

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 → Н-с 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

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

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

Стационарная теплопроводность

Для плоской стенки

Плотность теплового потока

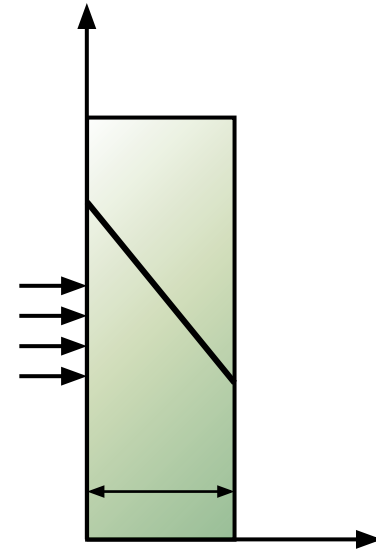
$$q = -\lambda \cdot (t_{ct2} - t_{ct1}) / (x_{ct2} - x_{ct1}) = \lambda \cdot \Delta t / \Delta x = \lambda \cdot \Delta t / \delta$$

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

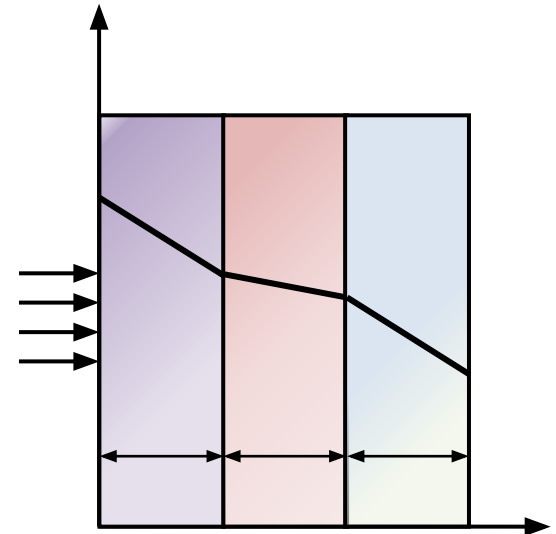
$$q = (t_{ct1} - t_{ct2}) / (\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3) = (t_{ct1} - t_{ct2}) / R_o$$

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

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

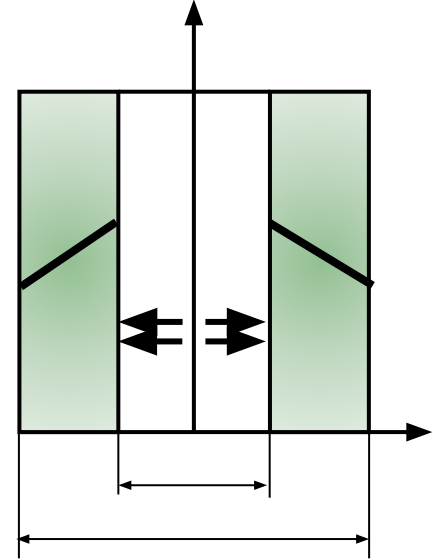
$$Q = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l \cdot \Delta t / \ln(d_2/d_1)$$

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

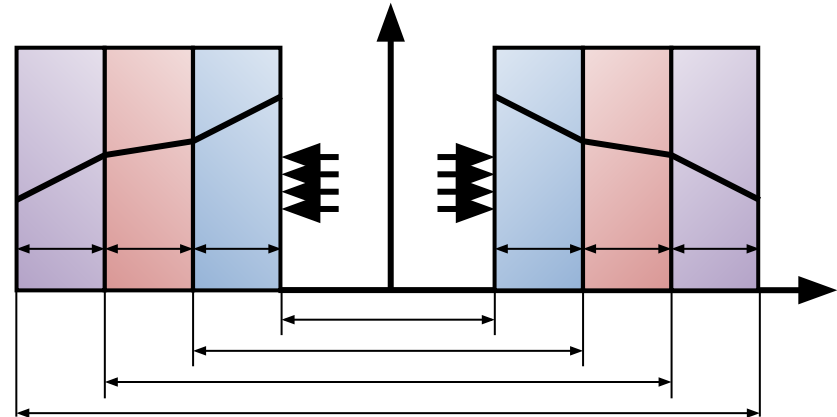
$$Q = 2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_{\text{ср1}} - t_{\text{ср2}}) / [\ln(d_2/d_1)/\lambda_1 + \ln(d_3/d_2)/\lambda_2 + \ln(d_4/d_3)/\lambda_3]$$

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

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: λ , c , ρ , α , μ , $\beta = 1/T$

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)

Φ – 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

λ – коэффициент теплопроводности среды

a – коэффициент температуропроводности среды

c_p – изобарная удельная теплоемкость среды

ρ – плотность среды

ν – коэффициент кинематической вязкости среды

β – 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

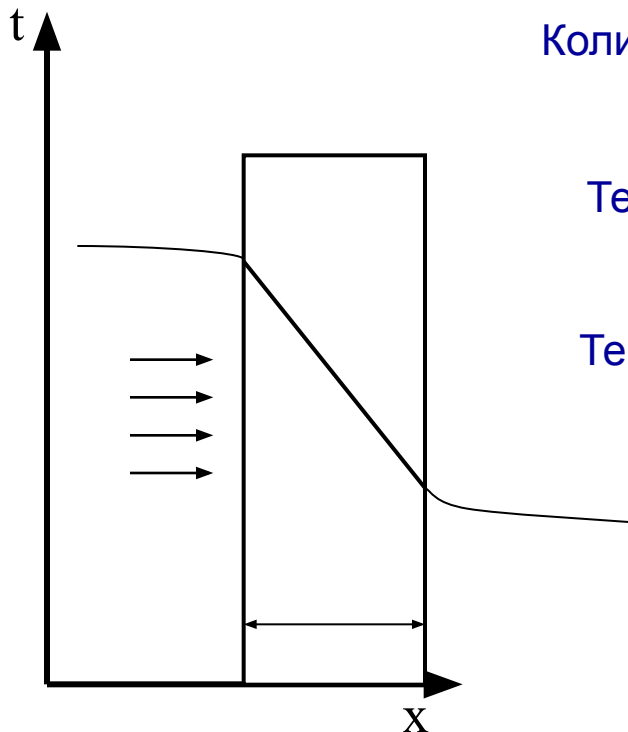
$$Nu_{\text{ж}} = C \cdot Re_{\text{ж}}^m \cdot Pr_{\text{ж}}^n \cdot (Gr_{\text{ж}} \cdot Pr_{\text{ж}})^k \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \cdot \epsilon_l$$

- 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/м² = 9,81 Па = 1 мм.водн.ст.

1 ат. (техн.атмосфера) = 1 кгс/см² = 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 = 10⁵ Па

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

Избыточное давление (P_и) – 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

$$r_i = V_i / V_{\text{см}}$$

$$g_i = m_i / m_{\text{см}}$$

$$r_i' = v_i / v_{\text{см}}$$

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

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

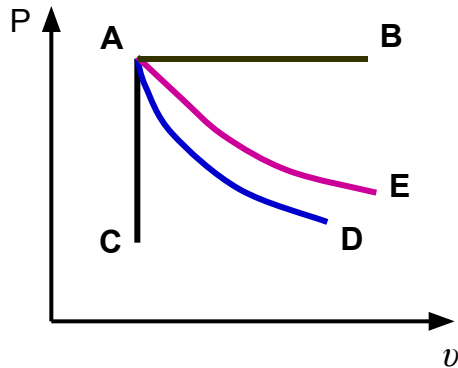
$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n (g_i \cdot R_i) = R_{\mu} \sum_{i=1}^n (g_i / \mu_i) = 1 / \sum_{i=1}^n (r_i / R_i)$$

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



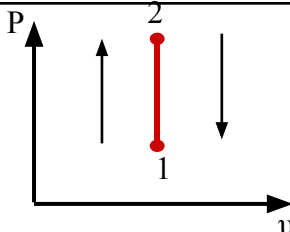
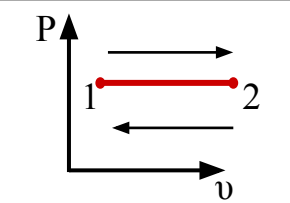
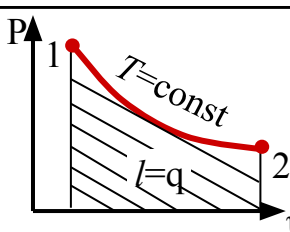
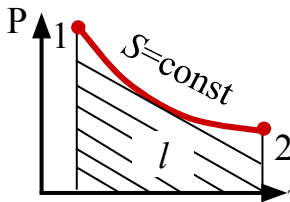
AB – изобарный процесс

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	$n = \pm \infty, v = \text{const},$ $n = 0, P = \text{const},$ $n = 1, T = \text{const},$ $n = k, P \cdot v^k = \text{const}.$	$P \cdot v^n = \text{const},$ $n - \text{показатель}$ 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

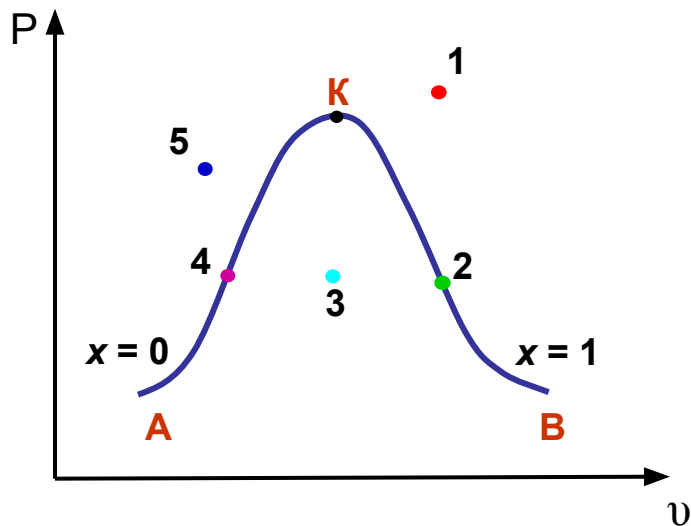
Степень сухости – массовая доля сухого пара во влажном паре

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

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 м³ 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

$$d = M_{\text{п}} / M_{\text{в}}$$

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

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

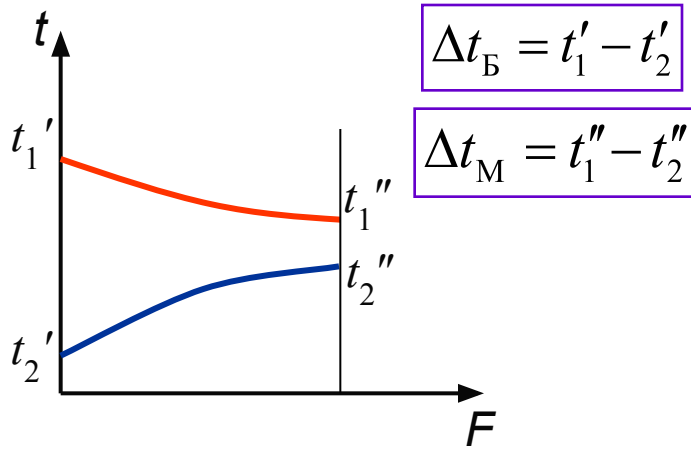
Расчетные уравнения

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

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

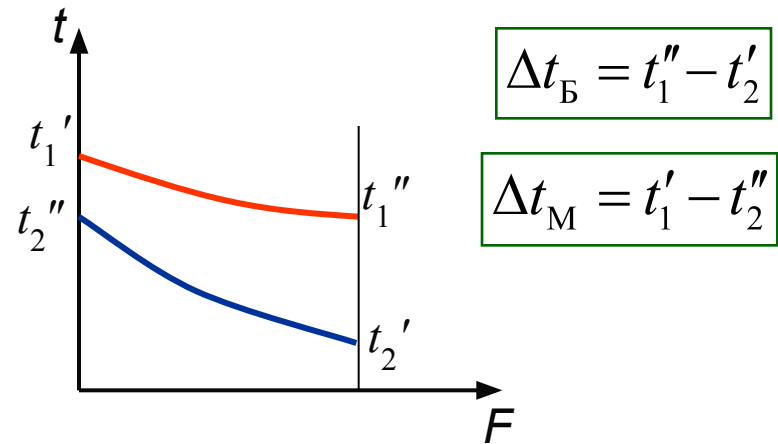
Расчет теплообменных аппаратов

Температурный график
для аппаратов с прямотоком



$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \left(\frac{\Delta t_B}{\Delta t_M} \right)}$$

Температурный график
для аппаратов с противотоком



$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_B + \Delta t_M}{2}$$

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

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

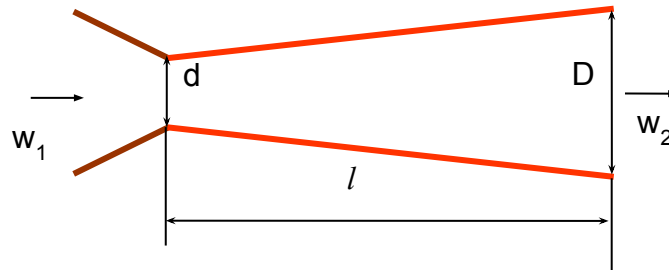
Критическая скорость – скорость газа в выходном сечении канала, при давлении равном или меньшем критического

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

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



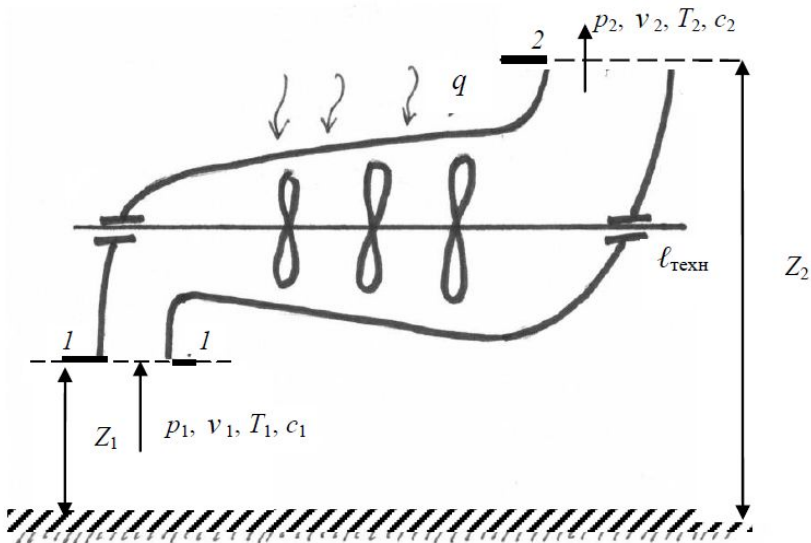
Термодинамика потока

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**

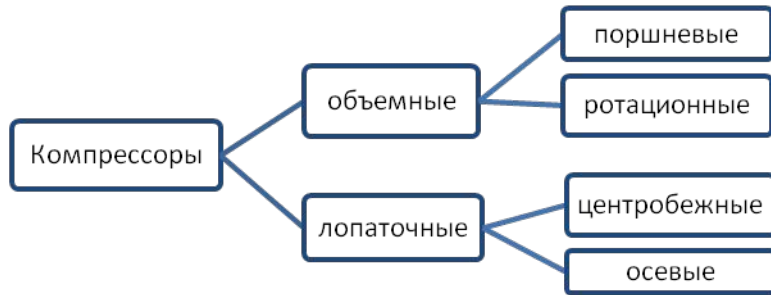
Дросселирование – необратимый процесс, при котором увеличивается энтропия и уменьшается работоспособность рабочего тела

Уравнение процесса дросселирования $h_1 = h_2$

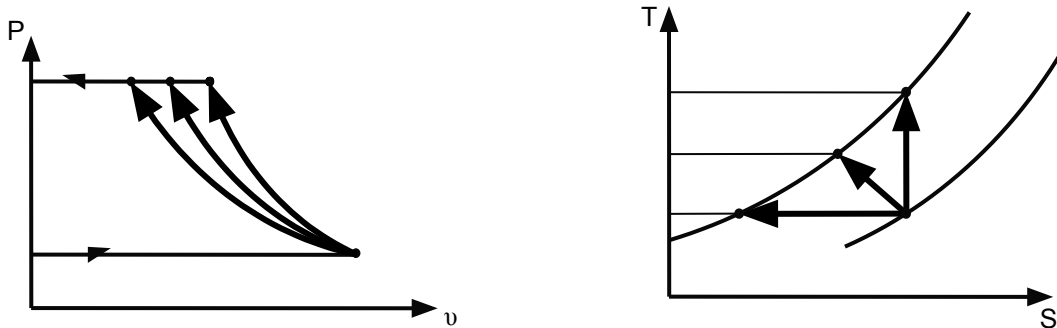


Анализ процессов в компрессоре

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

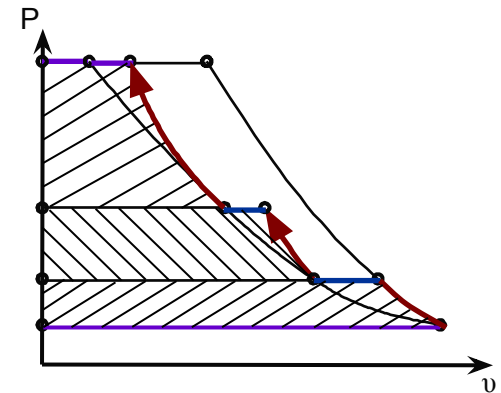
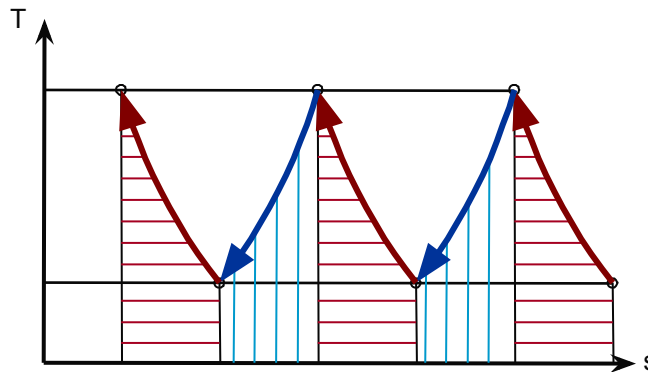
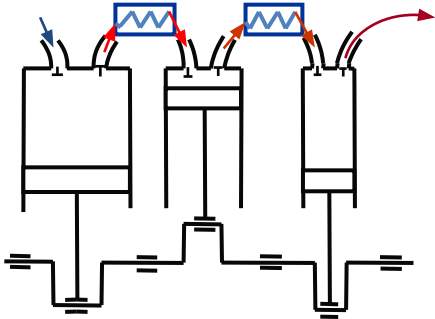
Изотермический КПД (отношение работы, затраченной на привод компрессора при изотермическом сжатии к затраченной работе действительного компрессора)

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

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

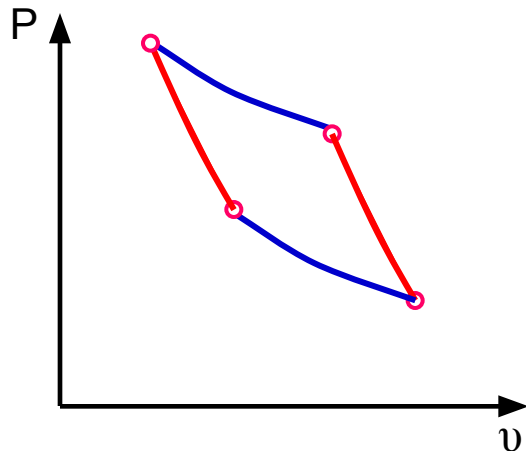


Термодинамические циклы

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)

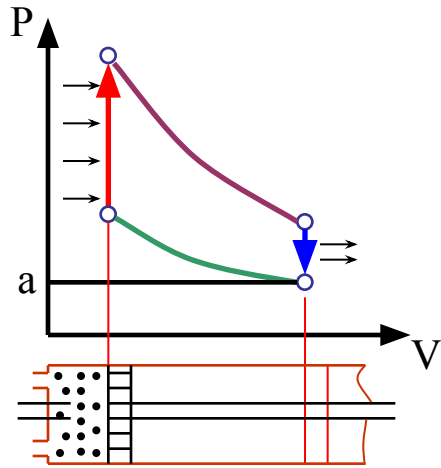


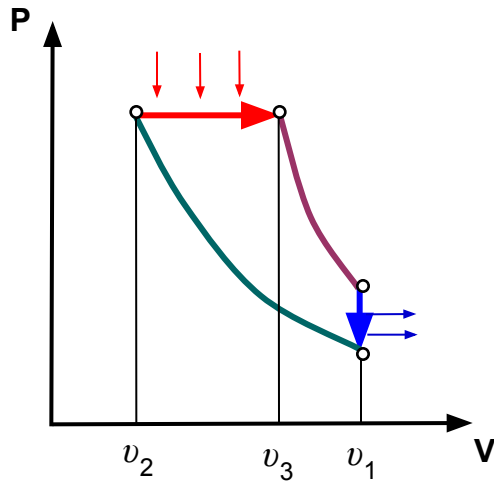
Диаграмма реального двигателя

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)



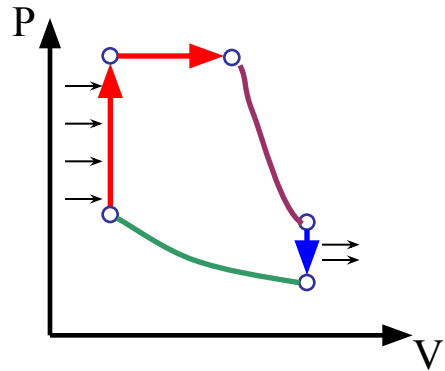
PV диаграмма цикла

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

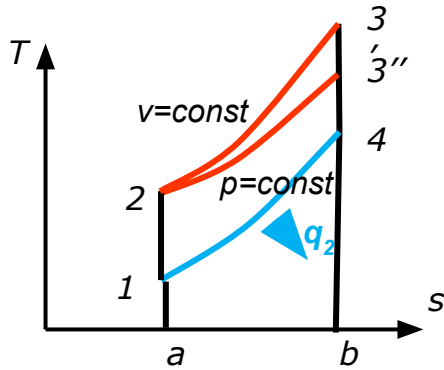
Цикл Тринклера: смешанный подвод теплоты ($V=\text{const}$ и $P=\text{const}$)



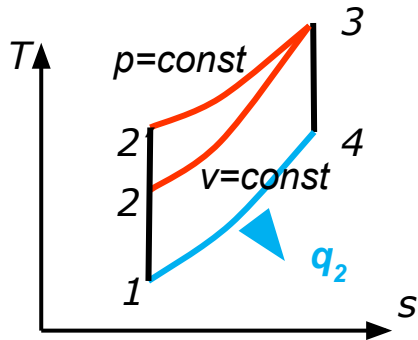
Термический к.п.д. цикла Тринклера

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

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

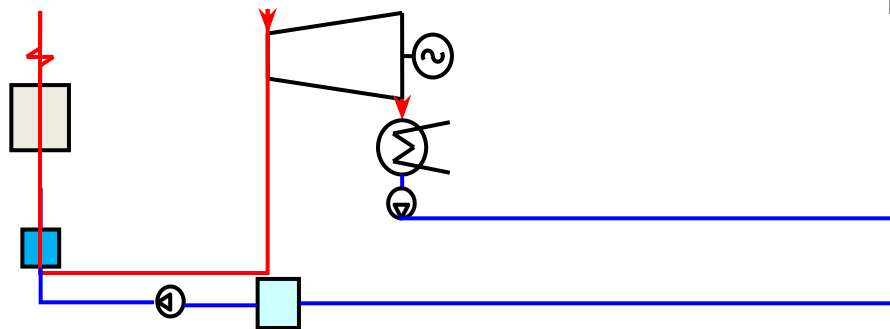


Сравнение циклов ДВС $T_3 = \text{const}$

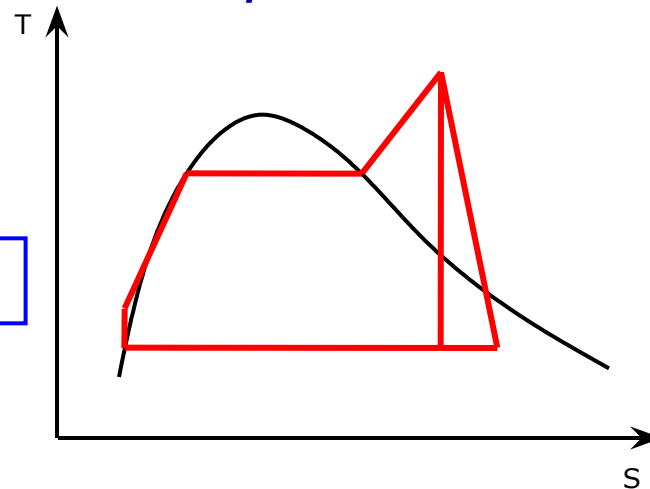


Цикл паротурбинной установки

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

$$\eta_t = a / q_1$$

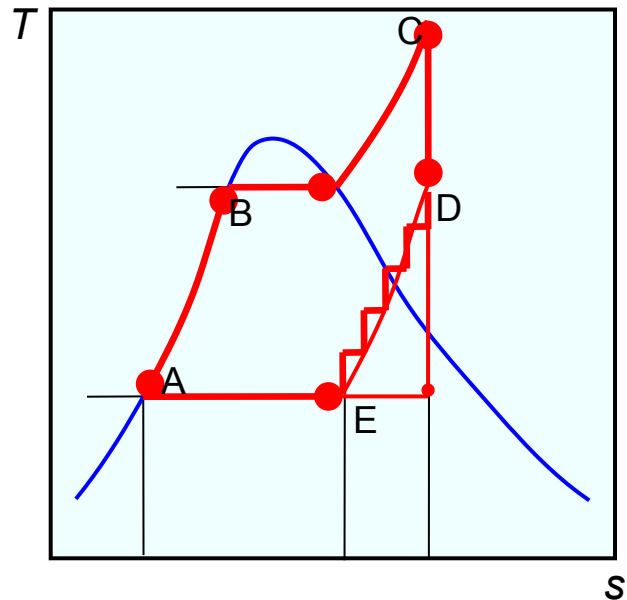
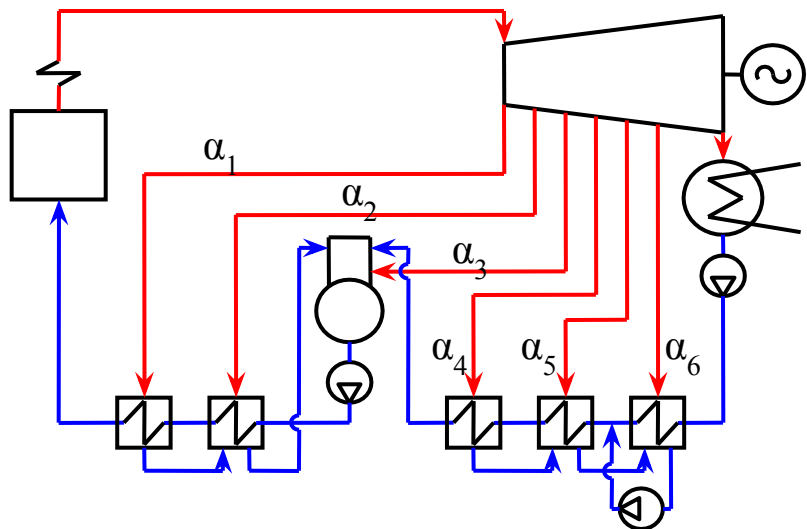
$$a = a_T - a_H, \quad a_T = h_1 - h_2, \quad a_H = h_3 - h_2'$$

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

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

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

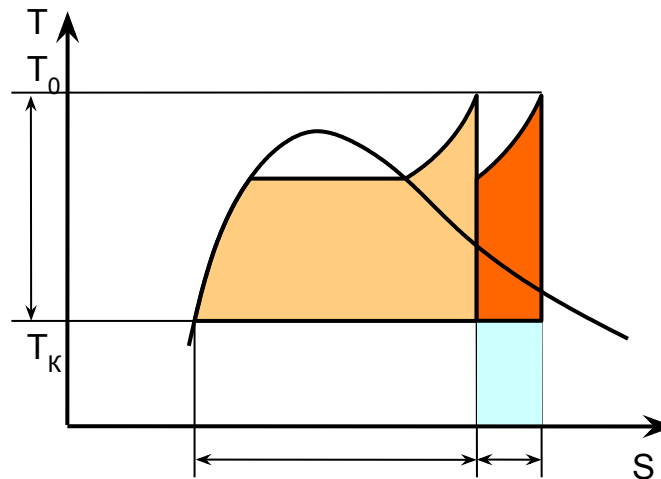
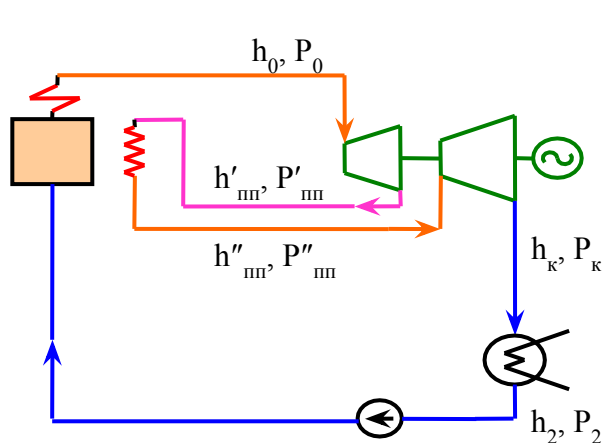
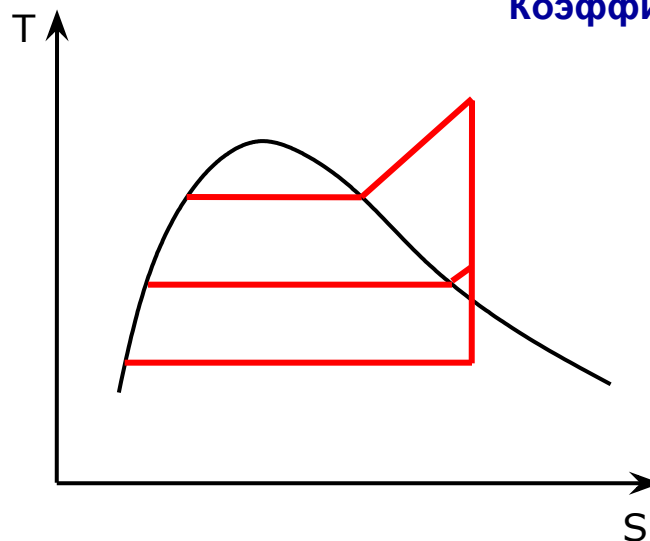
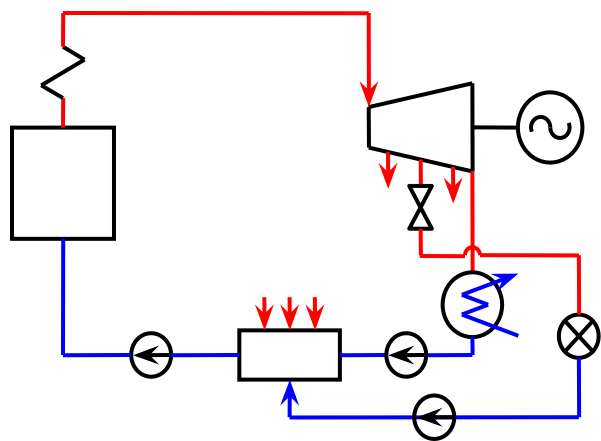


Схема и цикл теплофикационной установки

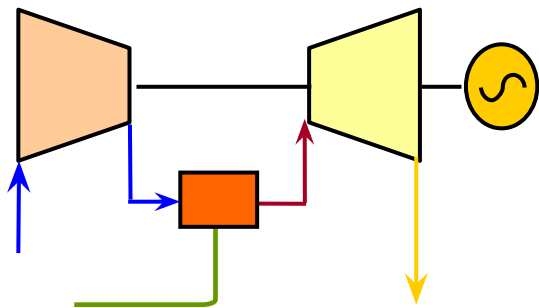


Коэффициент использования теплоты

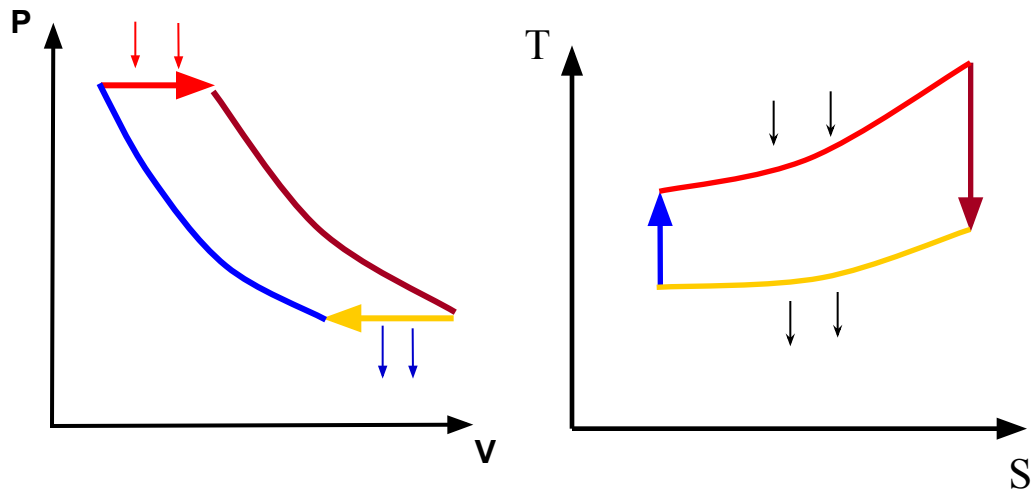
$$\eta_{\text{и}} = \frac{q_{\text{пол}} + q_2}{q_1}$$

Цикл газотурбинной установки

Схема ГТУ



Цикл ГТУ

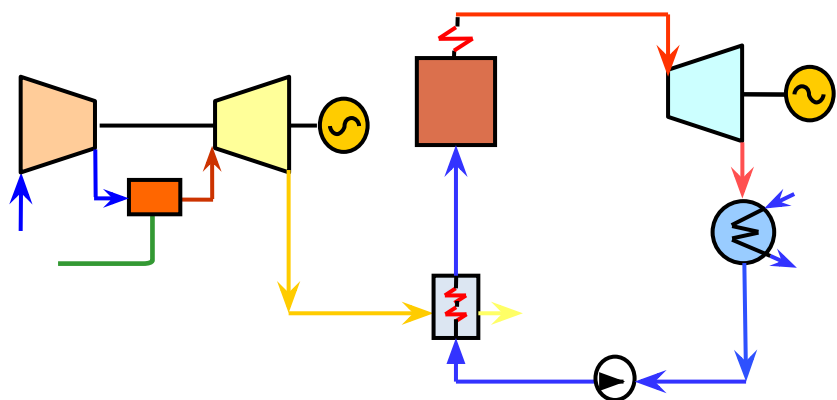


КПД цикла ГТУ

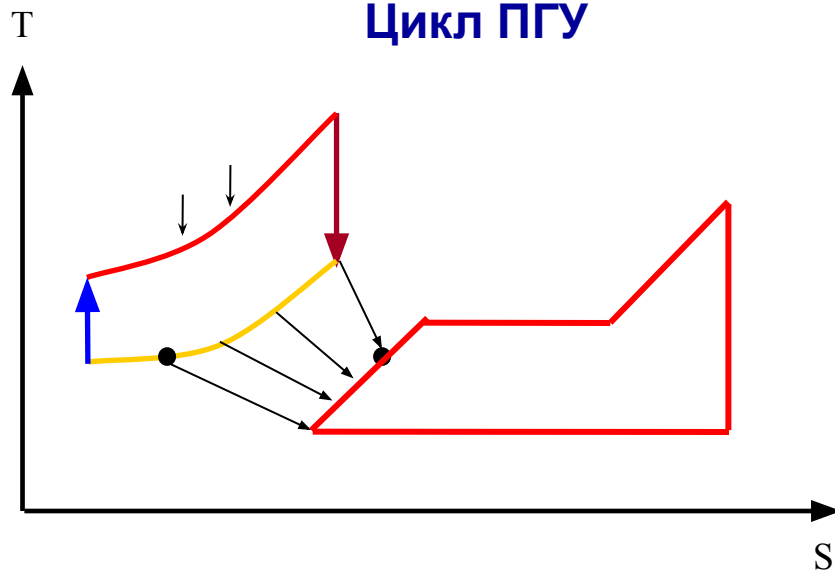
$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}$$

Цикл парогазовой установки

Схема ПГУ

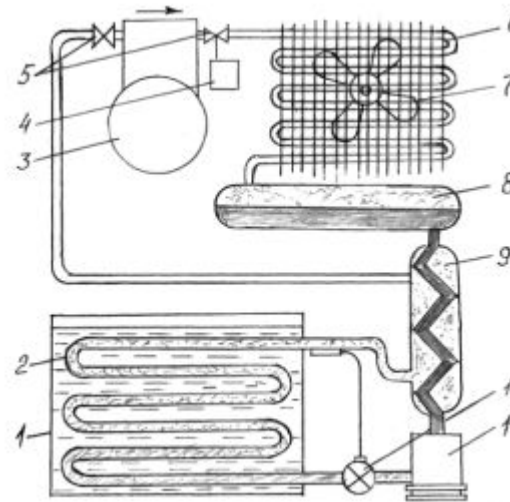
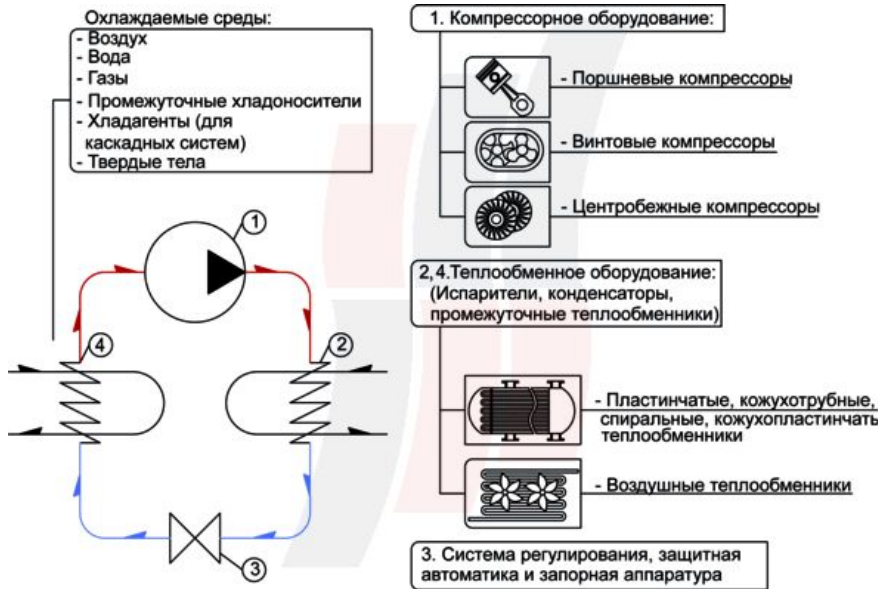


Цикл ПГУ

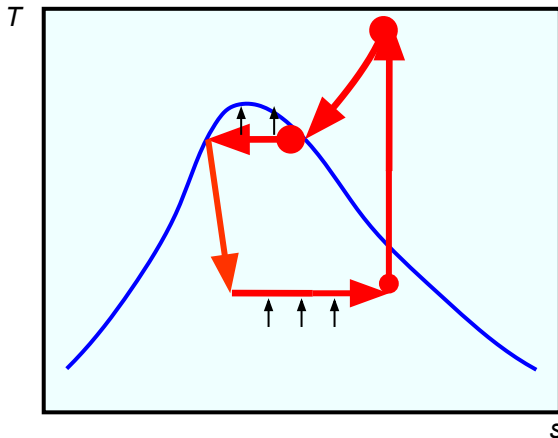


Холодильная установка

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

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

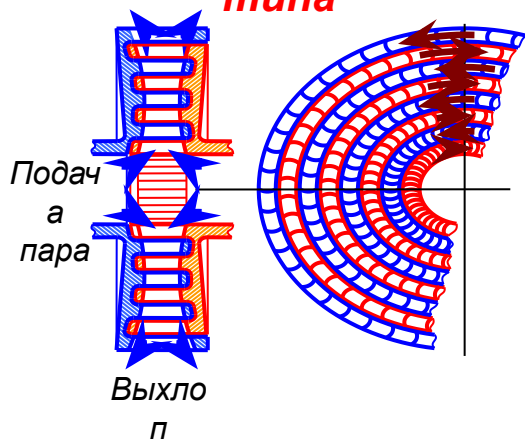
Общая характеристика турбин

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

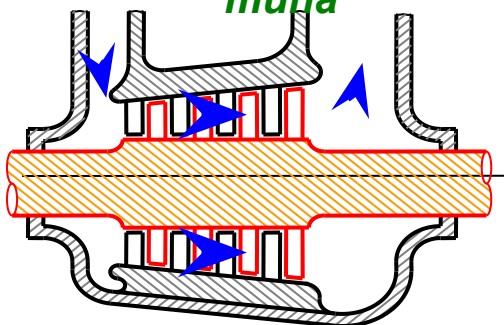
В зависимости от рабочего тела, турбины делятся на: **паровые, газовые,**

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

Турбины радиального на:
типа

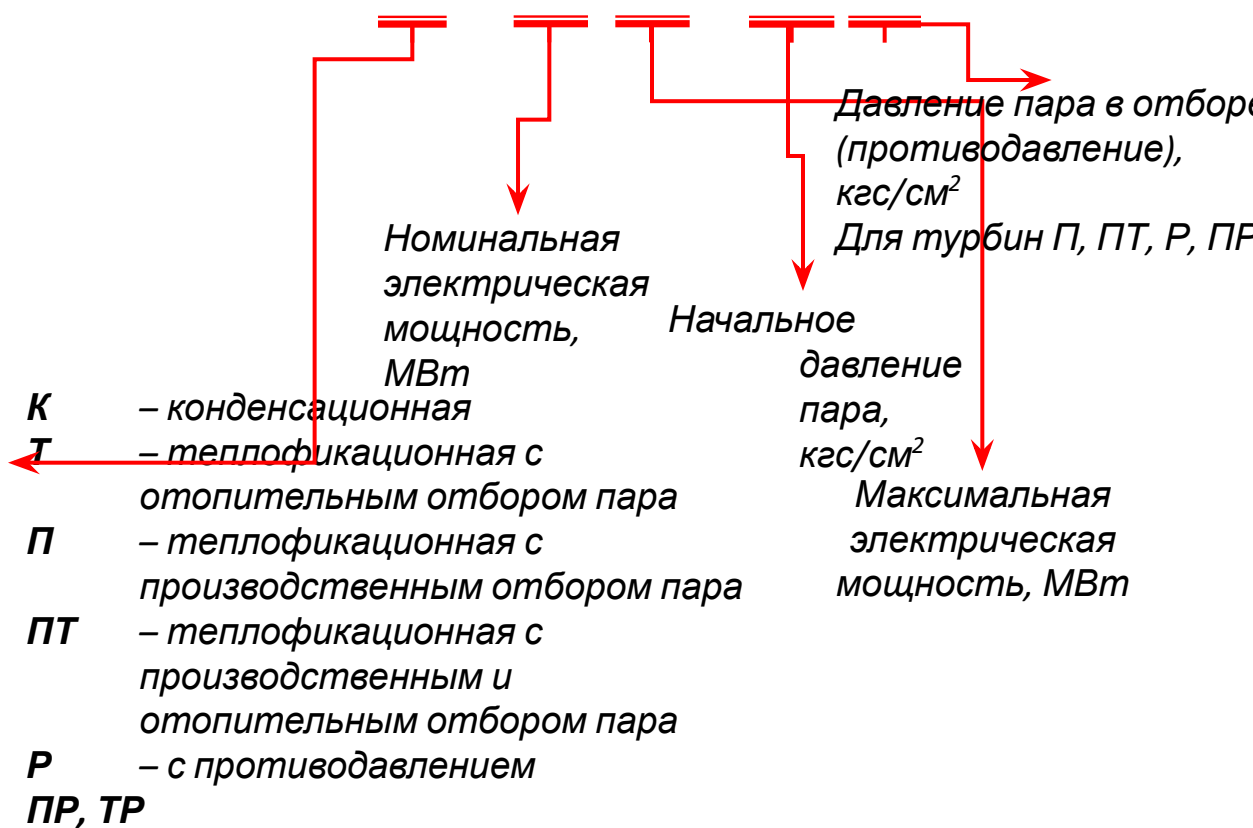


Турбины аксиального типа



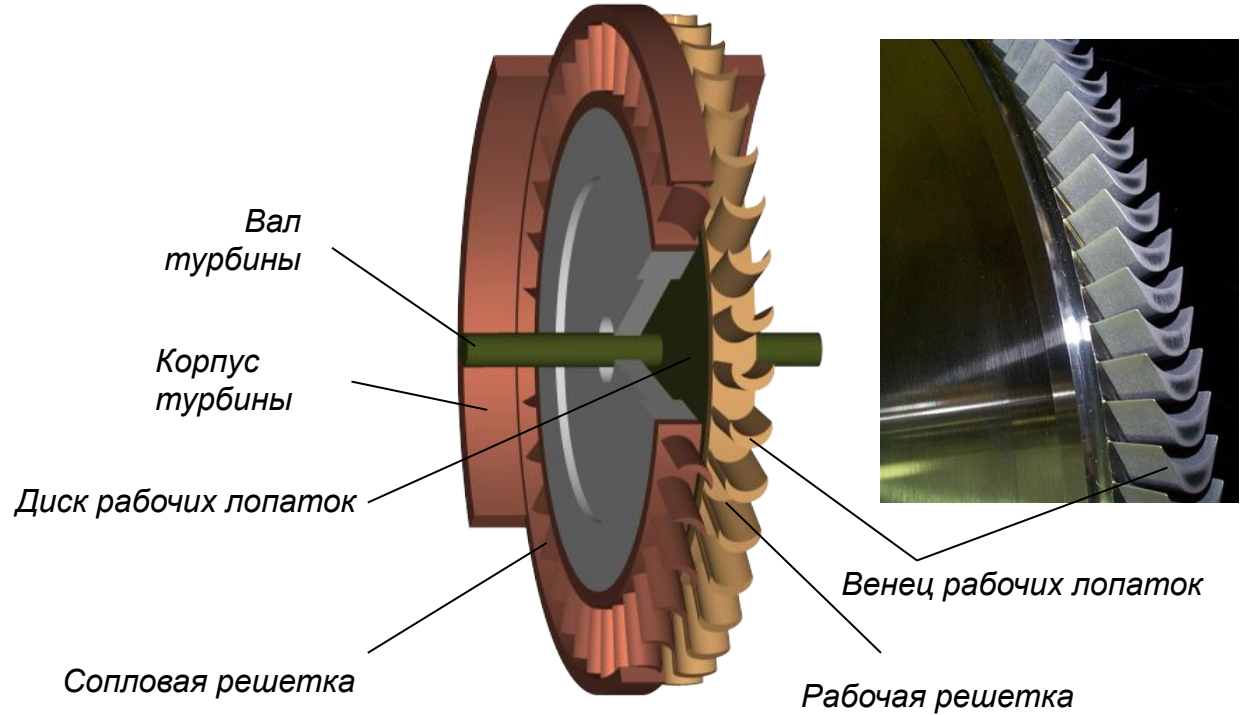
Маркировка паровых турбин

ПТ – 135/165 – 130/15



Ступень турбины аксиального типа

Ступень турбины – совокупность рабочей и сопловой решеток



Развертка турбинной ступени

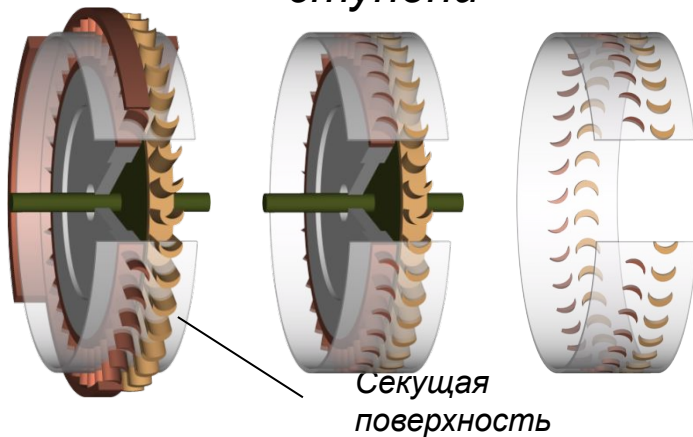
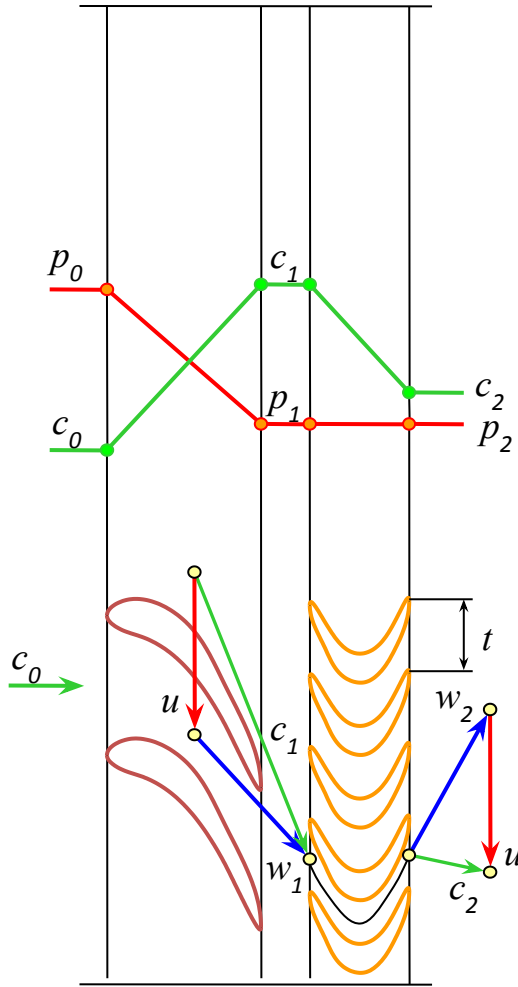
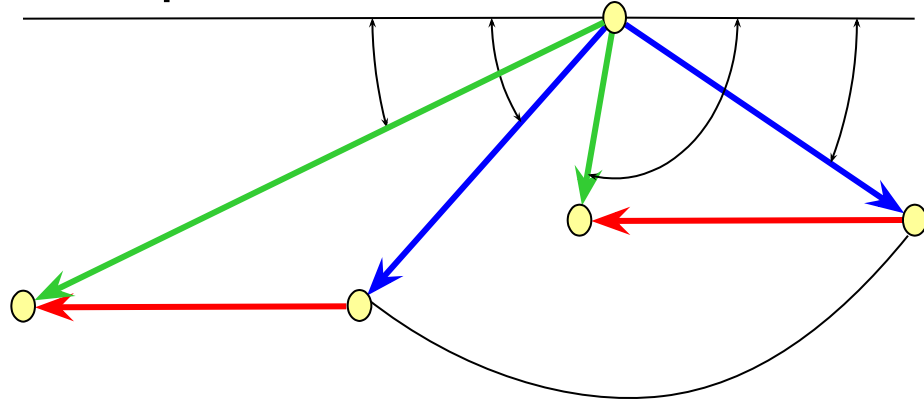


Схема работы пара в активной ступени и треугольники скоростей



Работа 1 кг рабочего тела:



Сила, действующая в направлении вектора u :

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

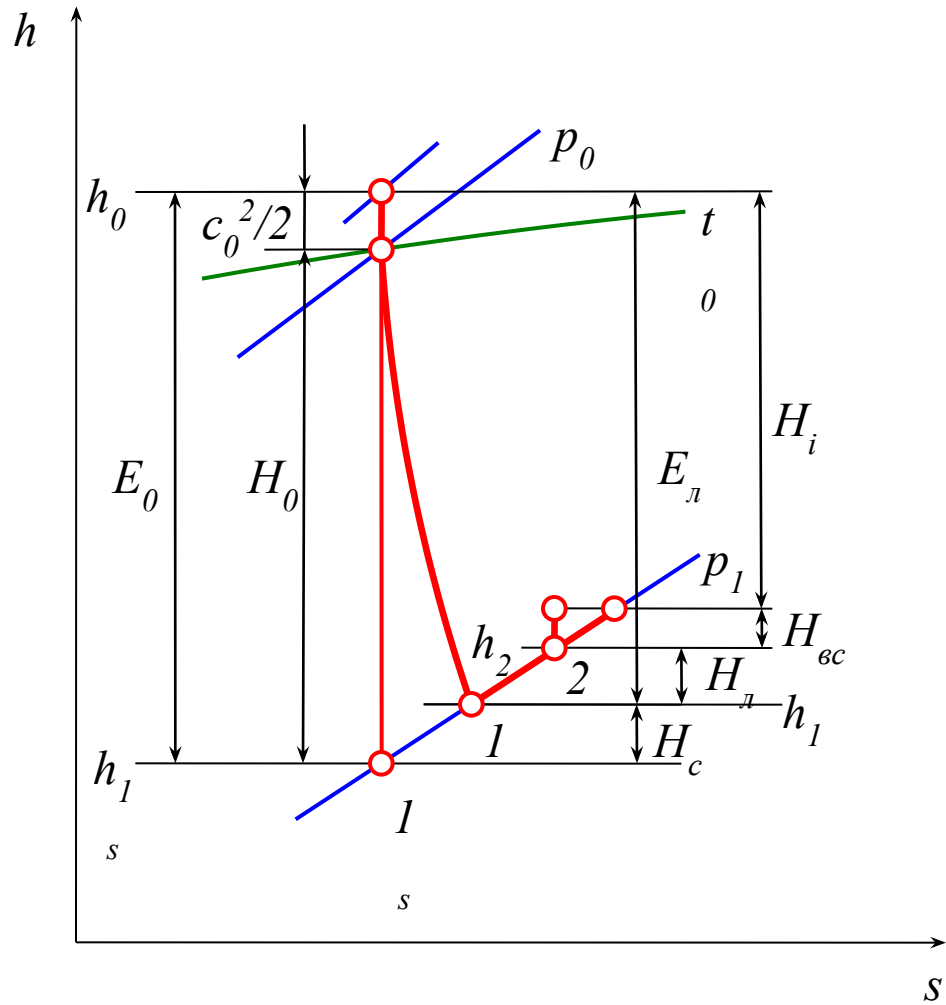
Мощность, развиваемая потоком на рабочих лопатках:

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

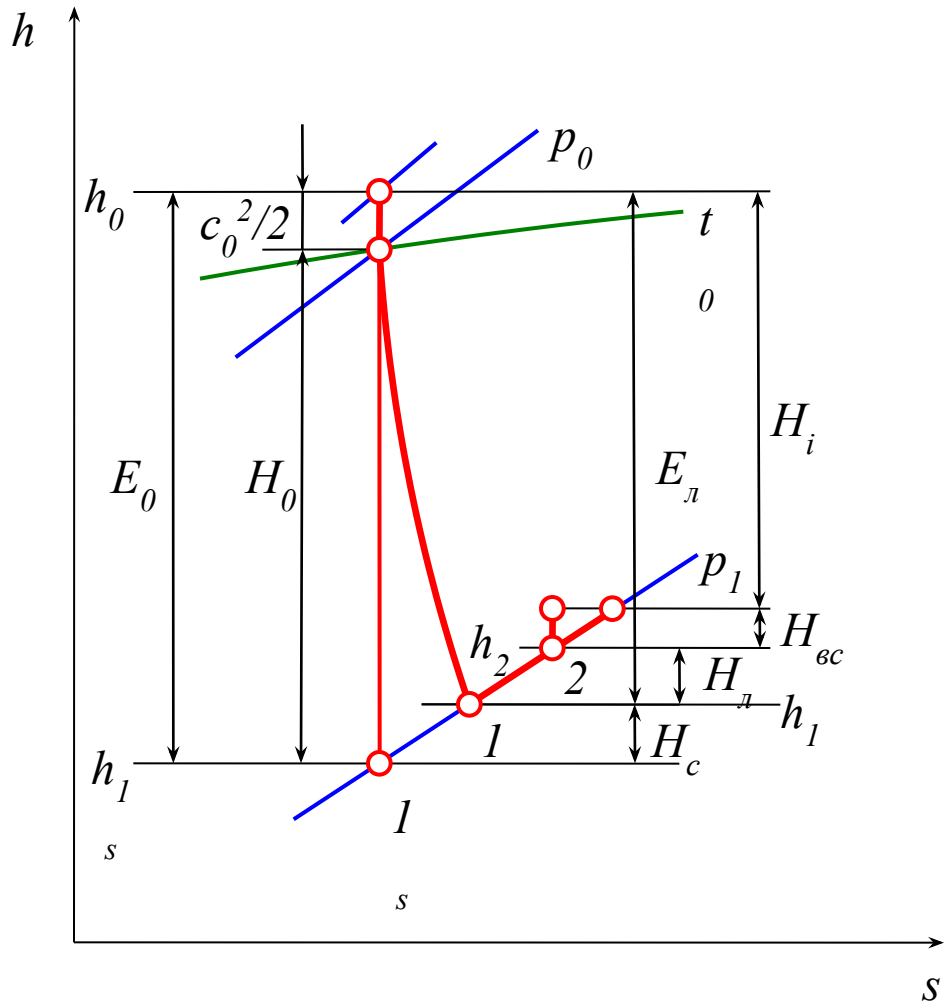
$$l = N_u / G$$

Относительный лопаточный КПД

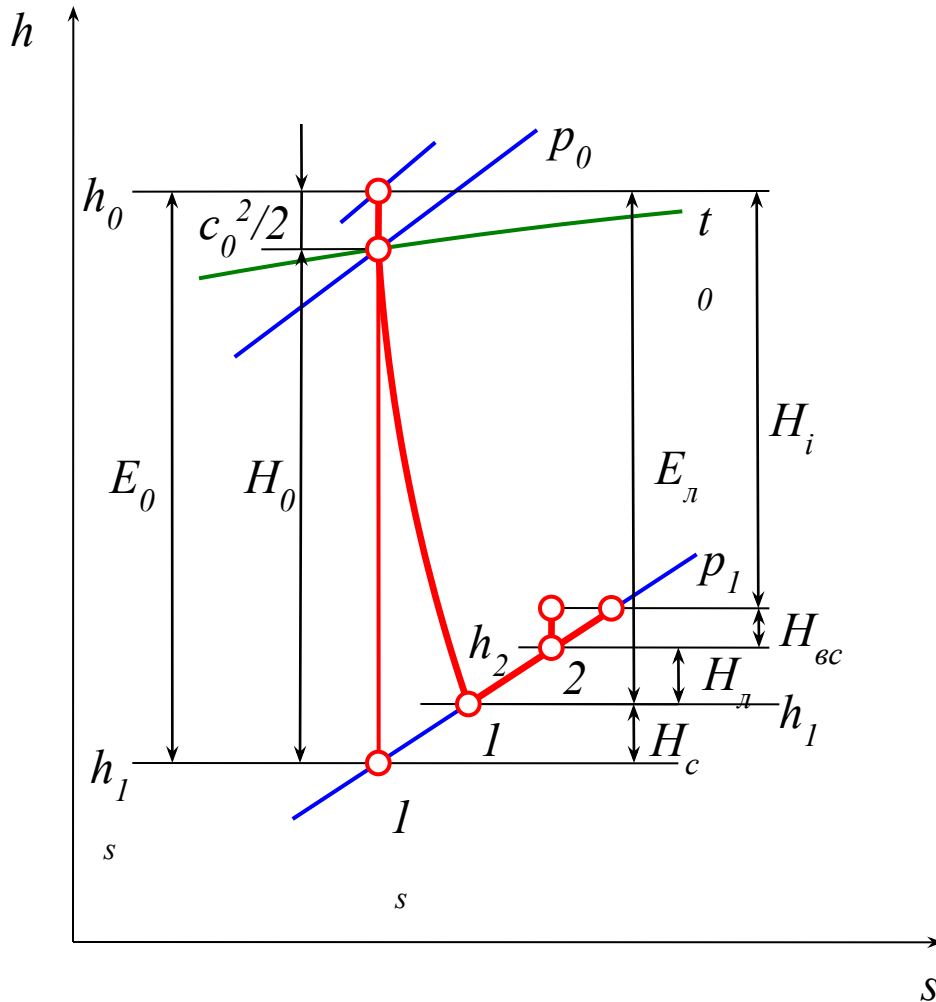
Потери работы и скорости пара в соплах активной ступени



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

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

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

$$N_i - \Delta N_i = N_e$$

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

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

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

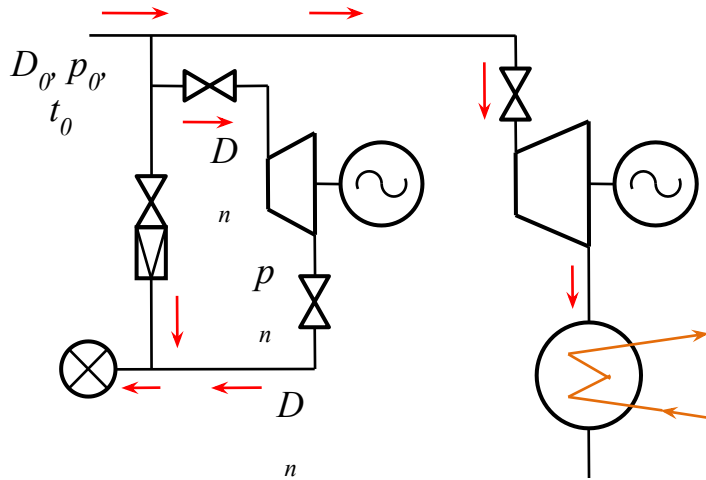
$$\frac{N_{\text{в}}}{N_i} = \frac{N_{\text{в}}}{N_e} \frac{N_e}{N_i} = \eta_{\text{в}} \eta_i = \eta_{\text{и.в.}}$$

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

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

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

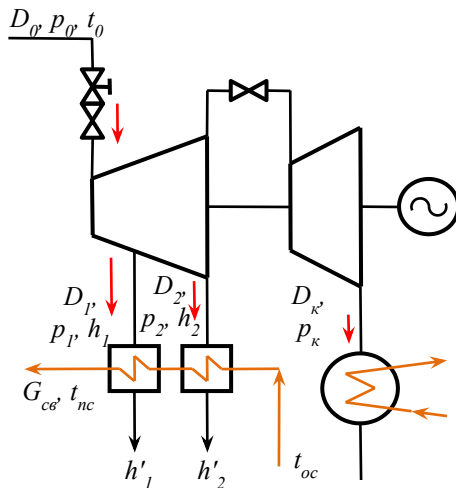
Турбины с противодавлением (типа Р)



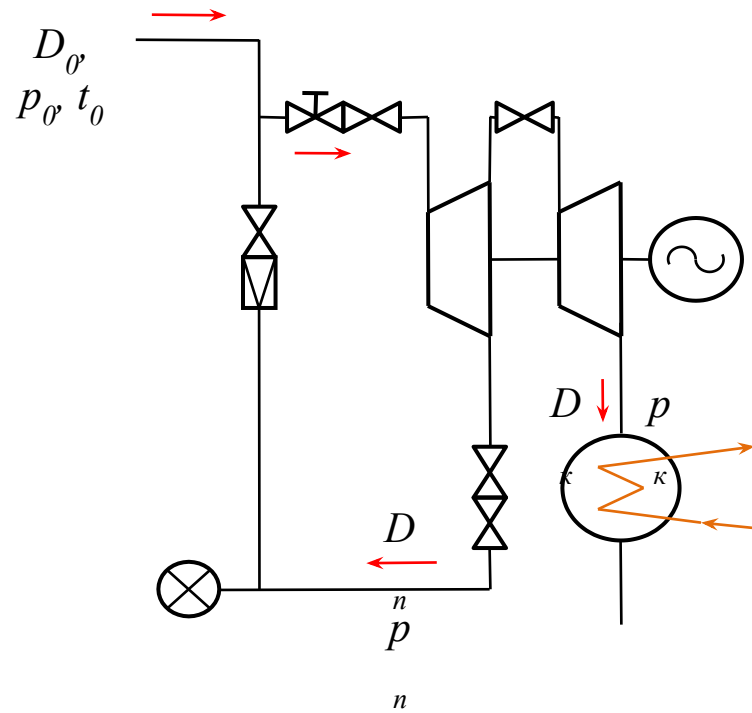
Если максимальные тепловые нагрузки не удастся покрыть с помощью противодавления турбины, то пар потребителю отпускается также через РОУ

Т.к. Р-турбина работает по тепловому графику нагрузок, то для обеспечения электрического потребителя обязательно имеется К-турбина

Турбина с двухступенчатым подогревом сетевой воды (типа Т)

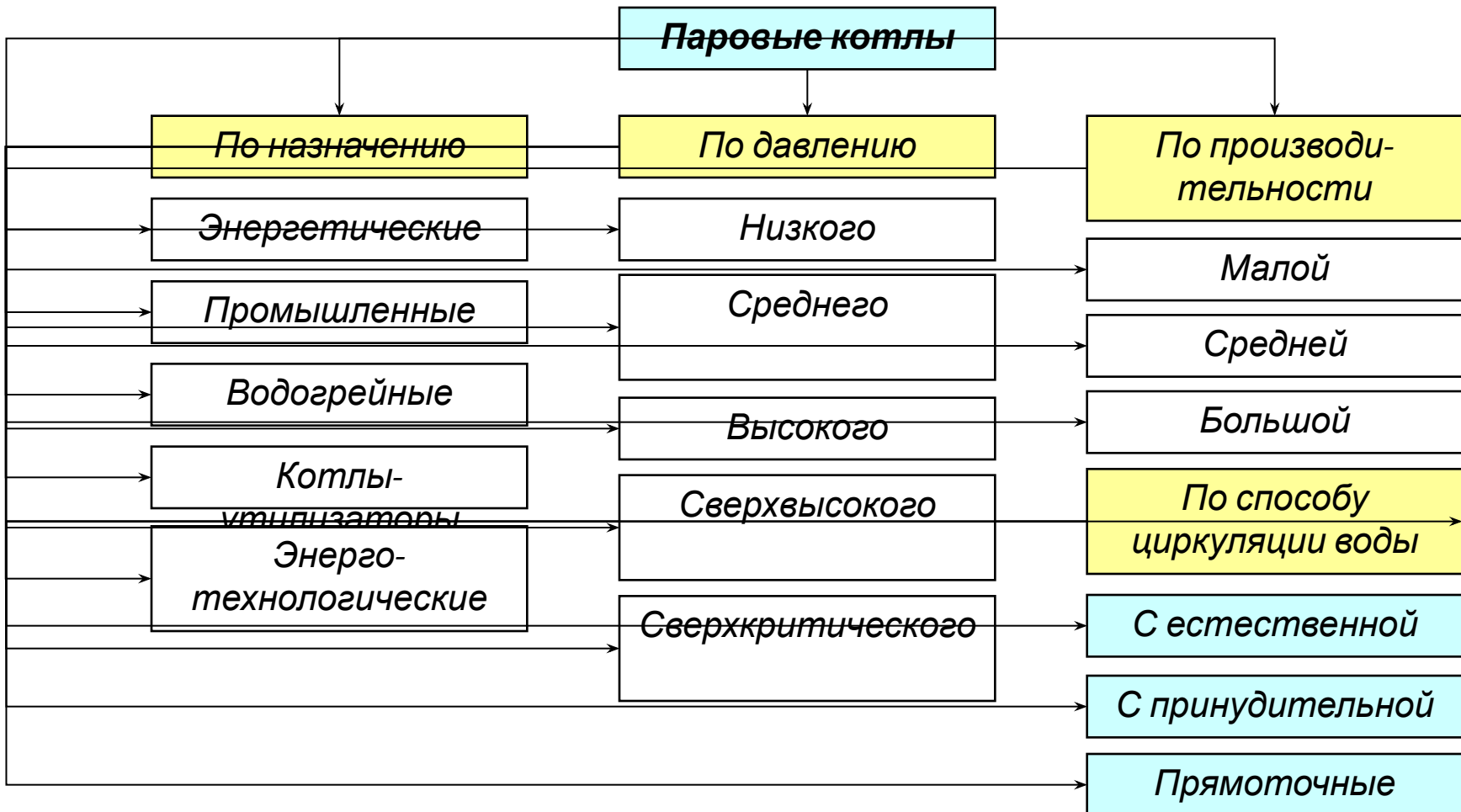


Турбины с промежуточным регулируемым отбором пара (типа П)

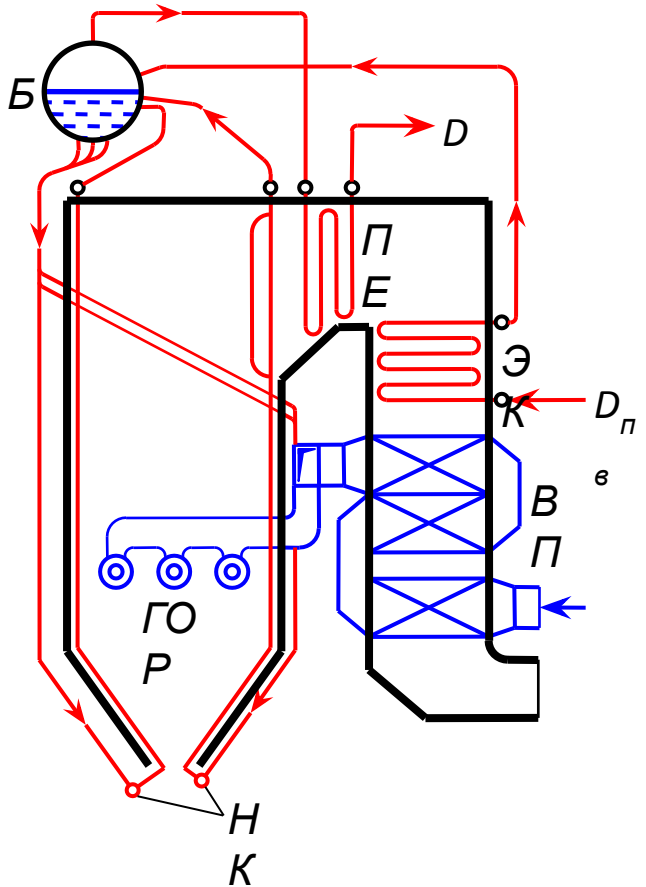


Котельные установки

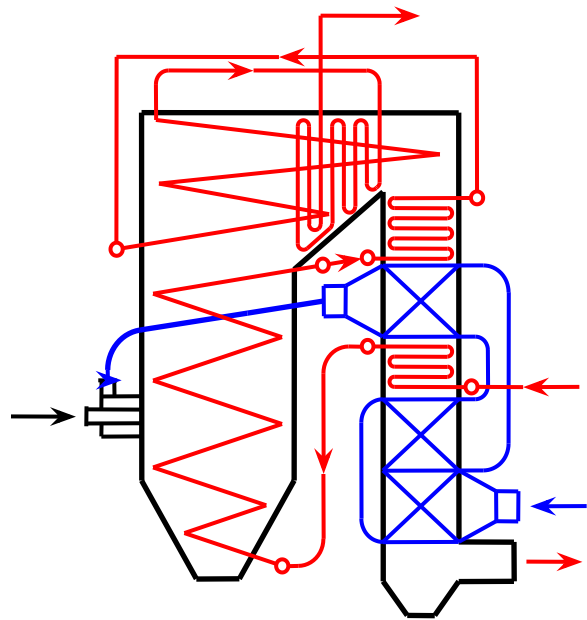
Парогенератор – устройство, предназначенное для выработки пара заданных параметров, за счет преобразования химической энергии топлива в тепловую



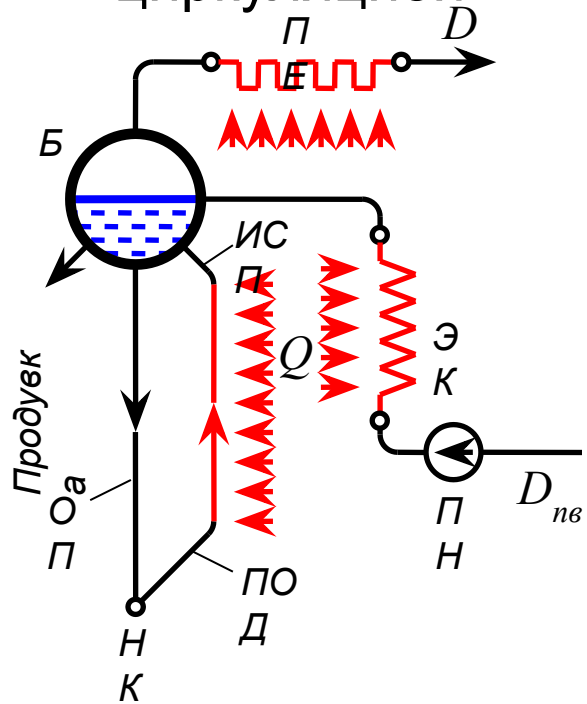
Принципиальная схема барабанного парогенератора



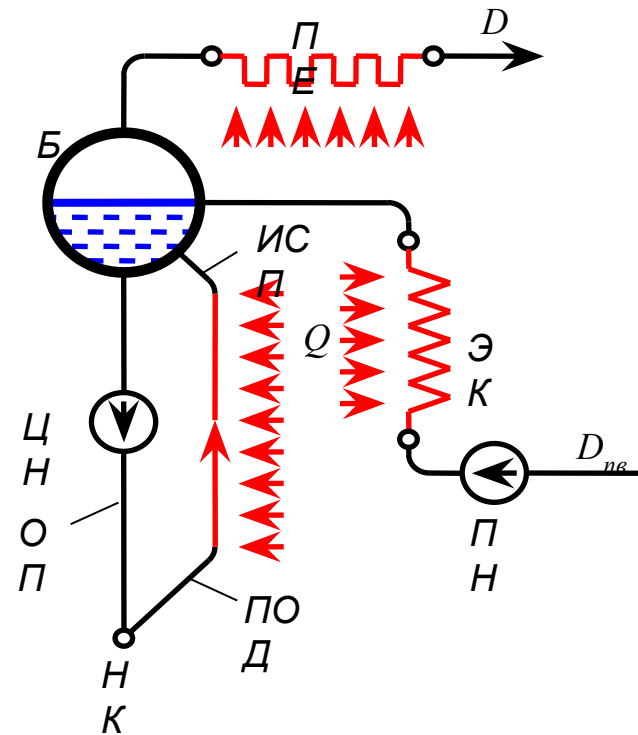
Принципиальная схема прямоточного парогенератора




Парогенератор с
естественной
циркуляцией



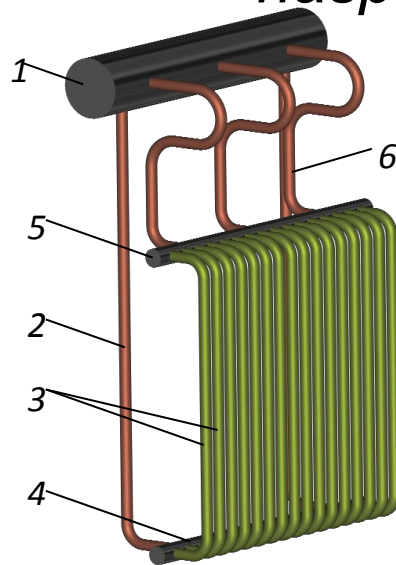
Парогенератор с
многократной
принудительной циркуляцией



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

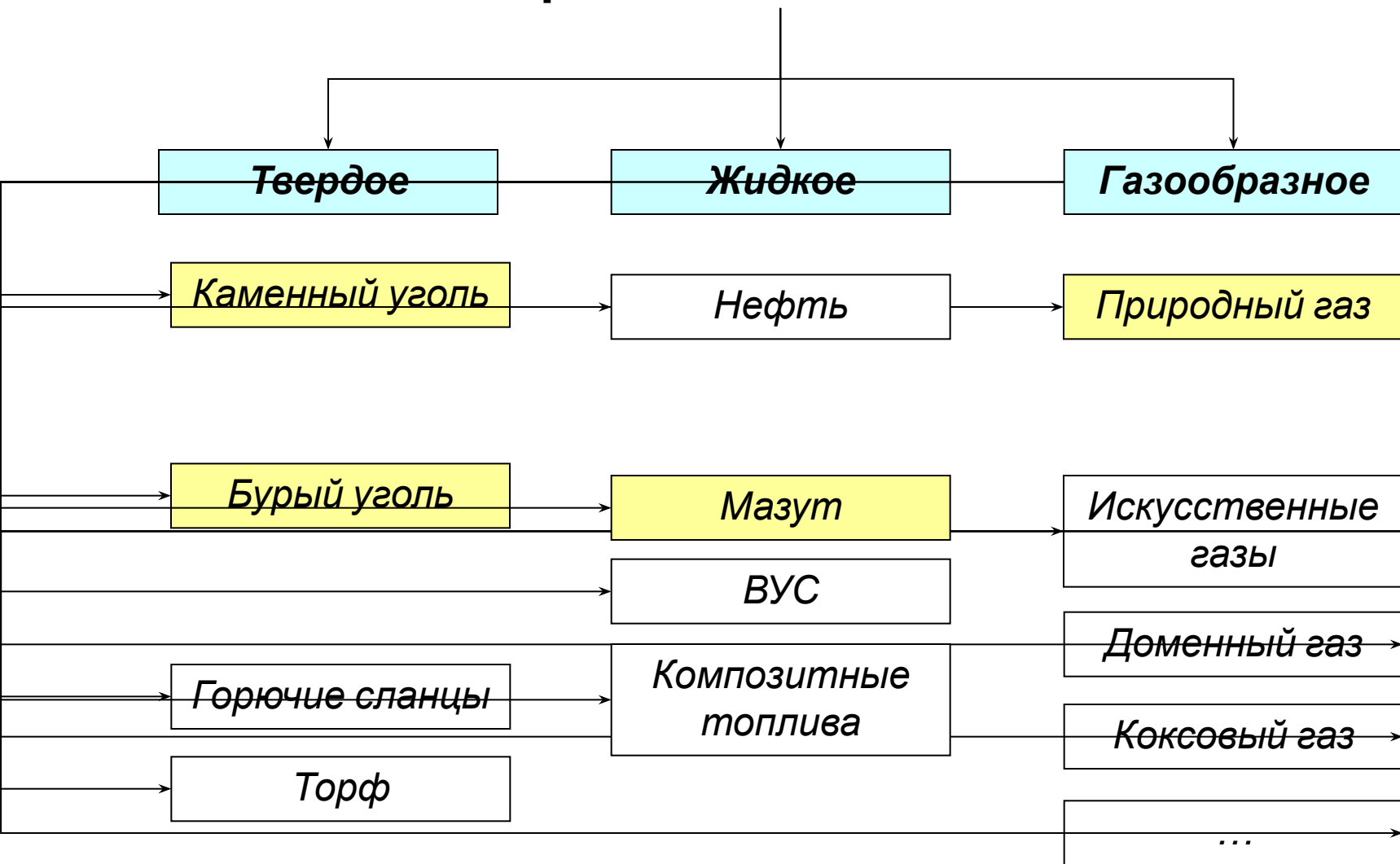
Н

– наддув

...

Давление пара, кгс/см²

Энергетическое топливо



Химический состав топлива

Горючая часть

- Углерод
- Водород

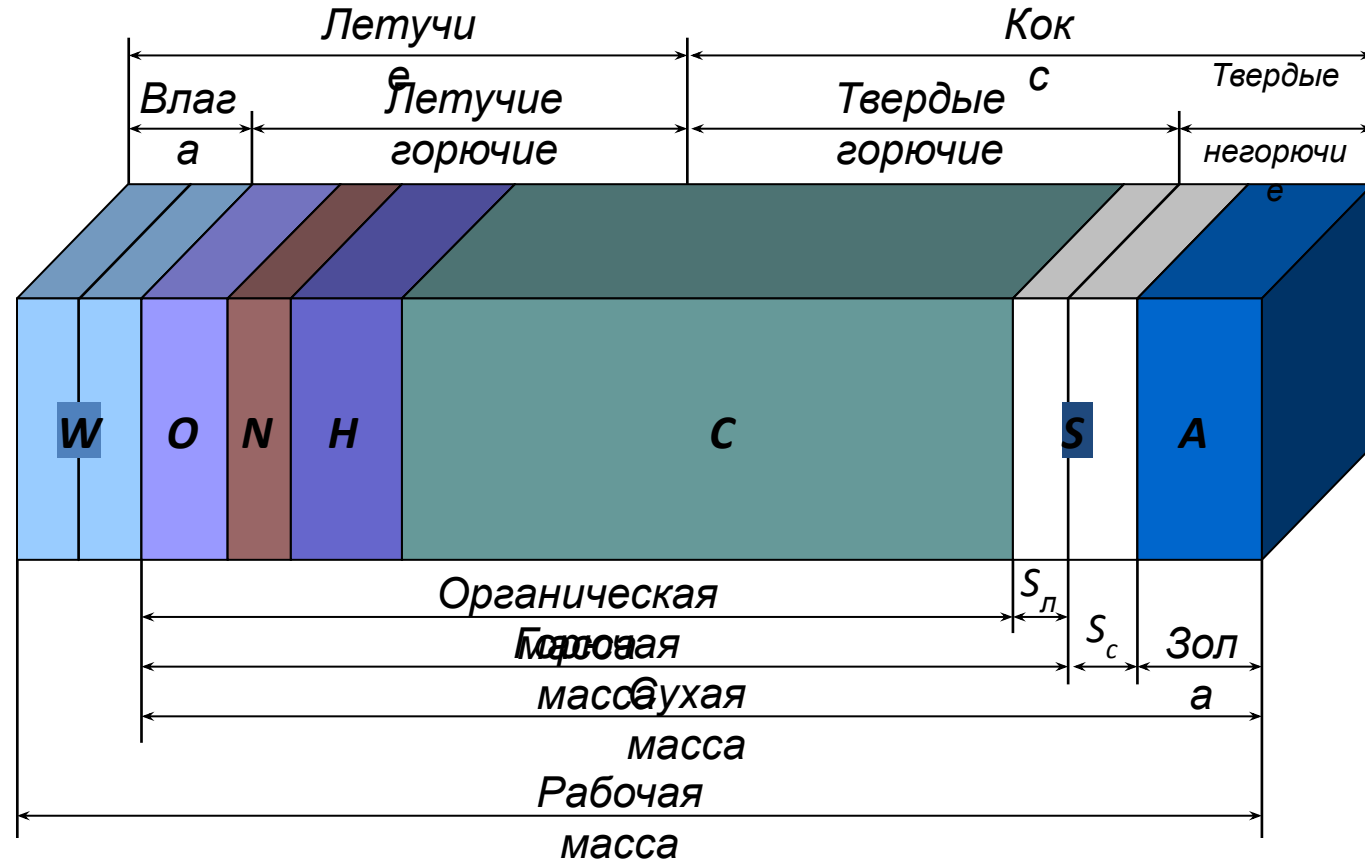
Балластная часть

Внутренний балласт

- Кислород
- Азот
- Сера

Внешний балласт

- Зола
- Влага



- Рабочая масса топлива (поступающее потребителю)

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

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

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

- Горючая масса топлива

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

- 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:

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

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

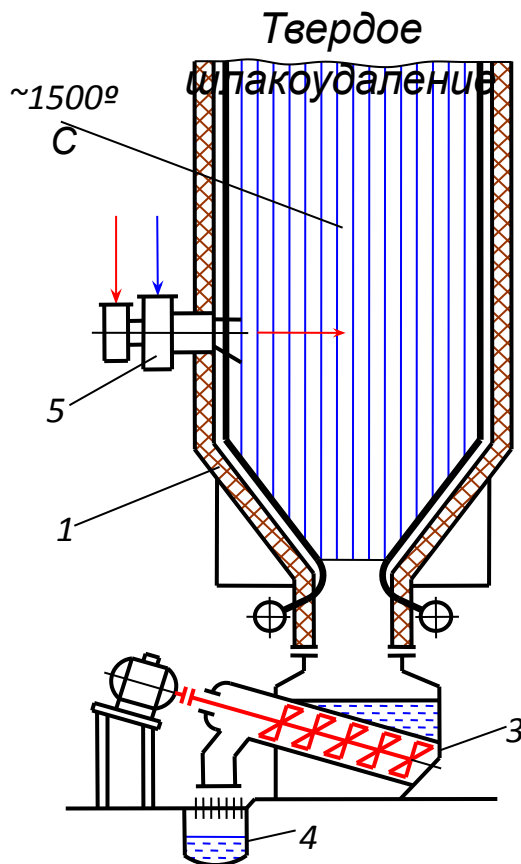
$$Q_i^{\delta} = 338C^D + 1025I^D - 108,5(I^D - S^D) - 25W^P$$

Условное топливо

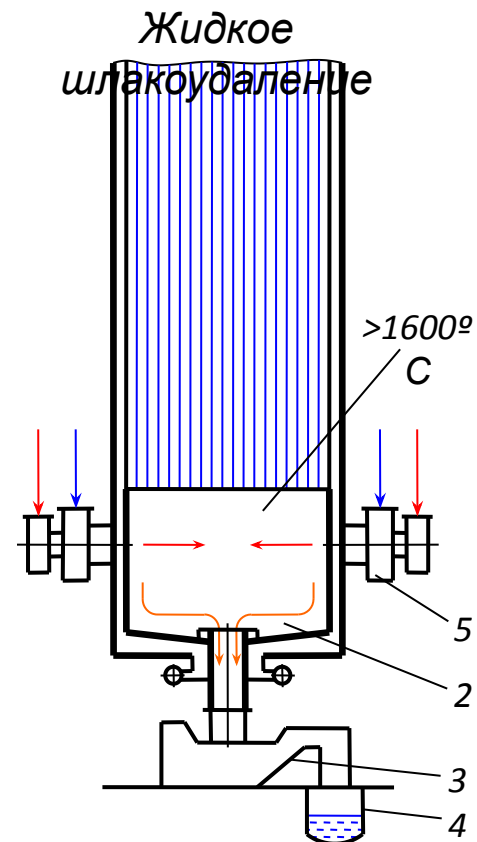
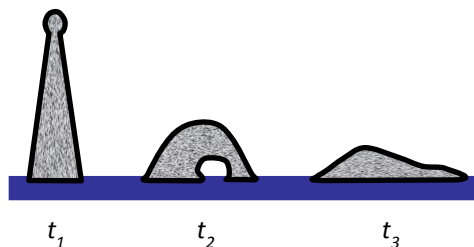
При сравнении работающих установок по экономичности и другим показателям удобно пользоваться относительными характеристиками топлива, такими, например, как условное топливо и приведенные влажность, зольность и сернистость.

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, м³/кг

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

- Теоретический объем продуктов сгорания, м³/кг

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

- Теоретический объем трехатомных газов, м³/кг

м³/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, м³/кг

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

- Теоретический объем водяных паров, м³/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, м³/кг

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

объем водяных паров за счет испарения рабочей влаги, м³/кг

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

объем водяных паров с атмосферной влагой в теоретическом объеме, м³/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

$$\alpha_\delta = \frac{\hat{a}}{V^0}$$

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

- Увеличение объема водяных паров, м³/кг

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

- и количество избыточного воздуха, м³/кг

$$\Delta V_{\hat{a}} = (\alpha_\delta - 1)V^0$$

- Действительный объем продуктов сгорания, м³/кг

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

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

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

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

- Потеря тепла с уходящими газами

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

- 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**

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

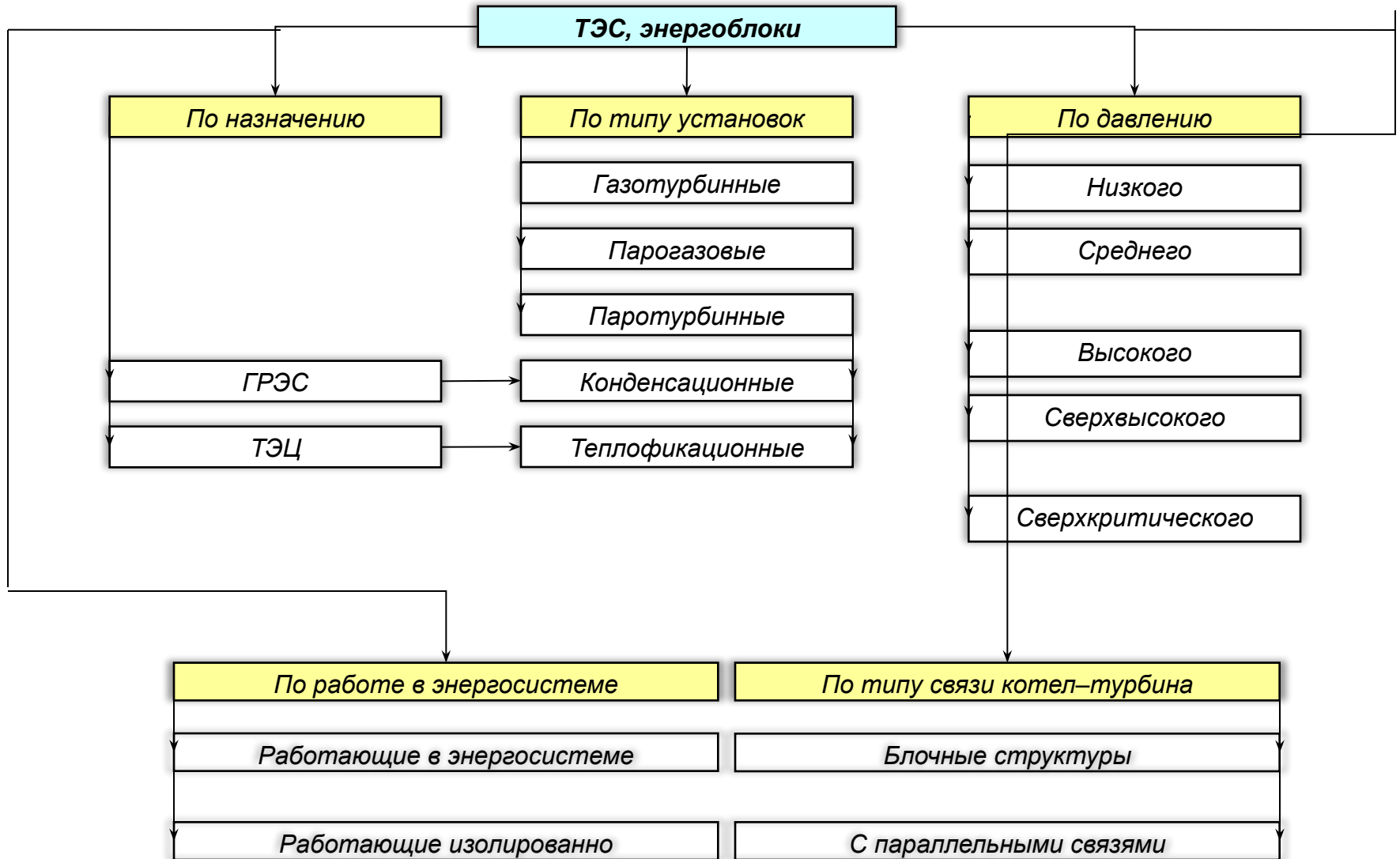
- Расход топлива, подаваемого в топку котла, кг/с**

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

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

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

Классификация ТЭС и энергоблоков



Технологическая схема ТЭС

