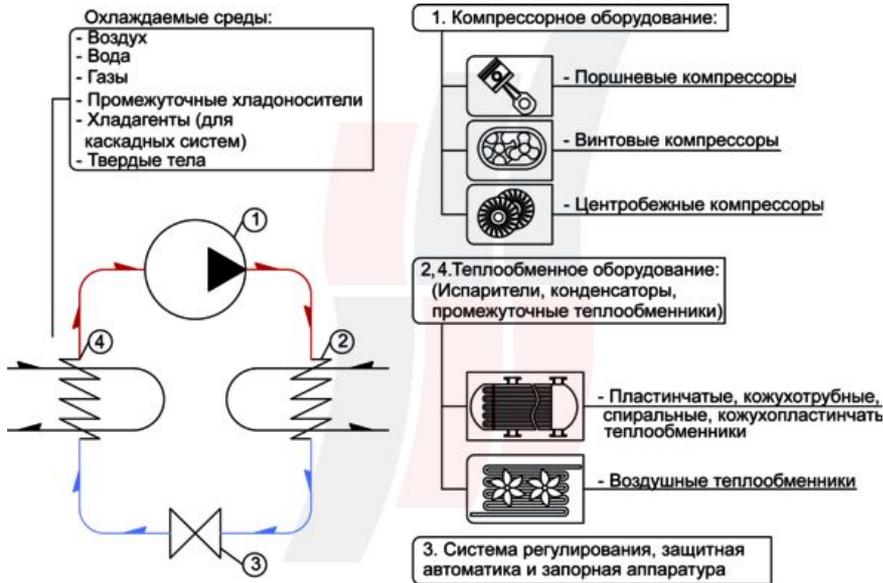


Цикл ПГУ

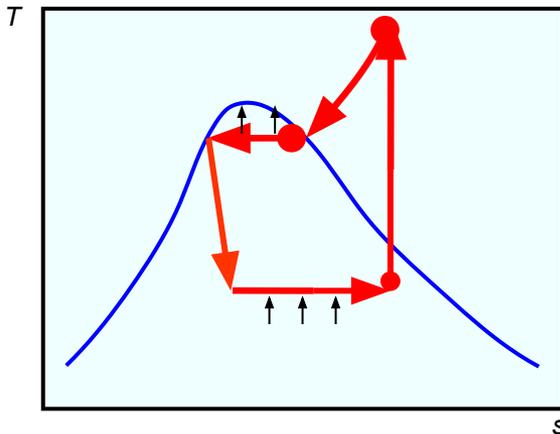


# Холодильная установка

**Холодильная установка** – установка, предназначенная для передачи тепла от менее нагретого тела к более нагретому



## Цикл установки



**Холодильный коэффициент**  $\varepsilon = q_2/l_k = (h_1 - h_5)/(h_2 - h_1)$

# Холодильная установка

**Компрессор** поддерживает в **испарителе** низкое давление, обеспечивающее низкую температуру кипения, за счет отбора паров холодильного агента из испарителя. Кроме того, **компрессор** нагнетает пары в конденсатор и сжимает их до такого высокого давления, при котором они превращаются в жидкость при условии охлаждения их окружающей средой с температурой 20-30°C.

**Конденсатор** обеспечивает охлаждение сжатых паров холодильного агента окружающим воздухом с целью понижения температуры паров до температуры конденсации и конденсации насыщенных паров в жидкое состояние.

**Ресивер** создает запас жидкого холодильного агента, необходимый для обеспечения равномерного питания им испарительной системы. Кроме того, ресивер является дополнительной емкостью конденсатора, которая предотвращает переполнение последнего жидким холодильным агентом.

**Теплообменник** обеспечивает переохлаждение жидкого холодильного агента, поступающего к терморегулирующему вентилю, и перегрев парообразного холодильного агента, поступающего из испарителя в компрессор.

**Фильтр-осушитель** улавливает различные механические загрязнения (опилки, ржавчину и т.п.) холодильного агента и поглощает влагу, находящуюся в системе.

**Терморегулирующий вентиль** предназначен для дросселирования жидкого холодильного агента, поступающего в испаритель, и регулирования его расхода. Дросселирование сопровождается понижением давления холодильного агента от давления конденсации до давления кипения.

# Тепловой насос

**Тепловой насос** нагнетает тепло с улицы или же из почвы в помещение.

**В испаритель** насоса поступает вода из низкопотенциального источника тепла. Далее пар втягивается в **компрессор**, где сжимается. Его температура сильно увеличивается (до 90-100°C). Горячий и сжатый фреон направляется в **теплообменник конденсатора**, охлаждаемый водой или воздухом. Пар конденсируется, превращаясь в жидкость, а его **тепло передается охлаждающей среде**. Воду используют в системе отопления или горячего водоснабжения, а фреон, теперь снова жидкий, направляется на дросселирующий вентиль, проходя через который он теряет давление и температуру, а затем опять возвращается в испаритель.

Коэффициент использования тепла

$$\varepsilon_T = q_1/l_k = (h_2 - h_4)/(h_2 - h_1)$$

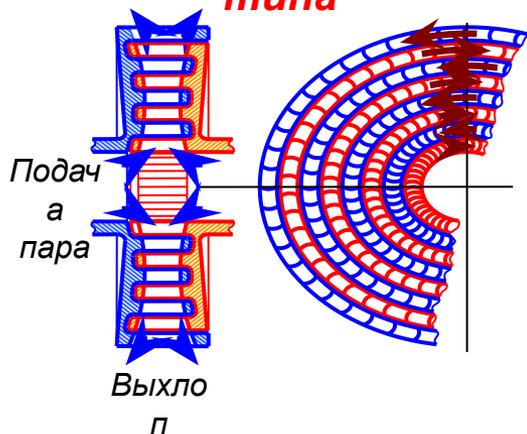
# Общая характеристика турбин

**Турбина** – двигатель лопаточного типа, в котором происходит преобразование энергии рабочего тела в механическую работу

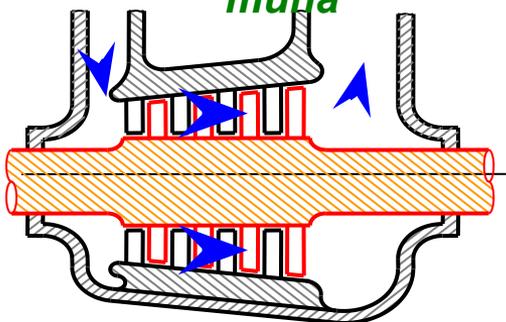
В зависимости от рабочего тела, турбины делятся на: **паровые, газовые,**

В зависимости от подвода рабочего тела, турбины делятся на: **гидротурбины**

**Турбины радиального** на:  
**типа**

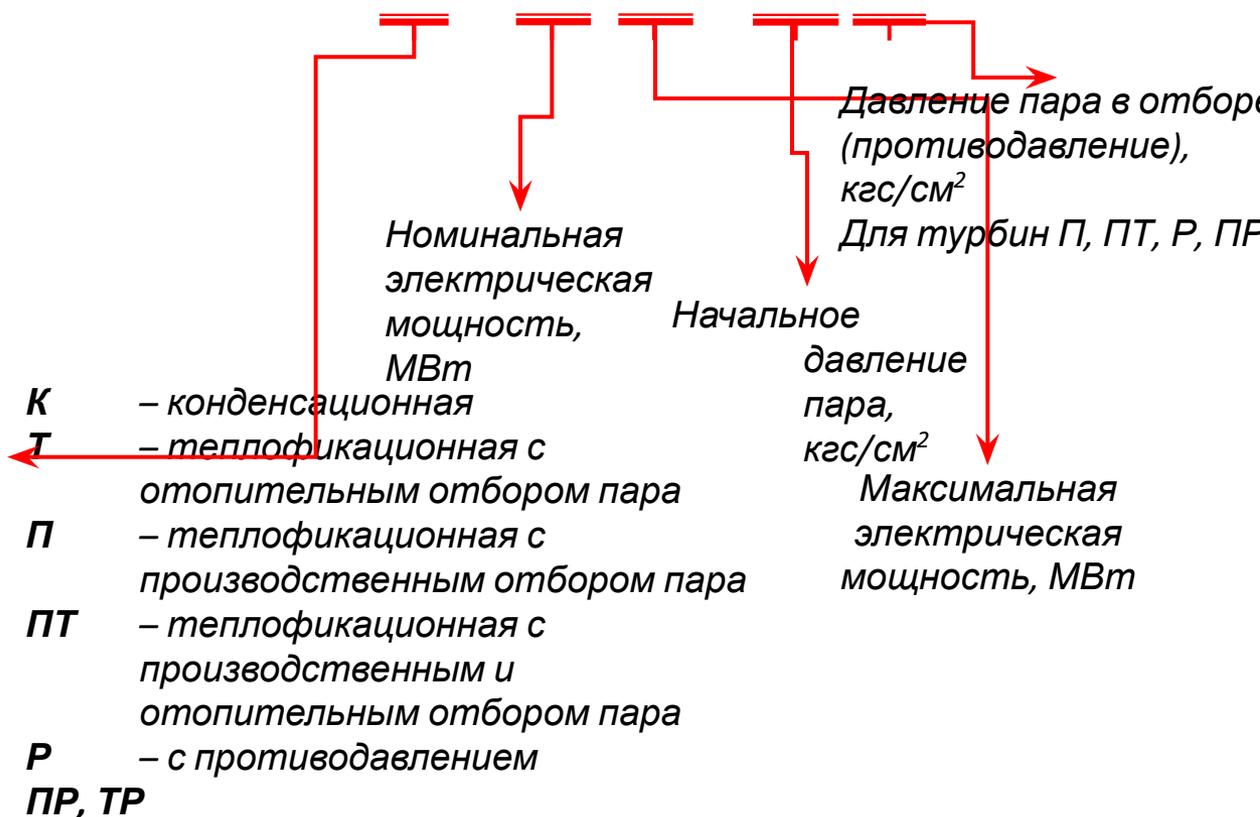


**Турбины аксиального**  
**типа**



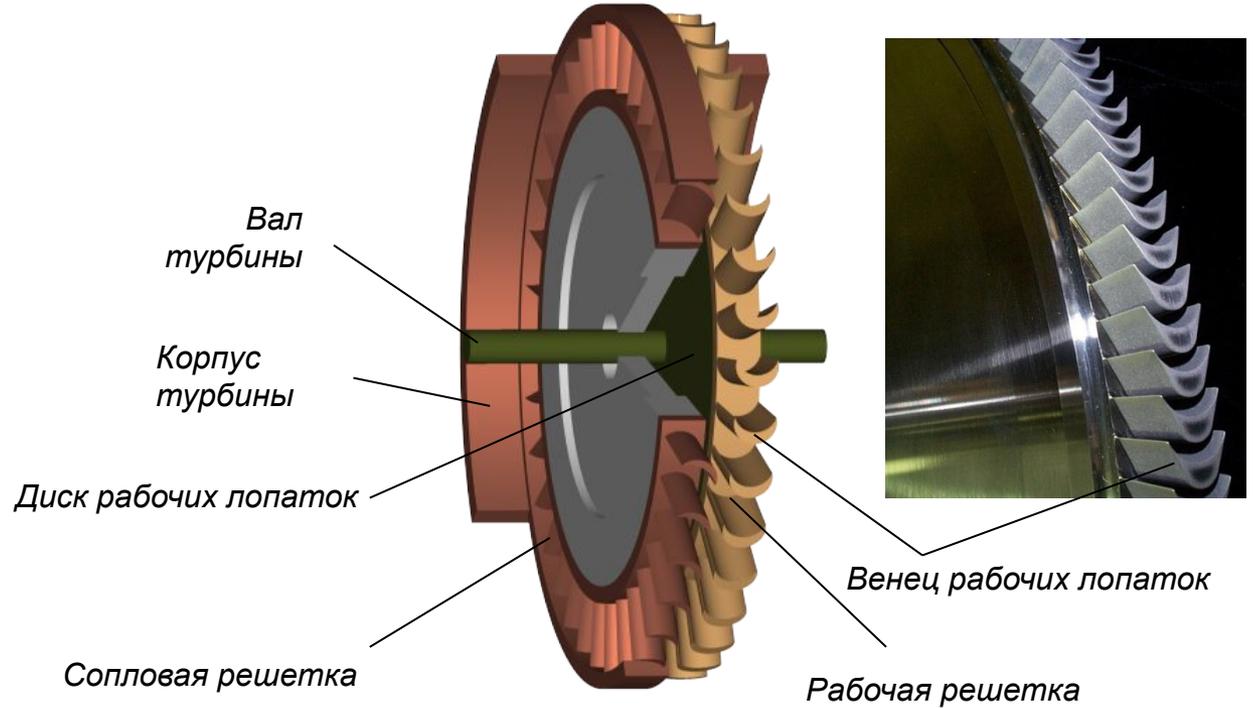
## Маркировка паровых турбин

**ПТ – 135/165 – 130/15**

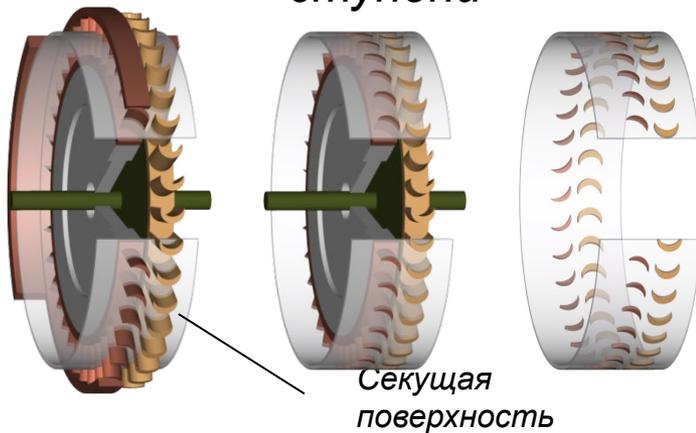


# Ступень турбины аксиального типа

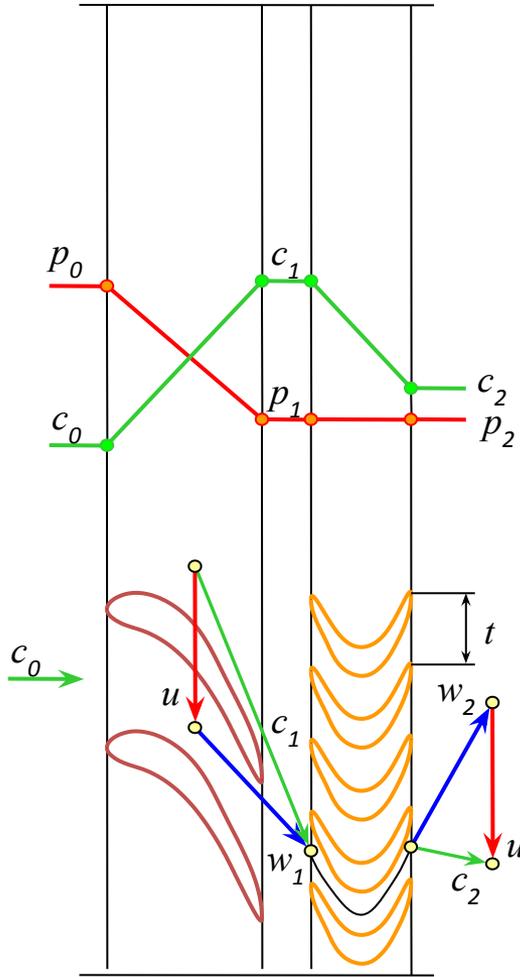
**Ступень турбины** – совокупность рабочей и сопловой решеток



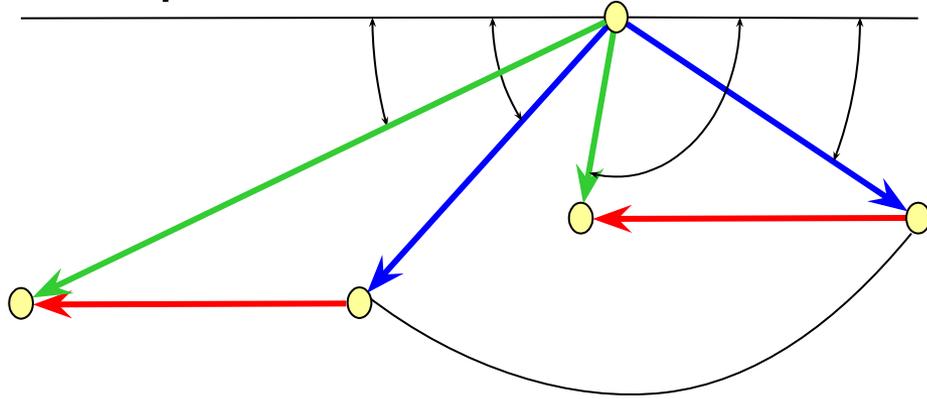
## Развертка турбинной ступени



# Схема работы пара в активной ступени и треугольники скоростей



Работа 1 кг рабочего тела:



Сила, действующая в направлении вектора  $u$ :

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

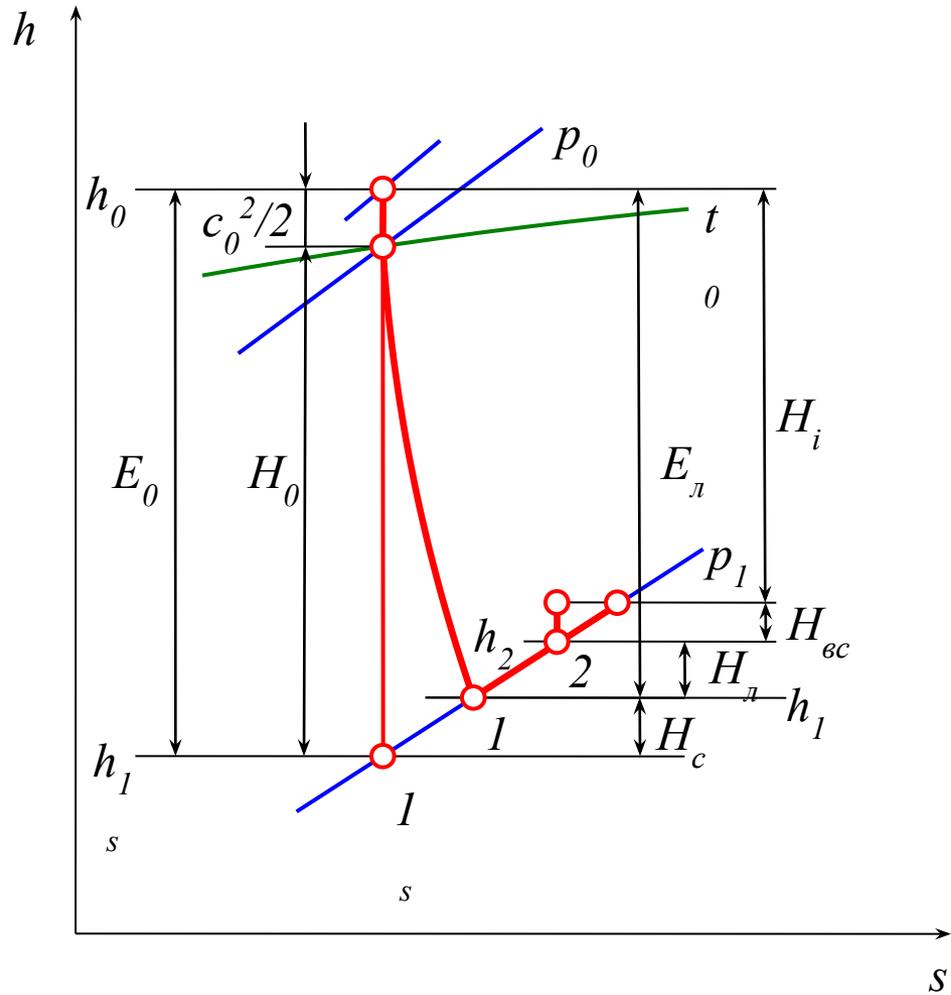
Мощность, развиваемая потоком на рабочих лопатках:

$$N_u = R_u u = Gu(c_1 \cos \alpha_1 + c_2 \cos \alpha_2)$$

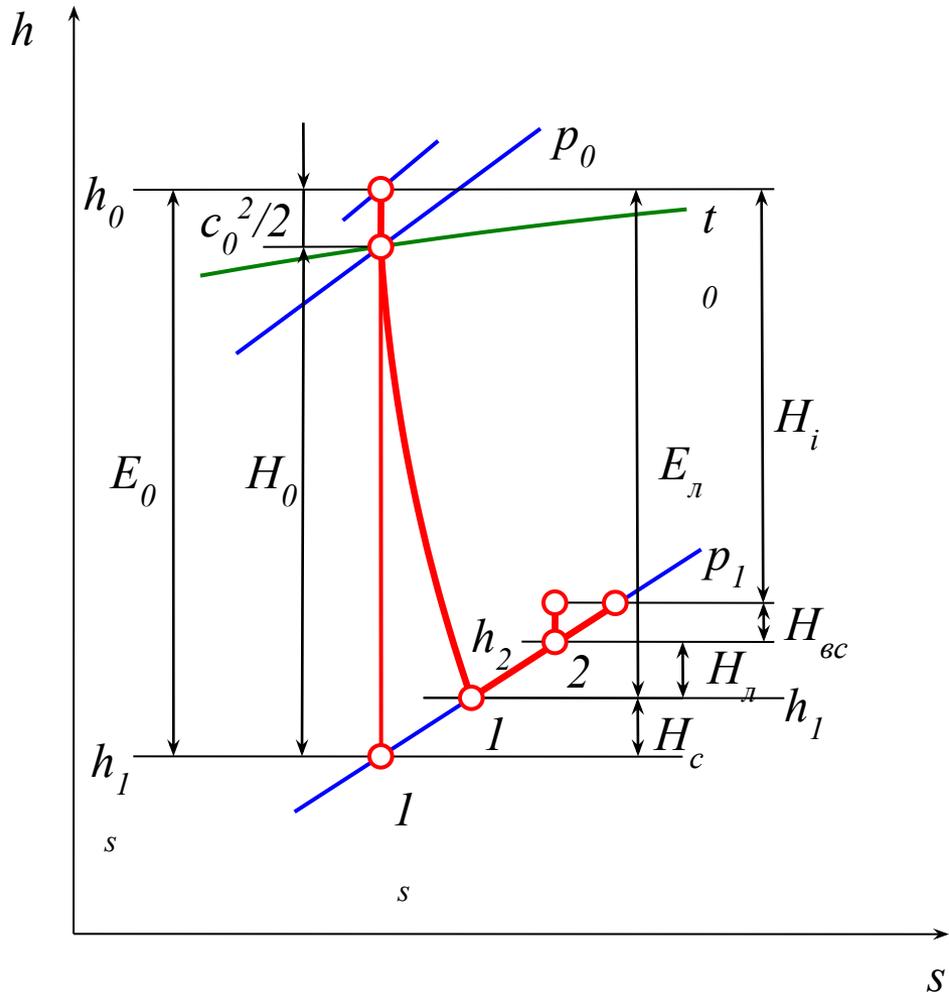
$$l = N_u / G$$

# Относительный лопаточный КПД

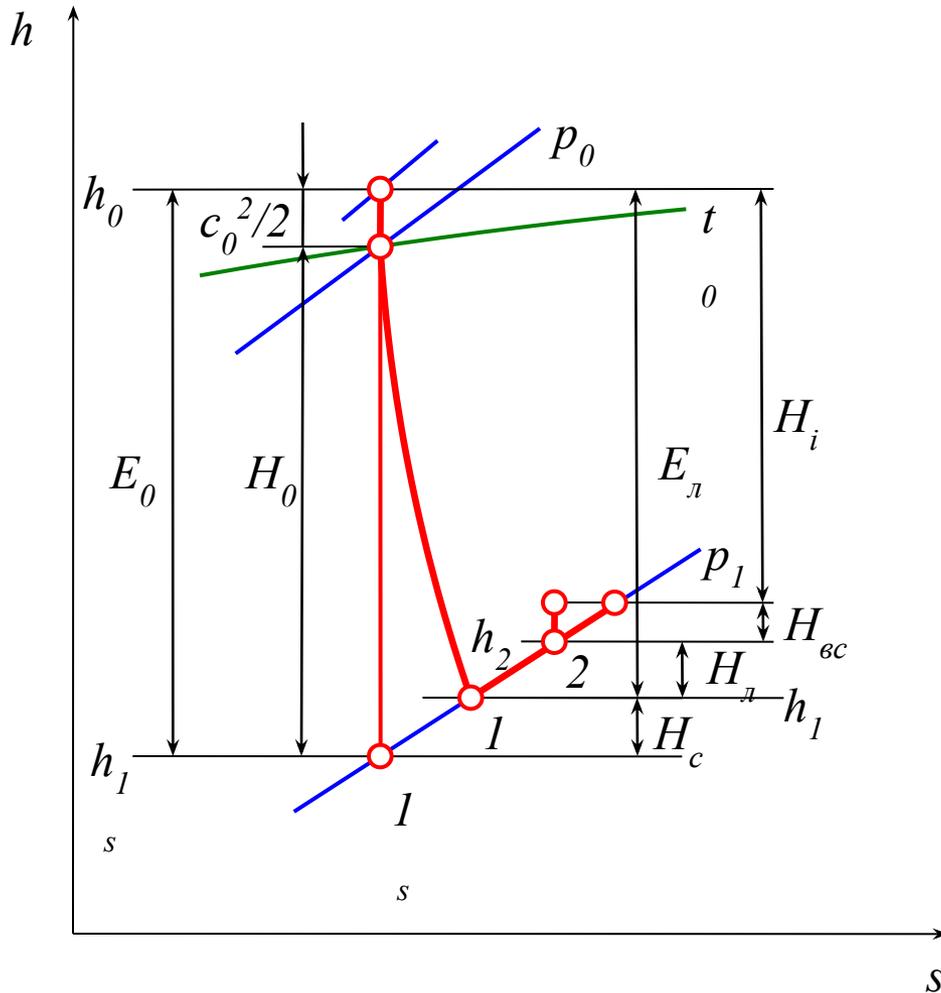
Потери работы и скорости пара в соплах активной ступени



# Потери работы и скорости пара на лопатках активной ступени



# Коэффициент полезного действия лопаток активной ступени



# Внутренний относительный КПД ступени

*Относительный лопаточный КПД характеризует качество сопловых и рабочих решеток и потери энергии с выходной скоростью*

*В ступени есть и другие, дополнительные, потери*

- *потери трения диска и лопаточного бандажа*
- *потери, связанные с парциальным подводом пара к ступени*
- *потери от протечек пара в зазорах между статором и ротором*
- *потери от влажности пара*

*КПД, учитывающий эти потери называют относительным внутренним КПД*

$$\eta_{oi} = \eta_{o.l.} - \sum \xi_{доп} = \eta_{o.l.} - \xi_{тр} - \xi_{п} - \xi_{у} - \xi_{вл}$$

## **Потери, связанные с парциальным подводом пара**

*В ряде случаев применяется парциальный подвод пара с турбинной ступени, т.е. пар подводится не по всей окружности, а только по её части  $e$ . При этом на части длины окружности  $1 - e$  в каналах рабочей решетки отсутствует активный поток пара и рабочая решетка работает как*

## **Потери от утечек**

*Потери от утечек связаны с протечками пара через зазоры в ступенях. Поскольку этот пар не совершает полезной работы, то его энергия является потерянной*

**Утечки:** *диафрагменная (между диафрагмой и валом); корневая (между диафрагмой и диском у корневого диаметра лопаток); периферийная (между бандажом вращающихся лопаток и корпусом турбины)*

# Потери от влажности пара

*Жидкость в потоке пара может существовать в виде мелкодисперсной влаги (туман), крупнодисперсной (капли различных диаметров), плёнок, струй*

*Наличие влаги приводит как к увеличению потерь на лопатках, так и к потерям энергии на разгон влаги*

*ударному воздействию капель на рабочие лопатки*

*увеличению потерь в периферийной зоне (куда отбрасываются капли)*

*увеличению потерь при сепарации влаги из проточной части (при этом отсасывается также часть пара)*

## Внешние потери турбогенераторной установки

$$N_0 = G_{\text{н.в.}} \dot{I}_0 = G_{\text{н.в.}} (h_0 - h_{\text{в.с}})$$

$$N_i = G_{\text{н.в.}} \dot{I}_i = G_{\text{н.в.}} (h_0 - h_{\text{в}})$$

$$N_i - \Delta N_i = N_e$$

$$N_e - \Delta N_{\text{в}} = N_{\text{в}}$$

$$\frac{N_{\text{в}}}{N_e} = \eta_{\text{в}}$$

$$\frac{N_e}{N_i} = \eta_i$$

$$\frac{N_{\text{в}}}{N_i} = \frac{N_{\text{в}}}{N_e} \frac{N_e}{N_i} = \eta_{\text{в}} \eta_i = \eta_{\text{в.и}}$$

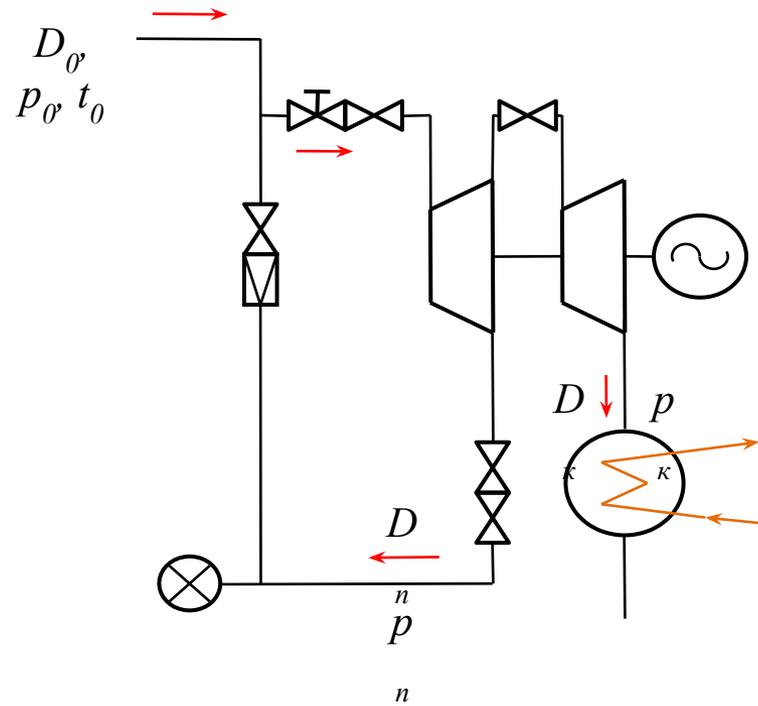
$$N_{\text{в}} = G_{\text{н.в.}} \dot{I}_0 \eta_{\text{oi}} \eta_{\text{в.и}} = G_{\text{н.в.}} \dot{I}_0 \eta_{\text{о.в}}$$

$$N_{\text{в}} = \frac{D_0 \dot{I}_0}{3600} \eta_{\text{о.в}} \cdot 10^3$$

$$\eta_{\text{о.в}} = \eta_{\text{oi}} \eta_{\text{в.и}} = \eta_{\text{oi}} \eta_i \eta_{\text{в}}$$

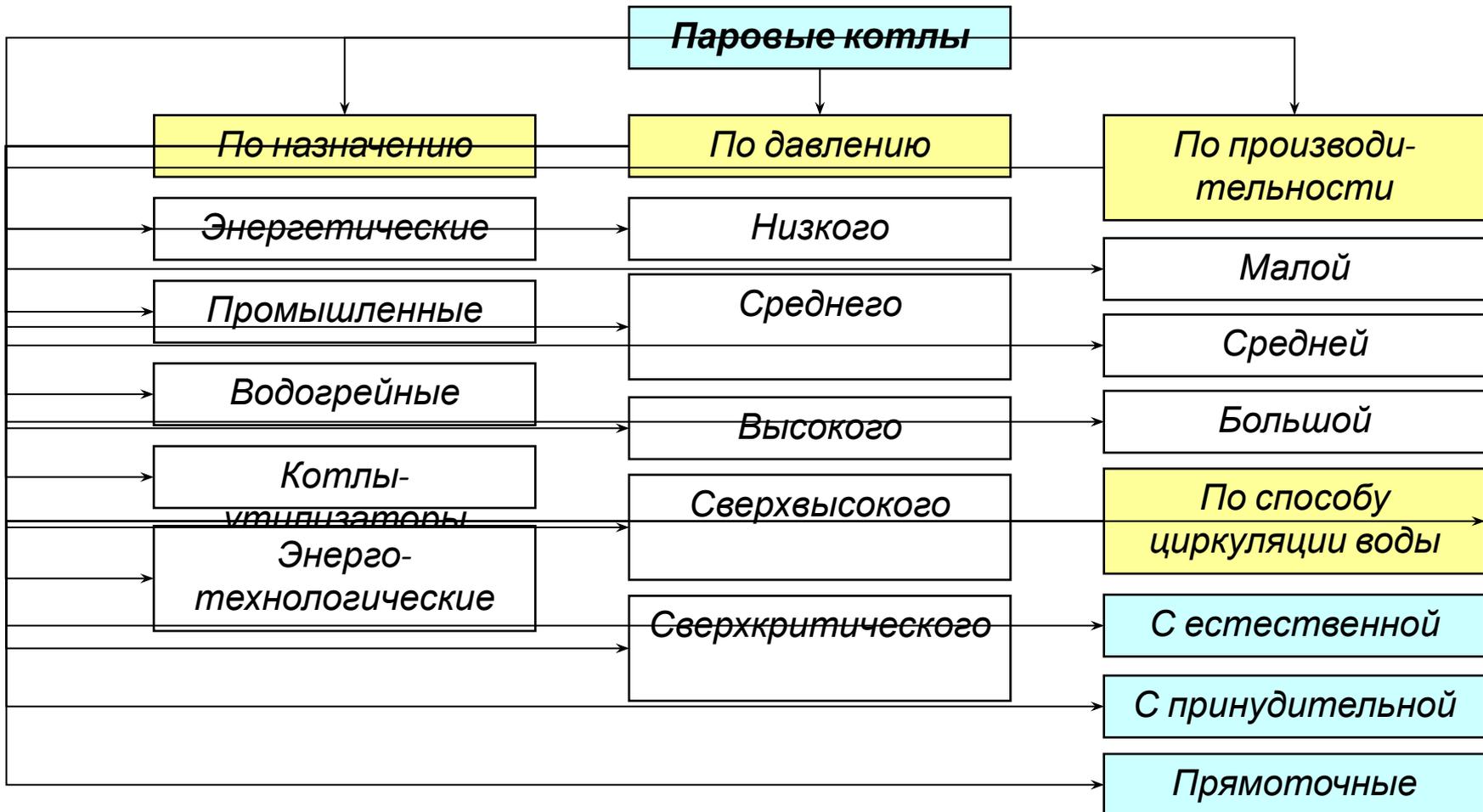


# Турбины с промежуточным регулируемым отбором пара (типа П)

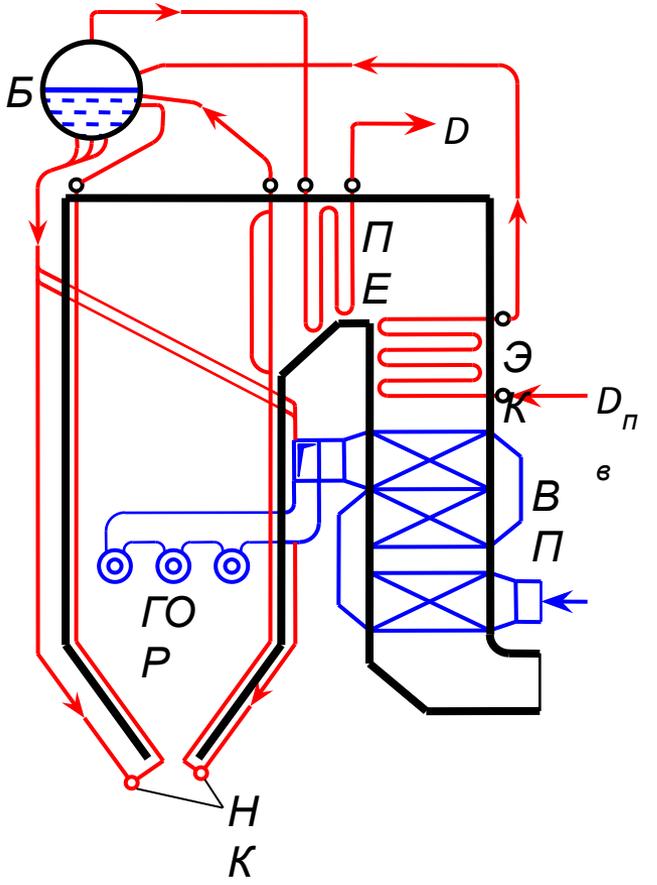


# Котельные установки

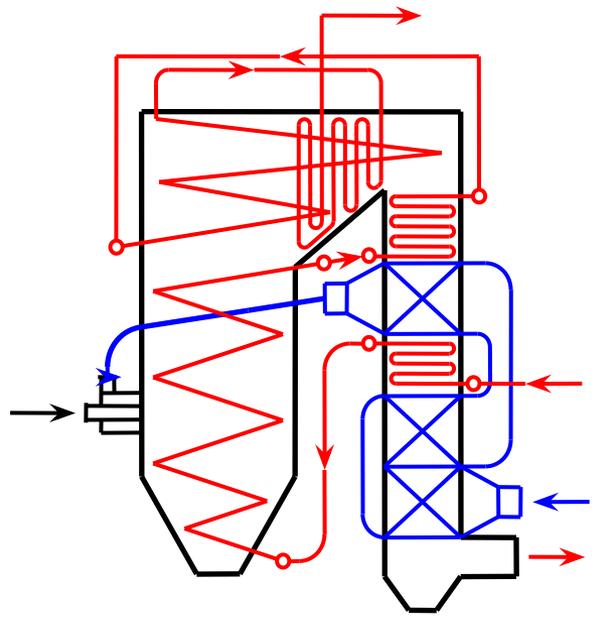
**Парогенератор** – устройство, предназначенное для выработки пара заданных параметров, за счет преобразования химической энергии топлива в тепловую



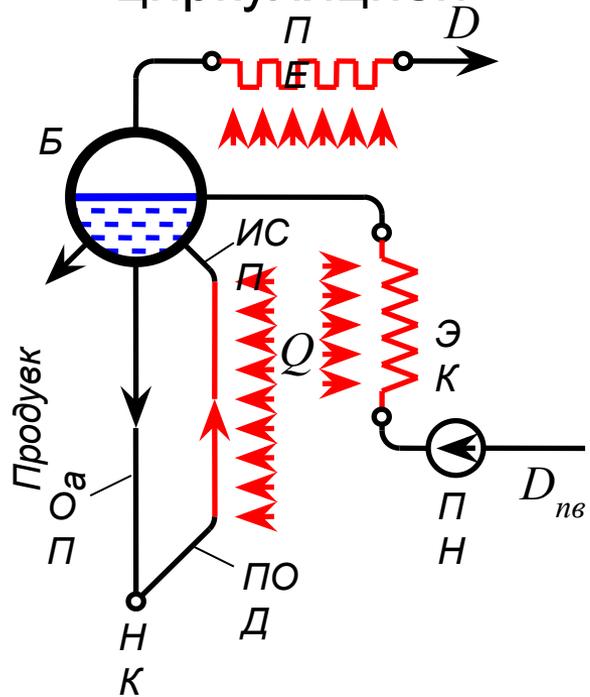
# Принципиальная схема барабанного парогенератора



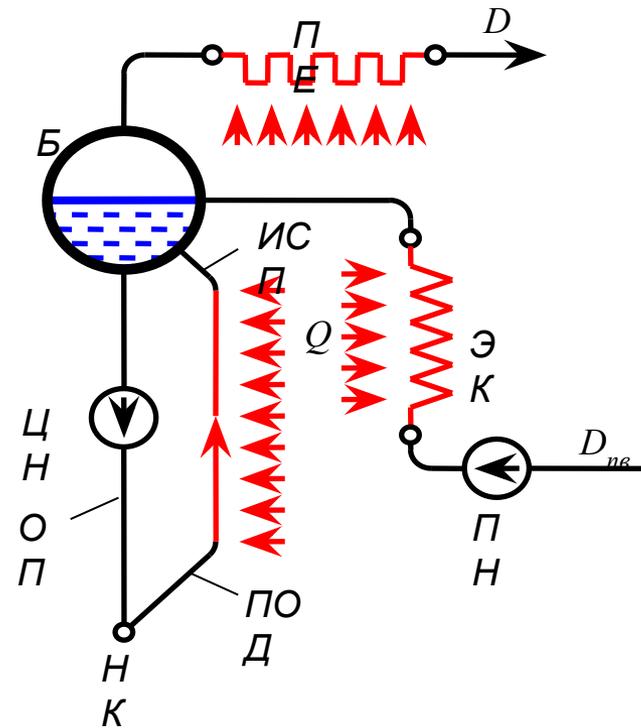
# Принципиальная схема прямоточного парогенератора



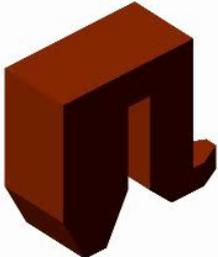
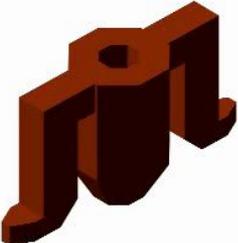
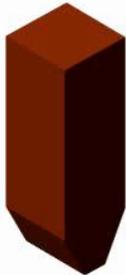
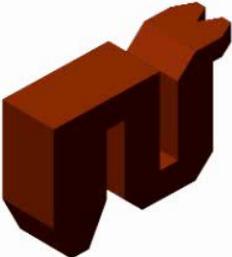
Парогенератор с  
естественной  
циркуляцией



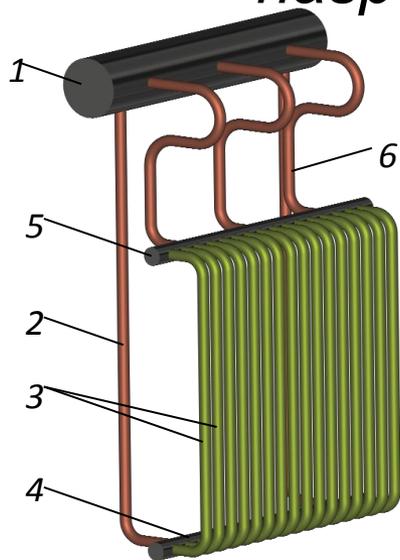
Парогенератор с  
многократной  
принудительной циркуляцией



# Типы компоновок паровых котлов

П-образная	Т-образная	Башенная	Н-образная
Высота – 60 м	Высота – 30 м	Высота – 130 м	Высота – 40 м
			

*Испарительные поверхности  
нагрева*



# Маркировка паровых котлов

***E – 420 – 140***

***ГМ***

Паропроизводительность,  
т/ч

- П*** – прямоточный
- Е*** – с естественной циркуляцией
- Пр*** – с принудительной циркуляцией
- Пп*** – прямоточный с промежуточным перегревом
- Еп*** – с естественной циркуляцией и с промежуточным перегревом

***ГМ***

– газомазутный

***Г***

– газ

***М***

– мазут

***Ж***

– с жидким

шлакоудалением

***В***

– вихревая

топка

***Ц***

– циклонная

топка

***Р***

– решетка

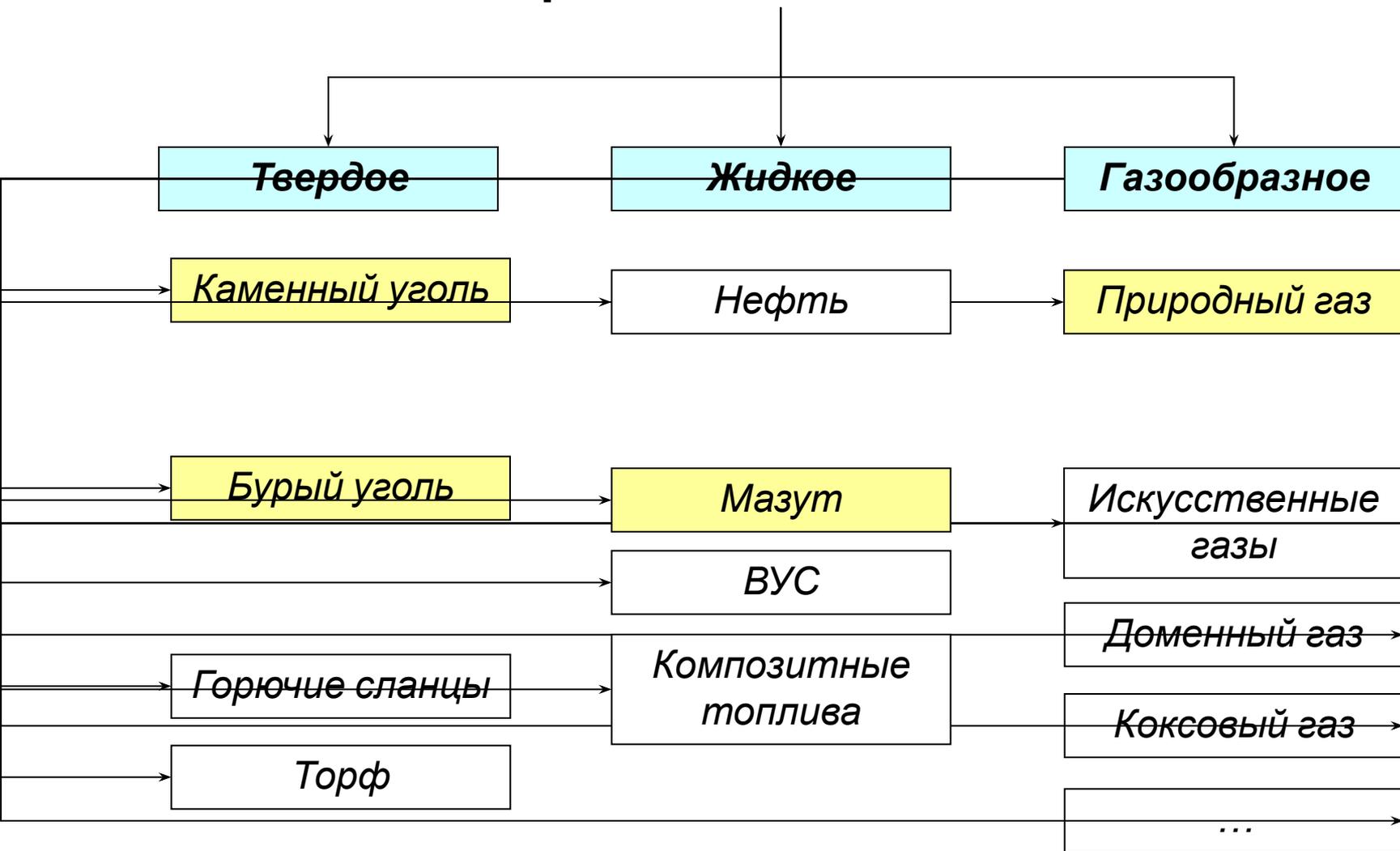
***Н***

– наддув

...

Давление пара, кгс/см<sup>2</sup>

# Энергетическое топливо



# Химический состав топлива

## Горючая часть

- Углерод
- Водород

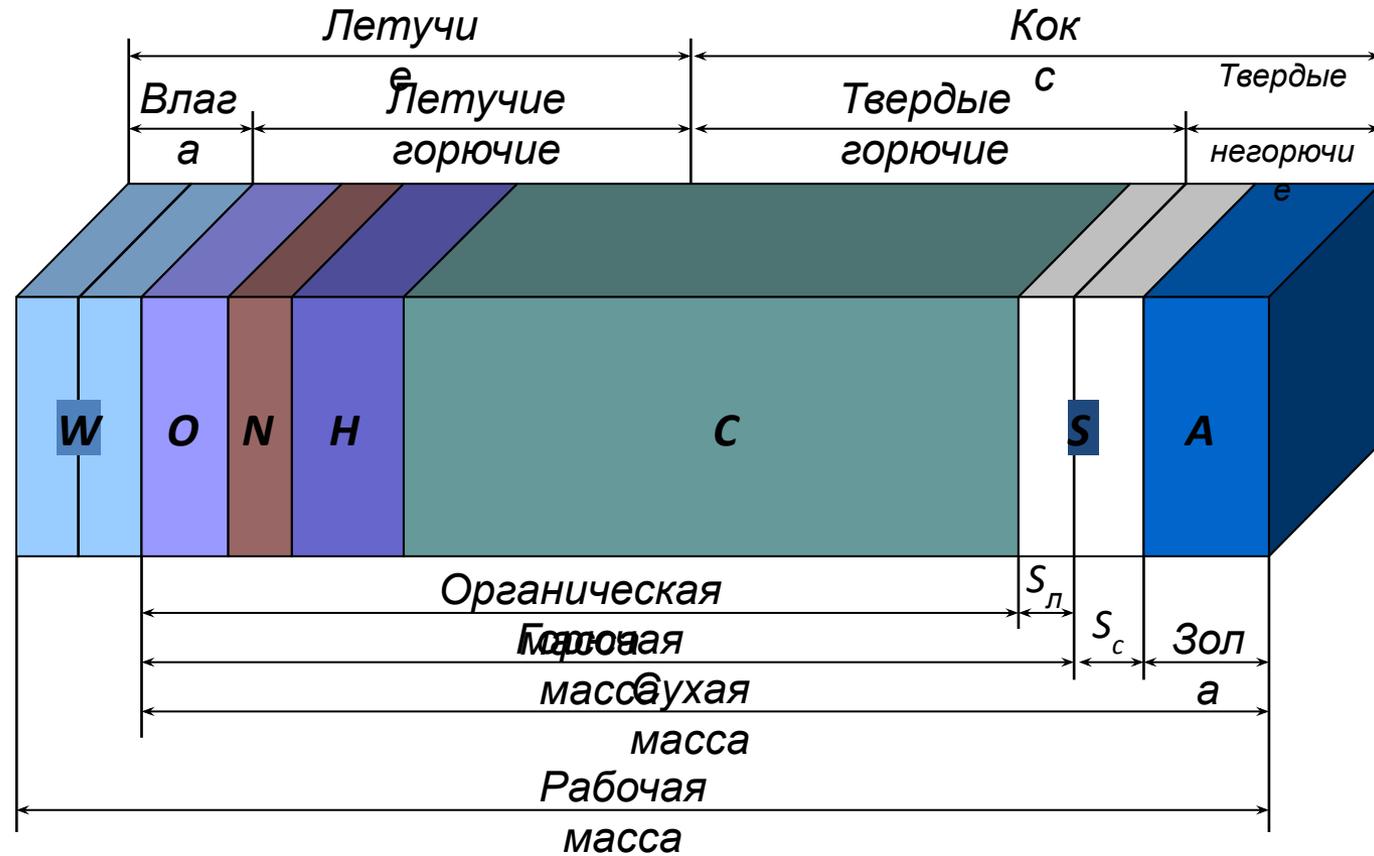
## Балластная часть

### Внутренний балласт

- Кислород
- Азот
- Сера

### Внешний балласт

- Зола
- Влага



- Рабочая масса топлива (поступающее потребителю)

$$C^{\delta} + H^{\delta} + O^{\delta} + N^{\delta} + S_{\text{e}}^{\delta} + A^{\delta} + W^{\delta} = 100\%$$

- Сухая масса топлива (проба, искусственно подсушенная при  $t = 105^{\circ}\text{C}$ )

$$C^{\tilde{n}} + H^{\tilde{n}} + O^{\tilde{n}} + N^{\tilde{n}} + S_{\text{e}}^{\tilde{n}} + A^{\tilde{n}} = 100\%$$

- Горючая масса топлива

$$C^{\tilde{a}} + H^{\tilde{a}} + O^{\tilde{a}} + N^{\tilde{a}} + S_{\text{e}}^{\tilde{a}} = 100\%$$

- Органическая масса топлива

$$C^{\hat{i}} + H^{\hat{i}} + O^{\hat{i}} + N^{\hat{i}} = 100\%$$

# Пересчет с одной массы на другую

Во всех теплотехнических расчетах используется рабочая масса топлива. Расчетные характеристики часто даются на горючую массу, поскольку она является наиболее устойчивой.

Для пересчета с одной массы топлива на другую запишем:

$$C^{\tilde{a}} + H^{\tilde{a}} + O^{\tilde{a}} + N^{\tilde{a}} + S_{\tilde{e}}^{\tilde{a}} = 100\%$$

$$C^{\delta} + H^{\delta} + O^{\delta} + N^{\delta} + S_{\tilde{e}}^{\delta} = 100\% - A^{\delta} - W^{\delta}$$

Обозначив через  $X^p$  содержание элемента в рабочей массе, а через  $X^z$  – в горючей

$$X^{\delta} = X^{\tilde{a}} \frac{100\% - A^{\delta} - W^{\delta}}{100\%}$$

## Теплота сгорания топлива

Теплотой сгорания называют теплоту, которая выделяется при сжигании одной единицы массы топлива. Различают **высшую** и **низшую** теплоту сгорания.

Высшая отличается добавочной теплотой, выделяющейся при конденсации влаги, содержащейся в дымовых газах:

$$Q_{H_2O} = 2500 \left( 9H^{\delta}/100 + W^{\delta}/100 \right) = 225H^{\delta} + 25W^{\delta}$$

$$Q_i^{\delta} = Q_{\tilde{a}}^{\delta} - Q_{H_2O} = Q_{\tilde{a}}^{\delta} - 225H^{\delta} - 25W^{\delta}$$

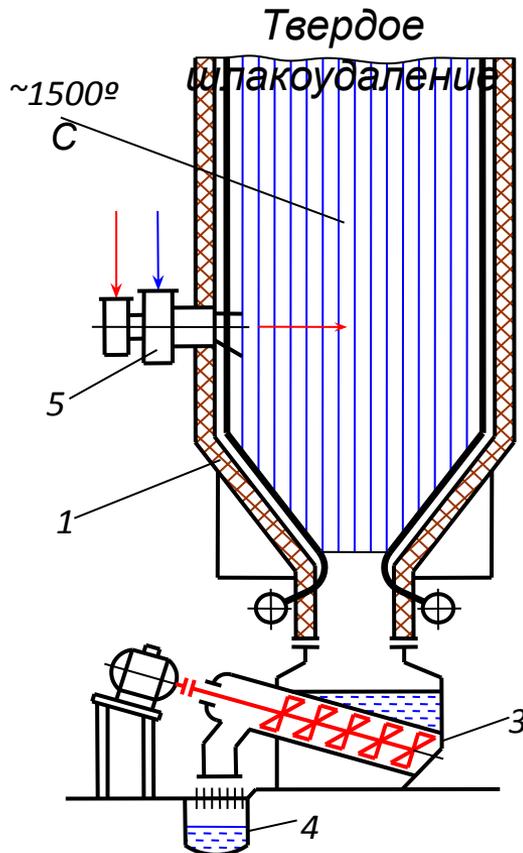
$$Q_i^{\delta} = 338C^D + 1025I^D - 108,5(I^D - S^D) - 25W^P$$

# Условное топливо

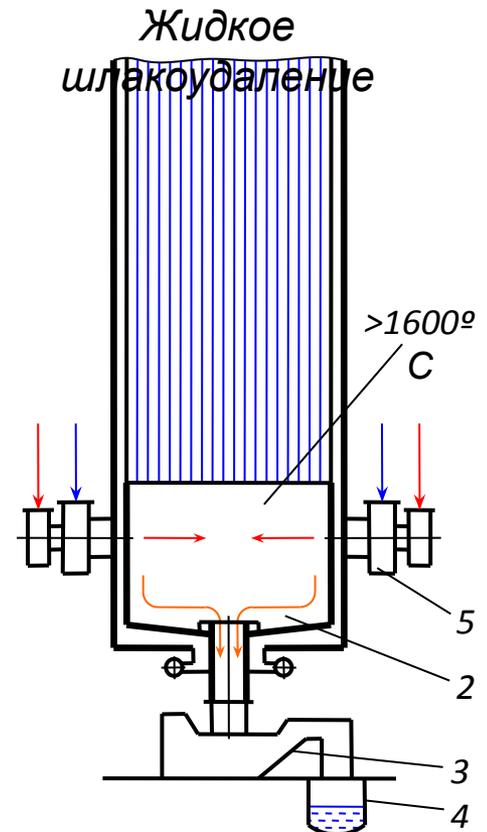
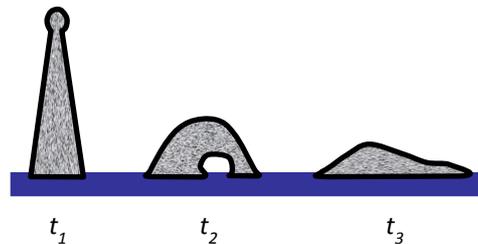
При сравнении работающих установок по экономичности и другим показателям удобно пользоваться относительными характеристиками топлива, такими, например, как условное топливо и приведенные влажность, зольность и сернистость.

**Условное топливо** – топливо с низшей теплотой сгорания 29,33 МДж/кг (7000 ккал/кг), что соответствует теплотворной способности хорошего каменного угля

## Способы сжигания пыли



1. Холодная воронка
2. Шлаковая ванна
3. Механизированное устройство
4. Шлаковый канал
5. Горелки



# Продукты сгорания топлива

- Теоретически необходимое количество воздуха для горения, м<sup>3</sup>/кг

$$V^0 = 0,0889(C^\delta + 0,375S_\xi^\delta) + 0,265H^\delta - 0,0333O^\delta$$

- Теоретический объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{\hat{a}}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0$$

- Теоретический объем трехатомных газов, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = \frac{1,866}{100}(C^\delta + 0,375S_\xi^\delta)$$

- Теоретический объем азота обусловлен азотом, входящим в топливо и азотом воздуха, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8\frac{N^\delta}{100}$$

- Теоретический объем водяных паров, м<sup>3</sup>/кг  $V_{H_2O}^0 = V_{H_2O}^H + V_{H_2O}^W + V_{H_2O}^{\hat{a}}$

где объем водяных паров при сжигании водорода, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{H_2O}^H = 0,111H^\delta$$

объем водяных паров за счет испарения рабочей влаги, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{H_2O}^W = 0,0124W^\delta$$

объем водяных паров с атмосферной влагой в теоретическом объеме, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{H_2O}^{\hat{a}} = 0,0161V^0$$

- Для осуществления полного сгорания в действительности в топку подают количество воздуха, большее теоретически необходимого. Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_\delta = \frac{\hat{a}}{\hat{a}^0}$

Эта величина обычно равна для твердых топлив – 1,2; для жидких и газообразных – 1,01...1,1

- Увеличение объема водяных паров, м<sup>3</sup>/кг  $\Delta V_{H_2O} = 0,0161(\alpha_\delta - 1)V^0$

и количество избыточного воздуха, м<sup>3</sup>/кг  $V_{\hat{a}} = (\alpha_\delta - 1)V^0$

$$V_{\hat{a}} = V_{\hat{a}}^0 + 1,0161(\alpha_\delta - 1)V^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + (\alpha_\delta - 1)V^0$$

- Действительный объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_\delta - 1)V^0$$

# Тепловой баланс и КПД парового котла

- Тепловой баланс парового котла заключается в установлении равенства между поступающим в котлоагрегат при сжигании топлива количеством теплоты, называемом располагаемой теплотой и суммой использованной теплоты и тепловых потерь. На основе теплового баланса находят КПД и расход топлива.

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

- Уравнение теплового баланса, выраженное в процентах по отношению к располагаемой теплоте

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6, \quad q_i = Q_i \cdot 100 / Q_\delta^\delta$$

- Располагаемое тепло топлива, кДж/кг

$$Q_\delta^\delta = Q_i^\delta$$

В ряде случаев дополнительно учитываются и другие источники тепла

$$Q_\delta^\delta = Q_i^\delta + Q_{\delta.\delta} + Q_{\hat{a}.\hat{a}i} + Q_{\delta\hat{o}}$$

- Полезно использованное в парогенераторе тепло, кДж/кг

$$Q_1 = \frac{D_0}{B} (h_{i\ddot{i}} - h_{i\hat{a}}) + \frac{D_{i\delta\hat{i}}}{B} (h_{i\hat{a}\hat{o}} - h_{i\delta\hat{i}}) + \frac{D_{i\delta}}{B} (h' - h_{i\hat{a}})$$

- Потеря тепла с уходящими газами

$$Q_2 = (I_{\delta\delta} - \alpha_{\delta\delta} I_{\delta\hat{a}}^0) \frac{100 - q_4}{100}$$

- Химический недожог

$$Q_3 = (126,4\text{CO} + 108\text{H}_2 + 358,2\text{CH}_4) V_{\hat{n}.\hat{a}} (100 - q_4)$$

# Тепловые потери парового котла

- Механический недожог**

$$Q_4 = \left( \alpha_{\text{о} \ddot{\text{e}} + \text{т} \delta} \frac{\tilde{A}_{\text{о} \ddot{\text{e}} + \text{т} \delta}}{100 - \tilde{A}_{\text{о} \ddot{\text{e}} + \text{т} \delta}} + \alpha_{\text{о} \text{т}} \frac{\tilde{A}_{\text{о} \text{т}}}{100 - \tilde{A}_{\text{о} \text{т}}} \right) 32,7 A^{\delta}$$

- Потери теплоты в окружающую среду  $Q_5$  зависят от площади поверхности котла и разности температур**

- Потери с физическим теплом шлаков**

Происходят за счет удаления из топки шлака, температура которого может быть достаточно высокой

$$Q_6 = 0,01 \alpha_{\text{о} \ddot{\text{e}}} \frac{A^{\delta}}{100} (ct)_{\text{о} \ddot{\text{e}}},$$

- Совершенство тепловой работы парового котла оценивается коэффициентом полезного действия брутто**

$$\eta_{\dot{\text{e}}}^{\dot{\text{a}} \delta} = q_1 = \frac{Q_1}{Q_{\delta}^{\delta}} 100\% = \frac{Q_{\dot{\text{e}}}}{Q_{\delta}^{\delta} B}$$

$Q_{\dot{\text{e}}}$  – теплота, полезно отданная котлу,  
кДж/с

$$Q_{\dot{\text{e}}} = D_0 (h_{\text{т}} - h_{\text{т} \hat{\text{a}}}) + D_{\text{т} \delta \text{т} \text{т}} (h_{\text{т} \delta \text{т} \text{т}}^{\hat{\text{a}} \delta} - h_{\text{т} \delta \text{т} \text{т}}^{\hat{\text{a}} \delta}) + D_{\text{т} \delta} (h' - h_{\text{т} \hat{\text{a}}})$$

- КПД котла можно рассчитать по обратному балансу**

$$\eta_{\dot{\text{e}}}^{\dot{\text{a}} \delta} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$$

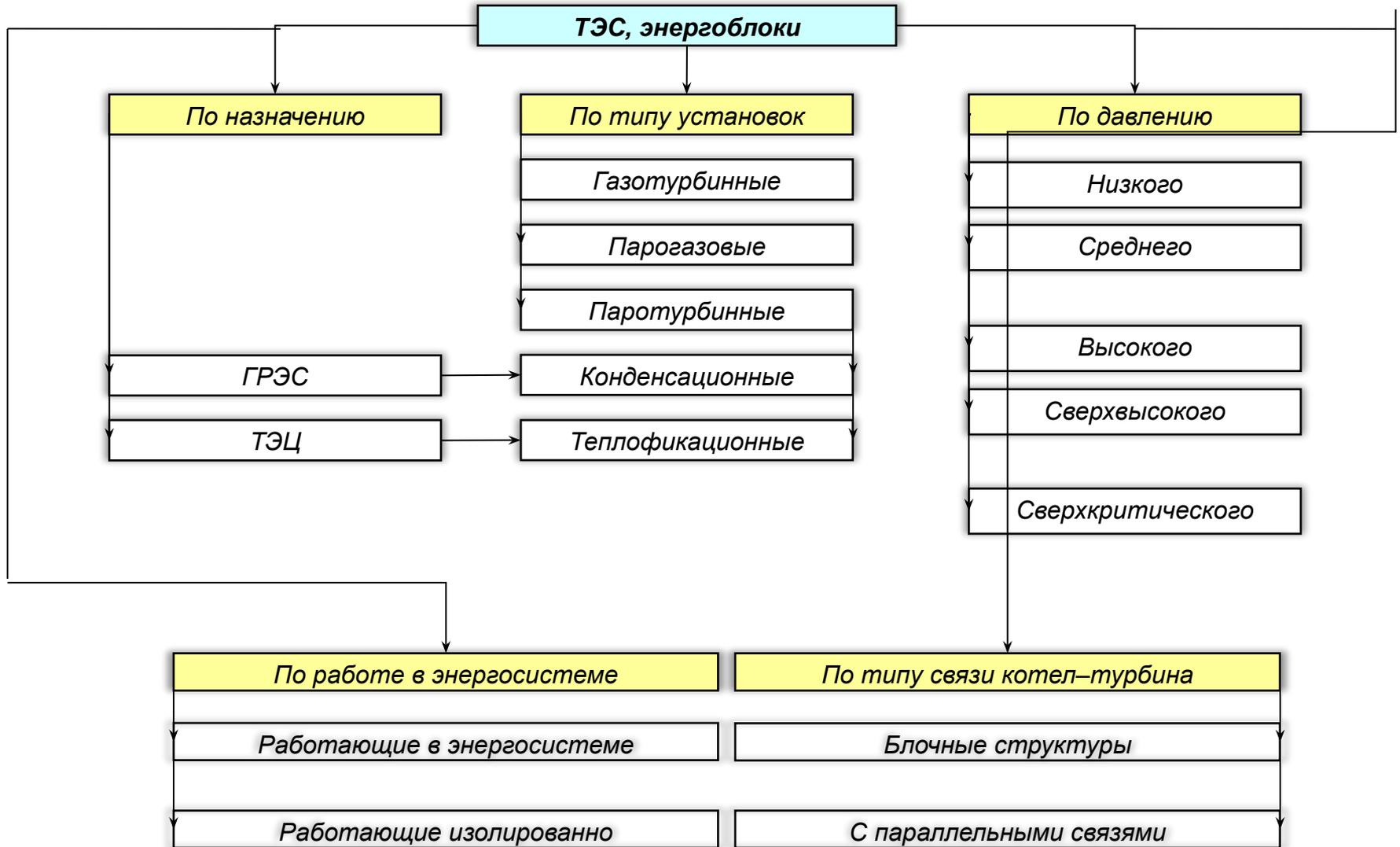
- Расход топлива, подаваемого в топку котла, кг/с**

$$B = Q_{\dot{\text{e}}} 100 / Q_{\delta}^{\delta} \eta_{\dot{\text{e}}}^{\dot{\text{a}} \delta}$$

- Расчетный расход топлива (с учетом механического недожога), кг/с**

$$B_{\delta} = B (1 - q_4 / 100)$$

# Классификация ТЭС и энергоблоков



# Технологическая схема ТЭС

