

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Энергетический институт

Кафедра атомных и тепловых электростанций (АТЭС)

Термодинамические циклы АЭС

Руководитель дисциплины

БЕЛЯЕВ Леонид Александрович

2016 г.

Турбинные установки АЭС

Распределение учебного времени

	Турбомашины АЭС			Термодинамические циклы АЭС	
	Объем в часах		Всего часов		Объем в часах
	6 семестр	7 семестр			6 семестр
Лекции	40		32	16	
Лабораторные занятия	16		8	-	
Практические занятия	34	16	40	32	
Курсовой проект		+		-	
Всего аудиторных занятий	90	16	106	48	
Самостоятельная (внеаудиторная) работа	72 (4 ч/нед.)	81 (4,5 ч/нед.)	153	60 (3 ч/нед.)	
Общая трудоемкость	162	97	259	108	
Форма отчетности	Экзамен	Диф. зачет		Зачет	

Результаты обучения

Знания - результаты усвоения информации через обучение, который определяется набором фактов, принципов, теорий и практик, соответствующих областей рабочей и учебной деятельности. Знания могут быть теоретическими и (или) практическими.

1. Книга (!) – источник знаний.
2. Лекции.
3. Практические занятия.
4. Контрольные работы (по 5 в каждой дисциплине).
5. Зачет, экзамен, дифференцированный зачет.

Умения - подтвержденные (продемонстрированные) способности применять знания для решения задач и проблем.

1. **Индивидуальные домашние задания** - по 6 в каждой дисциплине
2. Практические занятия

Опыт - устойчивые (многократно подтвержденные) умения успешно решать проблемы в области профессиональной или иной деятельности.

Курсовой проект . Охватывает обе дисциплины

Группа 5031

Группа 5032

Турбомашины АЭС

Лекции

Доцент

Беляев Леонид Александрович

Практические
занятия

Доцент
Беляев Л.А.

Ассистент
Лавриненко Сергей Викторович

Лабораторные
занятия

Доцент **Беляев Л.А.**,
Ассистент **Мартышев
Владимир Николаевич**

Ассистент
Лавриненко С.В.

Термодинамические циклы АЭС

Лекции

Доцент

Беляев Л.А.

Практические
занятия

Доцент
Беляев Л.А.

Ассистент
**Слюсарский Константин
Витальевич**

Рекомендуемая литература

1. **Паровые** и газовые турбины для электростанций. / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 556 с.
2. **Турбины тепловых и атомных электрических станций.** /А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка и В.В. Фролова. – М.: Издательство МЭИ, 2001. 488 с.
3. Щегляев А.В. **Паровые турбины.** Учебник для вузов. Кн. 1 и 2.- М.: Энергоатомиздат, 1993.- 384 с.
4. Трояновский Б.М., Филиппов Г.А., Булкин А.Е. **Паровые и газовые турбины атомных электростанций:** Учебн. пособие для вузов - М.: Энергоатомиздат, 2014, 1985. - 256 с.
5. Singh, Murari. **Blade Design and Analysis for Steam Turbines** / M. P. Singh, G. Lucas. — New York : McGraw-Hill, 2011. — 364 p.
6. 3. Н. Р. Bloch, М. Р. Singh. **Steam Turbines. Design, Applications and Rerating.**
7. Leyzerovich, Alexander. **Wet-Steam Turbines for Nuclear Power Plants** / A. Leyzerovich. — Tulsa : PennWell, 2005. — 456 p.

Постановка задач изучения дисциплины

Атомная электрическая станция – предприятие предназначенное для получения электрической энергии в результате преобразования ядерной энергии

Закон сохранения энергии:

энергия не исчезает и не появляется вновь, она переходит из одного вида в другой.

Как получается электрическая энергия?

Электрическую энергию получают в устройстве, которое называется **генератор электрического тока**.

Принцип работы **генератора**:

Первый закон
электромагнитной индукции:
*в проводнике, пересекающем
магнитные силовые линии,
наводится ЭДС
(электродвижущая сила –
электрический ток).*

Второй закон
электромагнитной индукции:
*на проводник, по которому
движется электрический ток и
который пересекает магнитные
силовые линии, действует сила
направленная в
противоположную сторону
движения.*

I – сила тока, a ; U – напряжение, B ;

Мощность электрического генератора (Bm):

$$N_{\text{э}} = IU = 2\pi r n R = \omega M$$

n – частота вращения, c^{-1} ;

r – радиус рамки, m ;

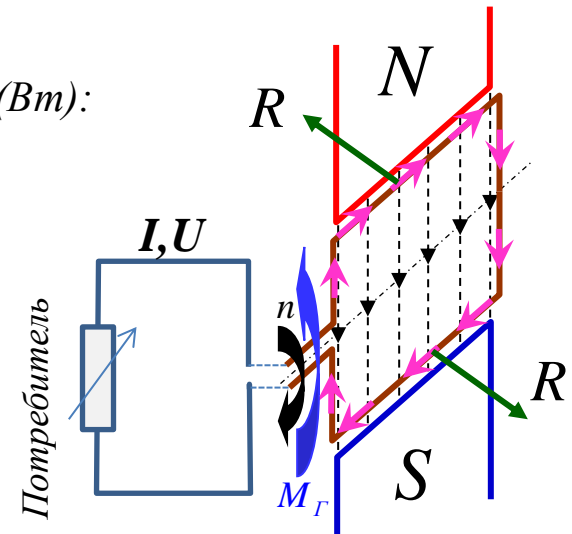
$2\pi r n$ – путь за единицу времени, m/c ;

R – сила, n ;

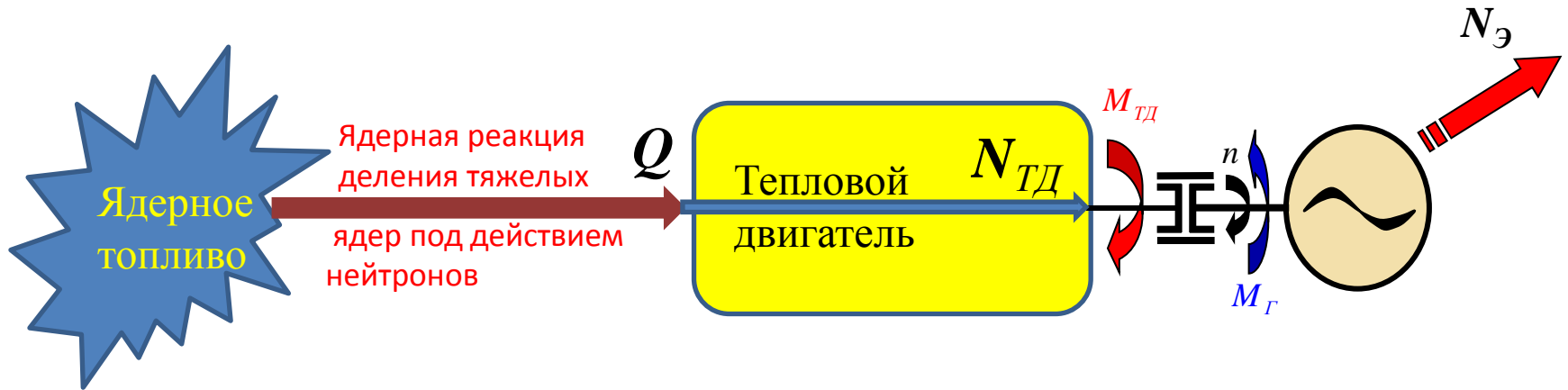
$rR = M$ – крутящий момент, $нм$;

$2\pi n = \omega$ – угловая скорость вращения, c^{-1} .

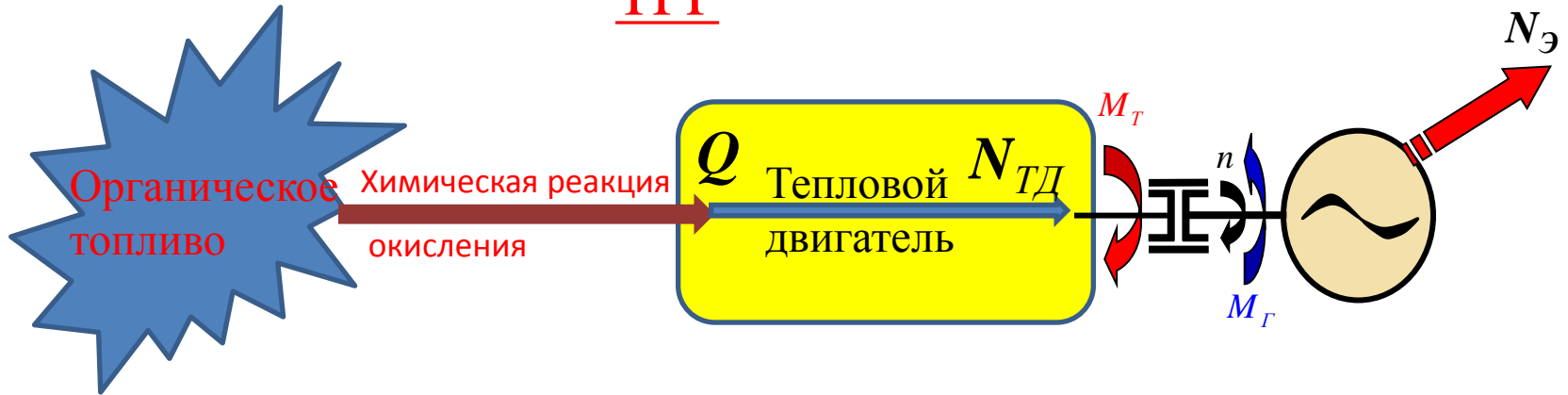
Вывод: для того, чтобы получать электрический ток в генераторе, необходимо к ротору генератора **извне** прикладывать крутящий момент.

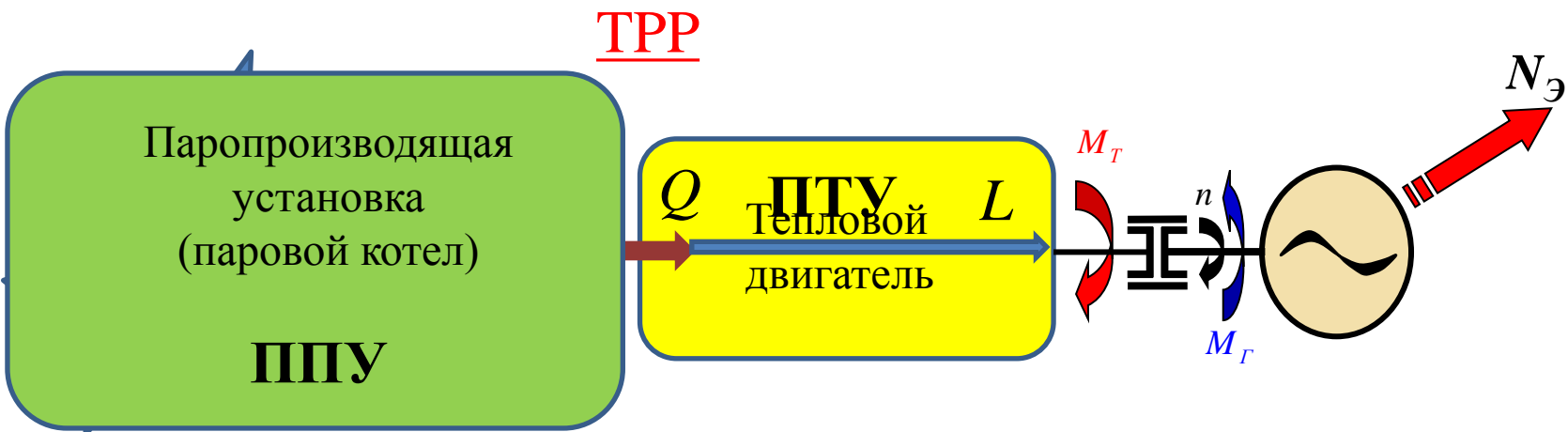
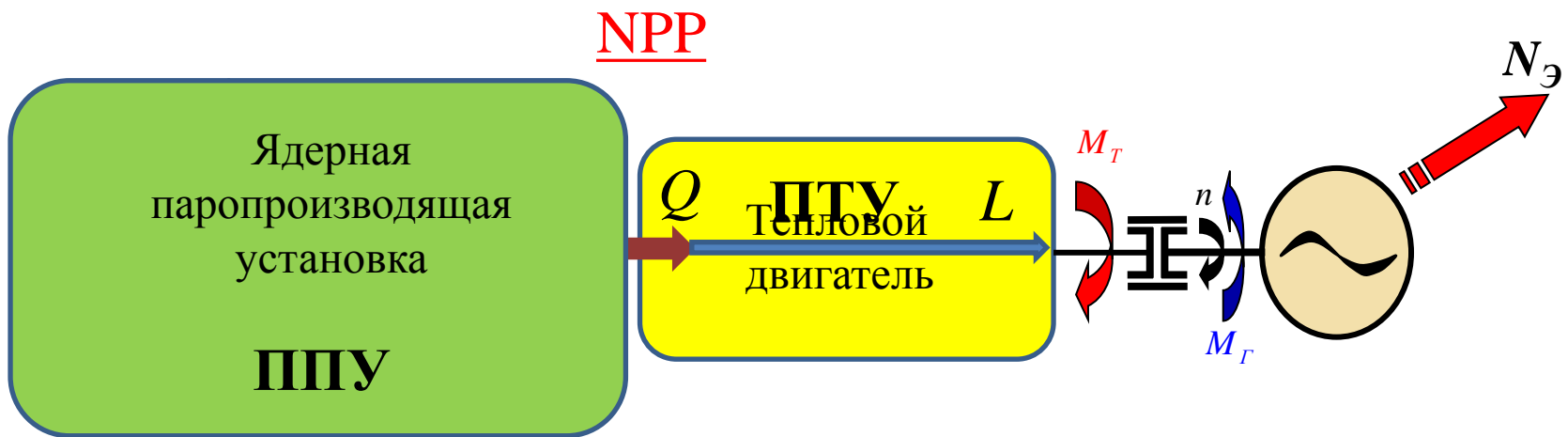


Nuclear Power Plant (NPP)



ТРП

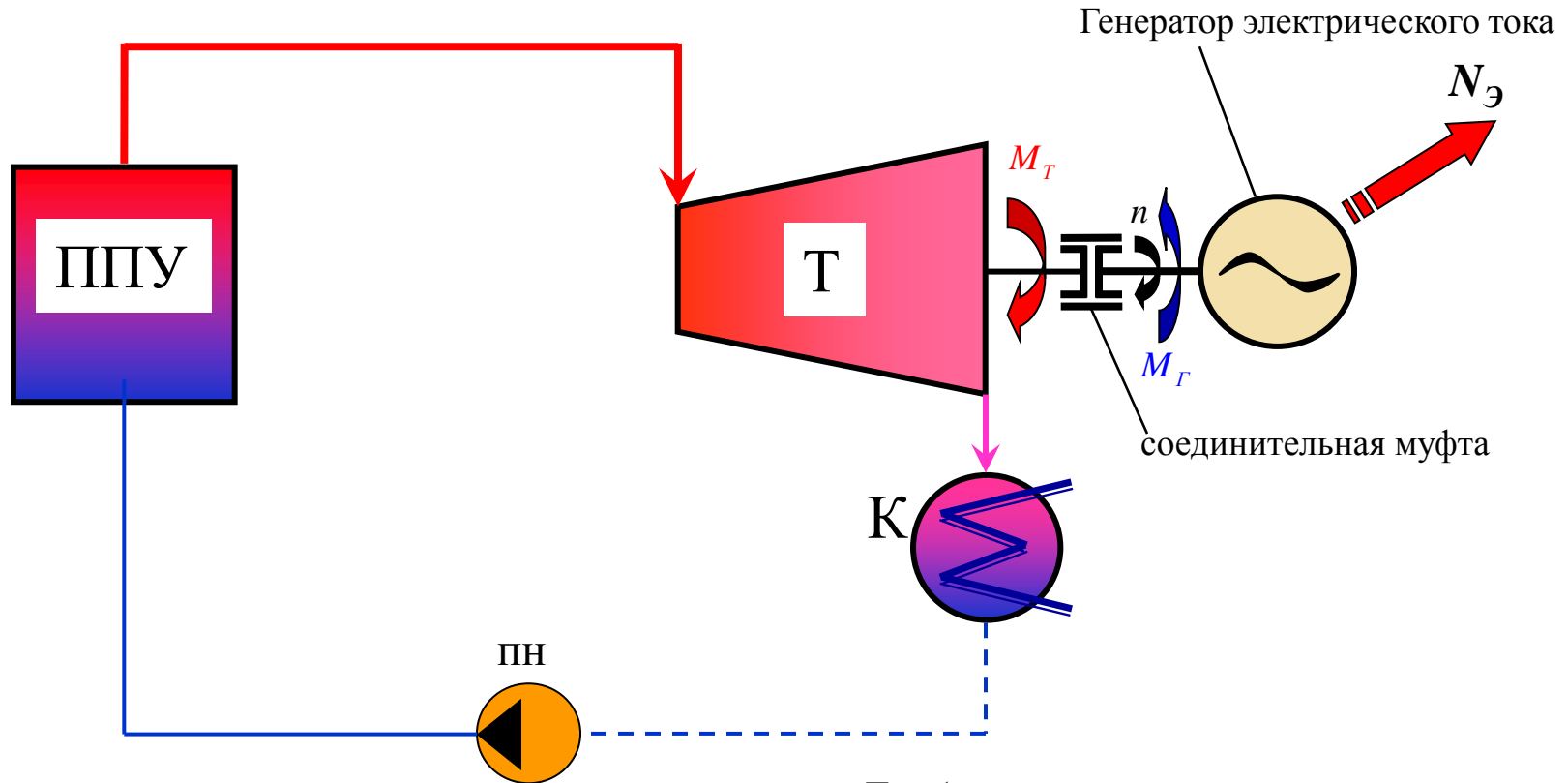




ШТУ – паротурбинная установка

ШУ – паропроизводящая установка

Схема простейшей паротурбинной установки



Трубопроводы:

ПН – *питательный насос;*

ППУ – *паропроизводящая установка;*

Т – *турбина;*

К – *конденсатор;*

— - *«острый» пар;*

— - *пар на выходе из турбины;*

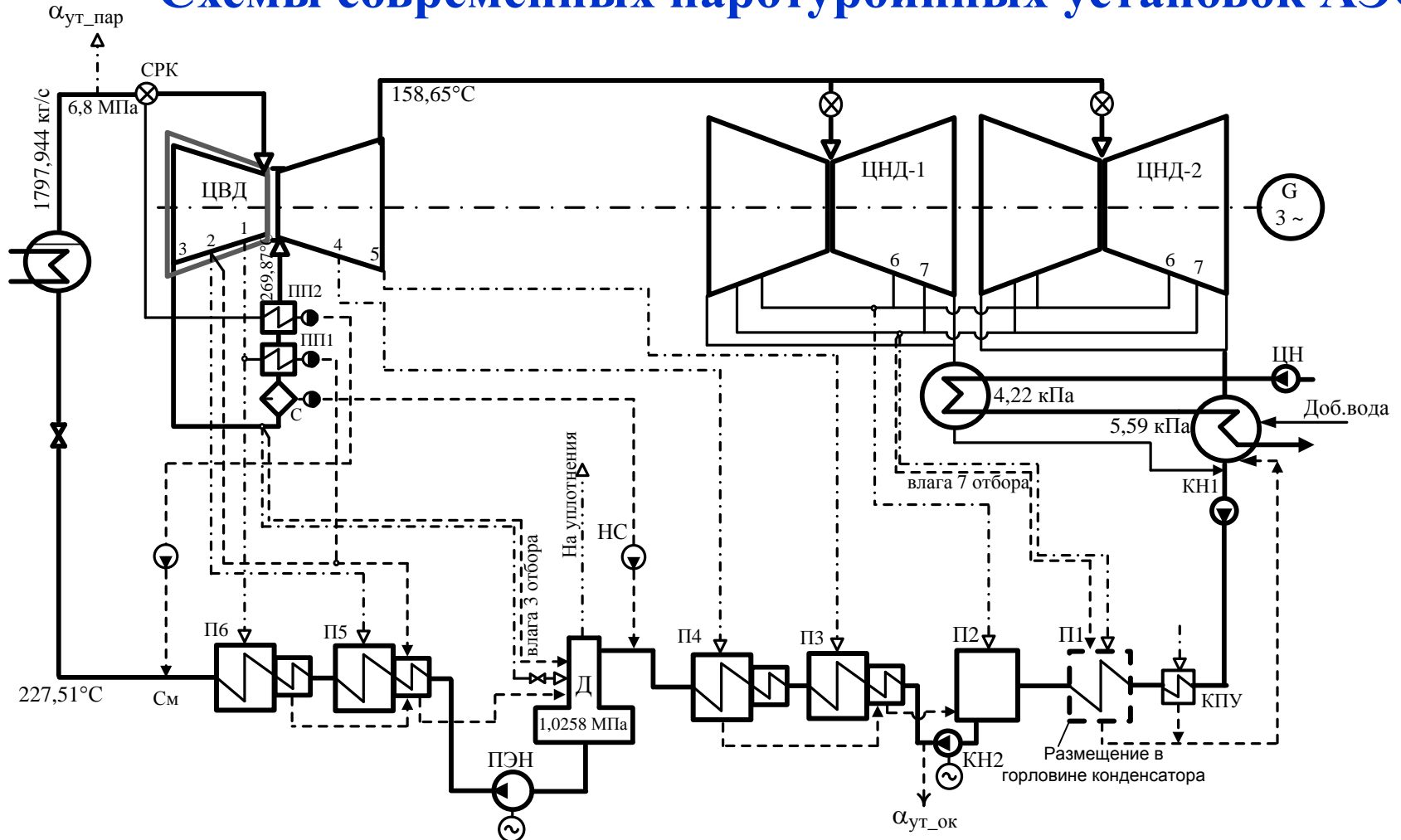
- - - - *основной конденсат;*

— - *питательная вода;*

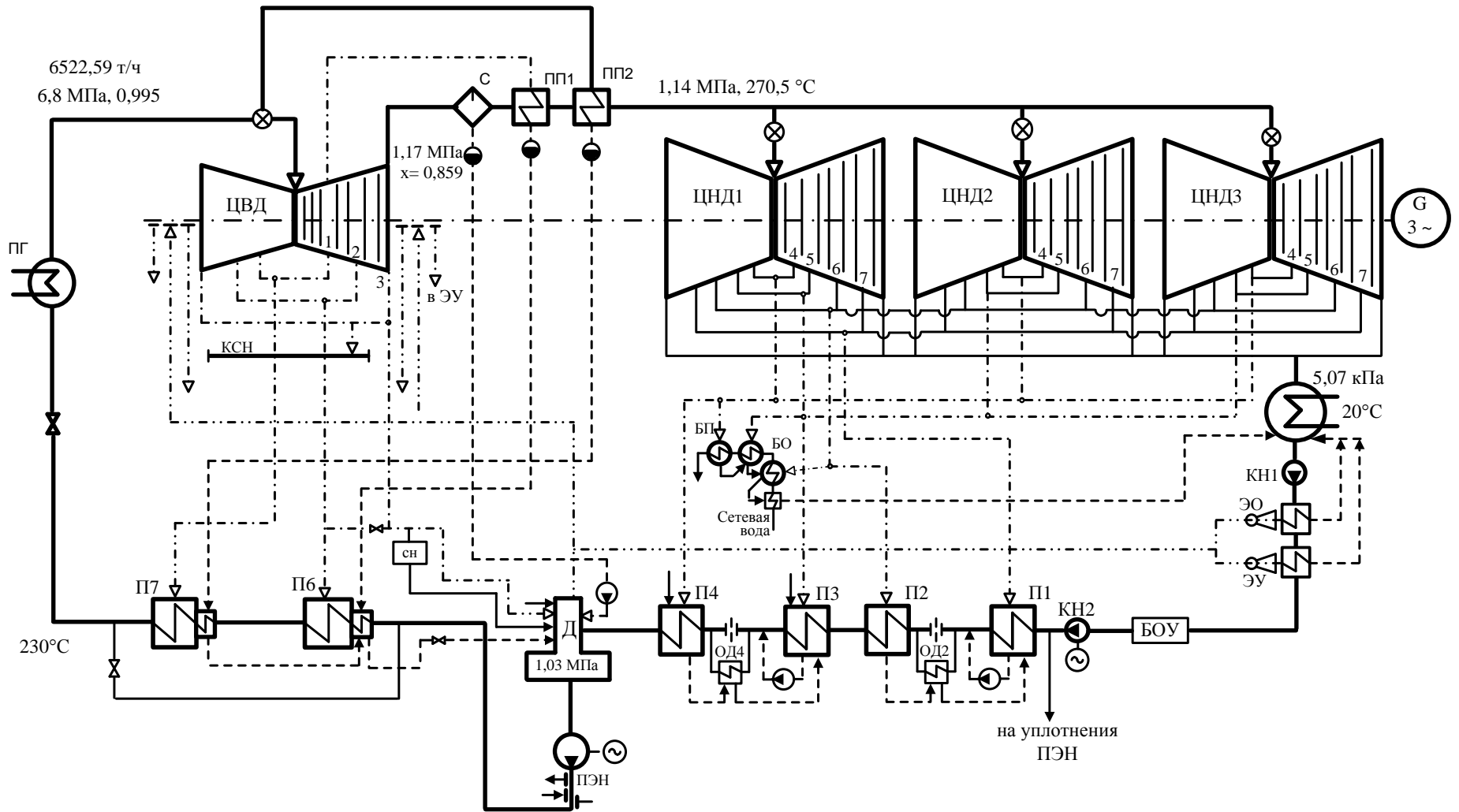
Основные требования к паротурбинным установкам:

ЭКОНОМИЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ.

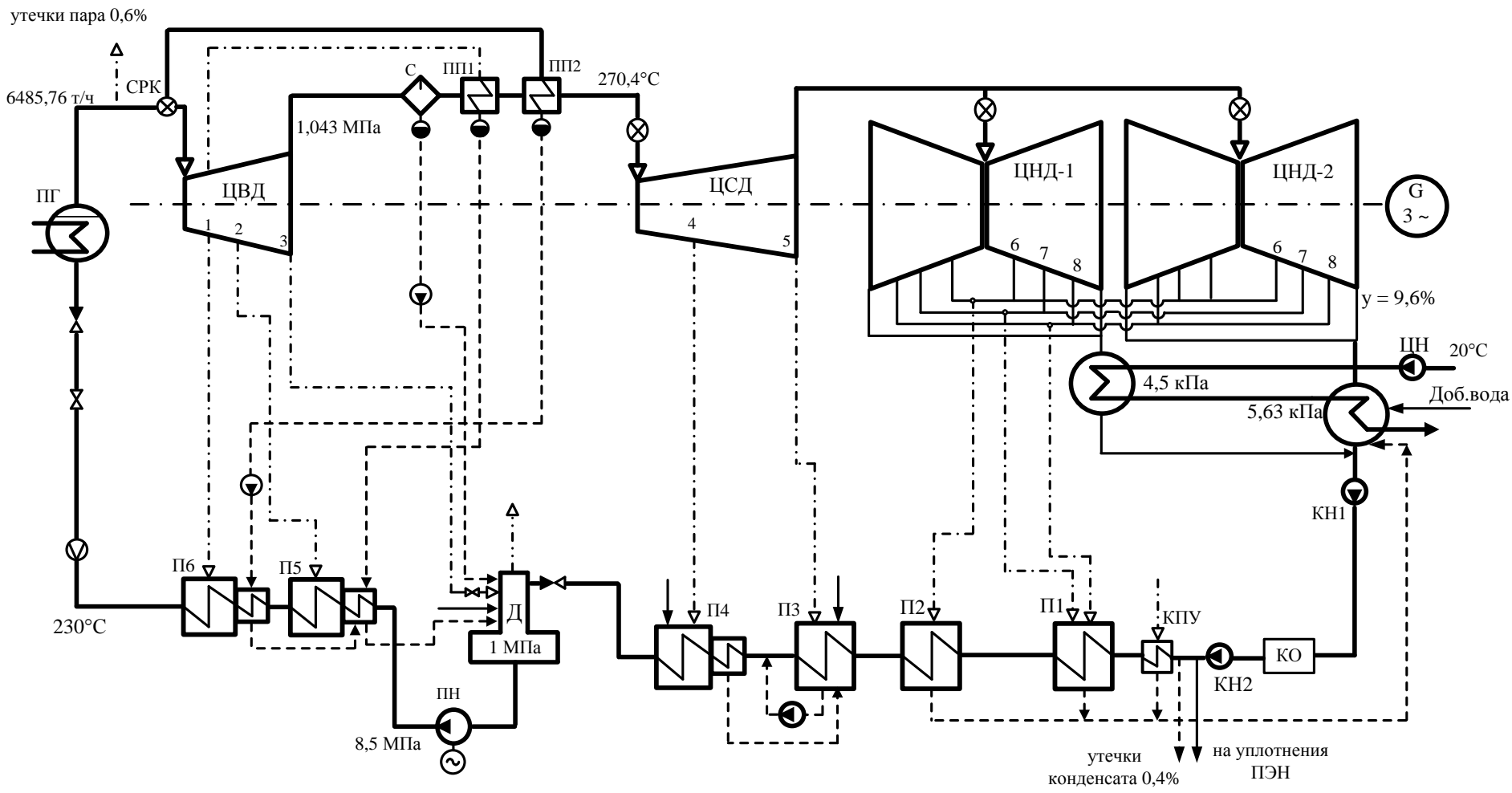
Схемы современных паротурбинных установок АЭС



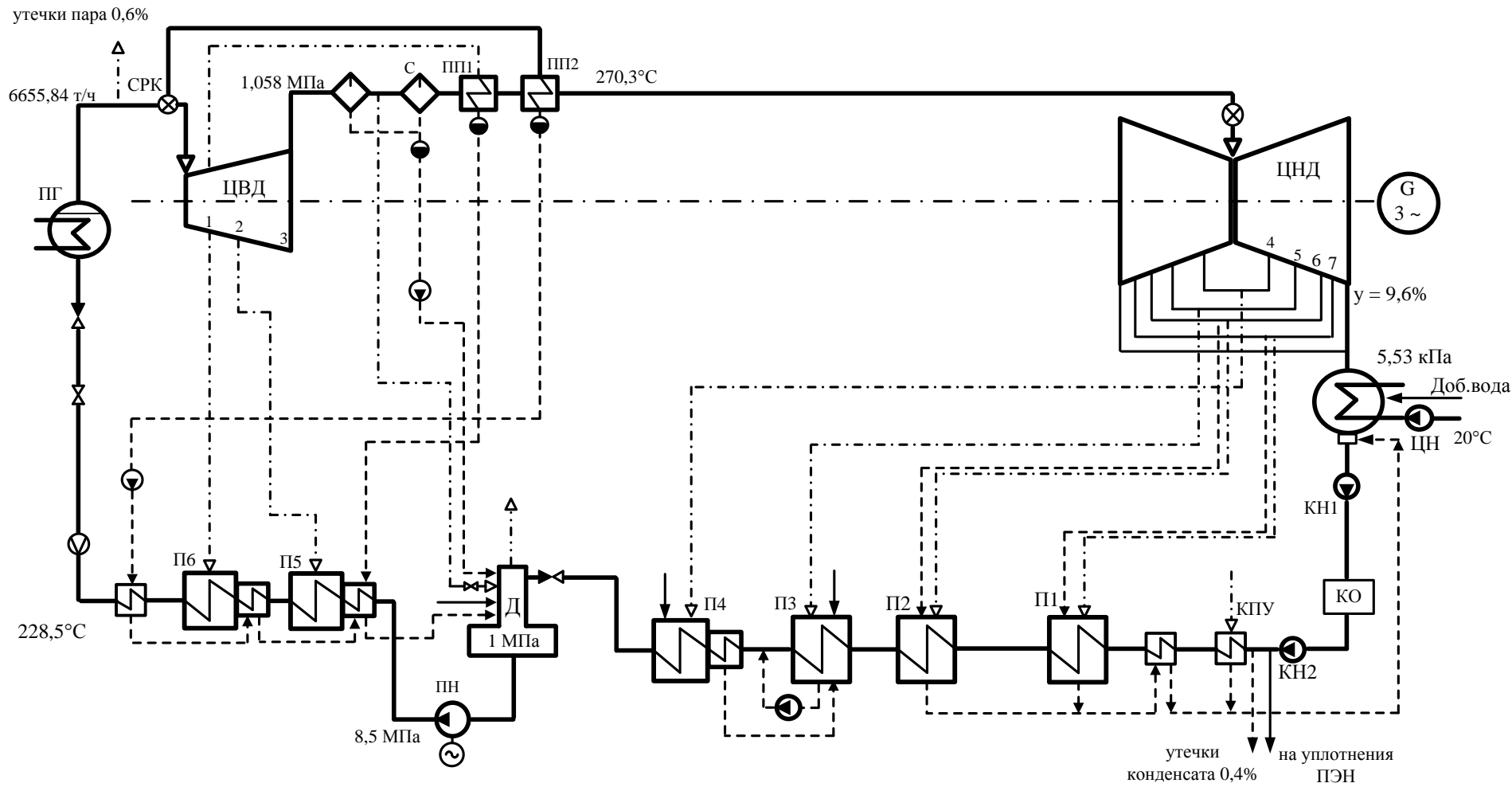
Принципиальная тепловая схема турбоустановки К-1200-6,8/25 ОАО «Силловые машины»



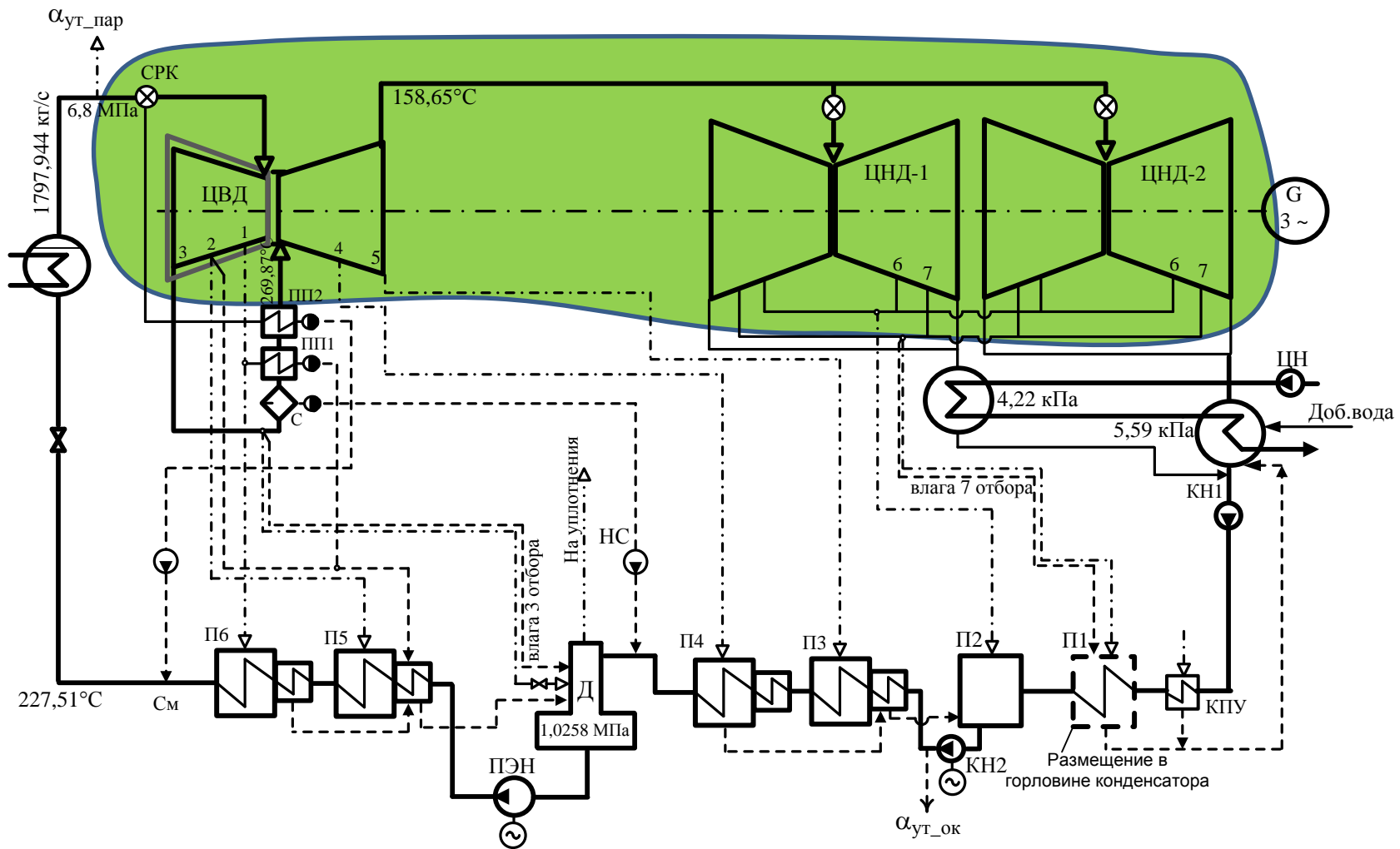
Принципиальная тепловая схема турбоустановки К-1200-6,8/25 ОАО «Турбоатом» (Украина, г. Харьков)



Принципиальная тепловая схема турбоустановки фирмы «ALSTOM»

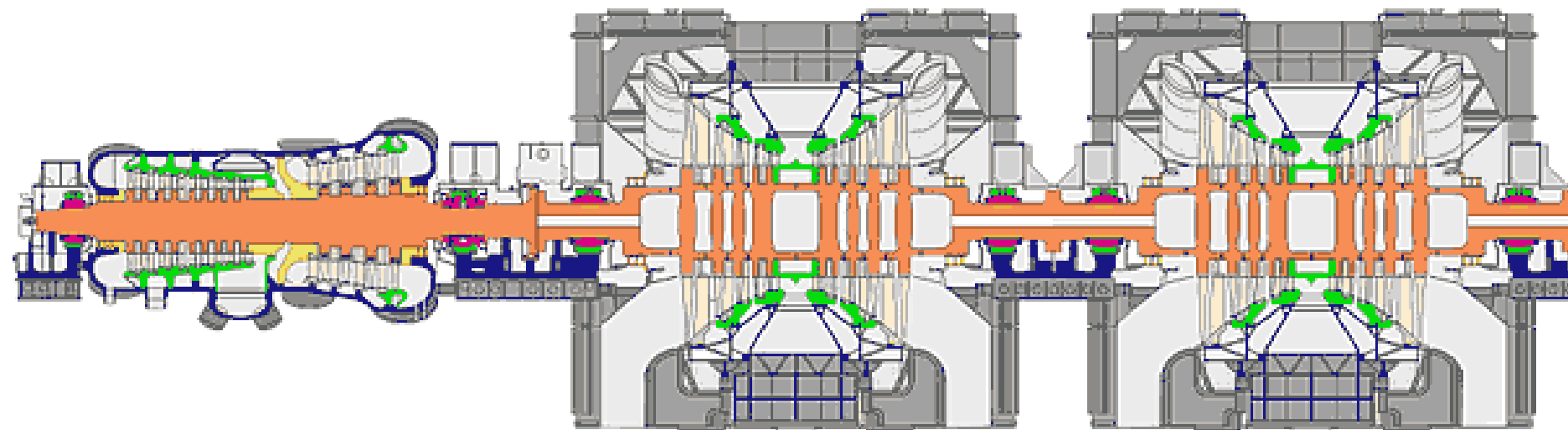


Информационная тепловая схема турбоустановки фирмы «SIEMENS AG»

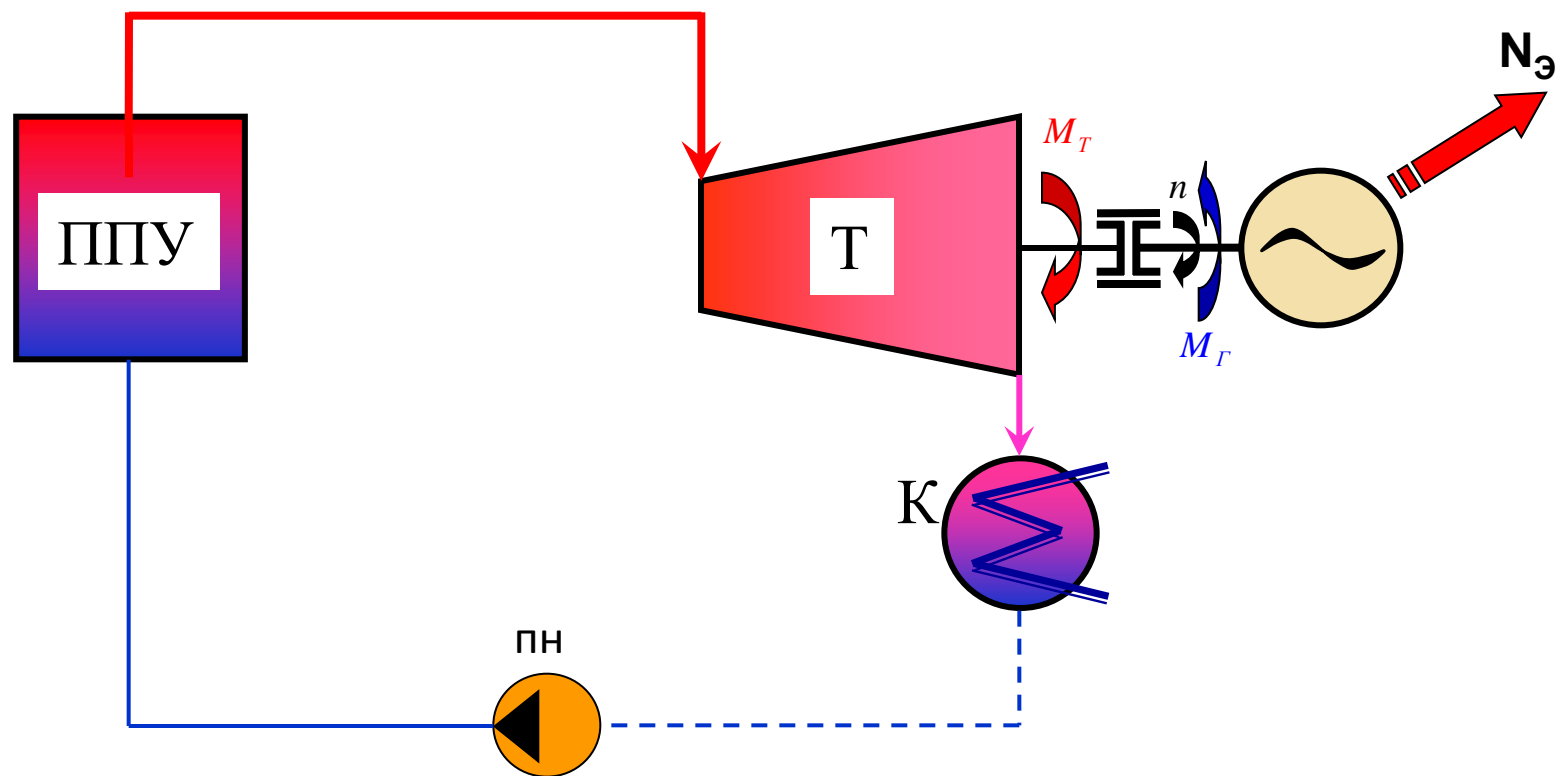


Продольный разрез турбины К-1200-6,8/25 ОАО “Силовые машины”

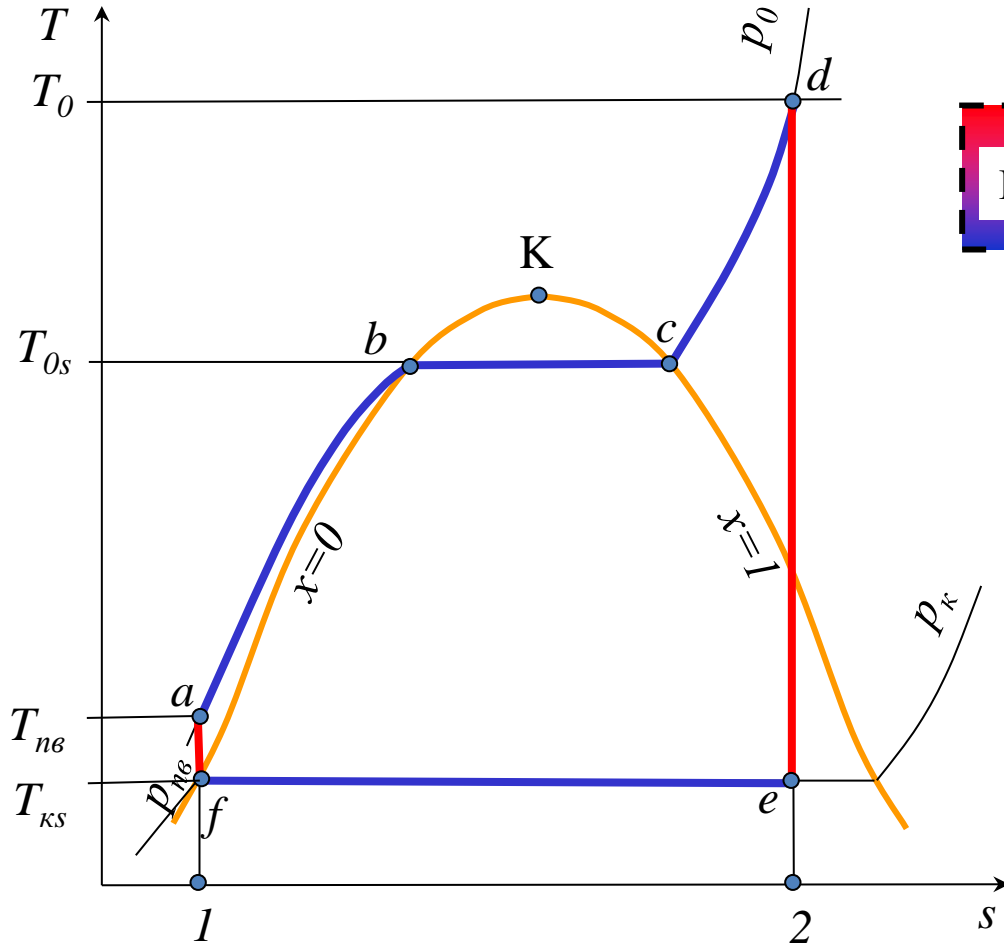
$l_{\text{посл.ст}} = 1740 \text{ мм}$



1. Паротурбинная установка и ее КПД



1.1. Цикл простейшей паротурбинной установки

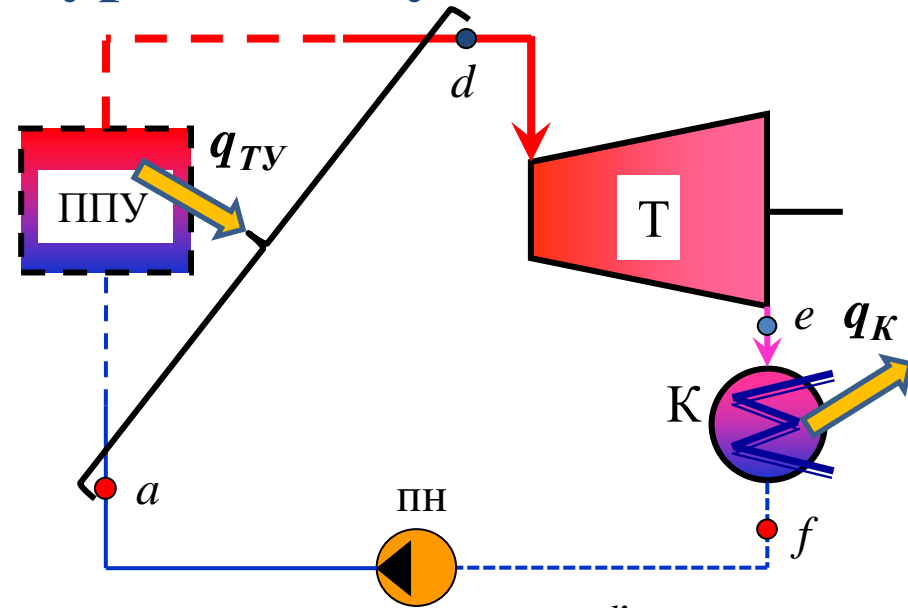


$h_a \rightarrow h_{ne}$ – энтальпия питательной воды [=f(p_{ne}, t_{ne})];

$h_d \rightarrow h_0$ – энтальпия острого пара [=f(p₀, t₀)];

$h_e \rightarrow h_{kt}$ – энтальпия пара в конце теоретического процесса расширения в турбине [=f(s₀, p_K)];

$h_f \rightarrow h'_k$ – энтальпия насыщенной воды на выходе из конденсатора [=f(p_K, x=1)];



$$ds = \frac{\delta q}{T}$$

$$q = \int_H^K T ds$$

Количество теплоты, подведенное к турбинной установке:

$$q_{TY} = \text{пл.1abcd21} = h_0 - h_{ne}$$

Количество теплоты, отведенное от турбинной установки:

$$q_K = \text{пл.1fe21} = h_{kt} - h'_k$$

$$q_{TY} > q_K \quad ?$$

Изменение параметров обусловлено воздействием на рабочее вещество извне, в частности:

начальные параметры создаются: p_0 – питательным насосом за счет затраты работы на сжатие;

t_0 – паропроизводящей установкой за счет подвода теплоты;

конечное давление: p_k – конденсатором за счет отвода теплоты.

- Работа, которая может быть получена в цикле от 1 кг пара:

$$L = q_{ТУ} - q_K = (h_0 - h_{нс}) - (h_{кт} - h'_k)$$

$$L = (h_0 - h_{кт}) - (h_{нс} - h'_k) = L_{Tt} - L_H$$

где

$L_{Tt} = (h_0 - h_{кт})$ - работа, которую может совершить 1 кг пара в идеальной турбине, называемая **располагаемой** работой;

$L_H = (h_{нс} - h'_k)$ - работа, затрачиваемая в насосе.

1.2. Абсолютные и относительные КПД

Эффективность преобразования энергии в технических устройствах оценивается **коэффициентом полезного действия (КПД)**

- КПД идеального цикла.

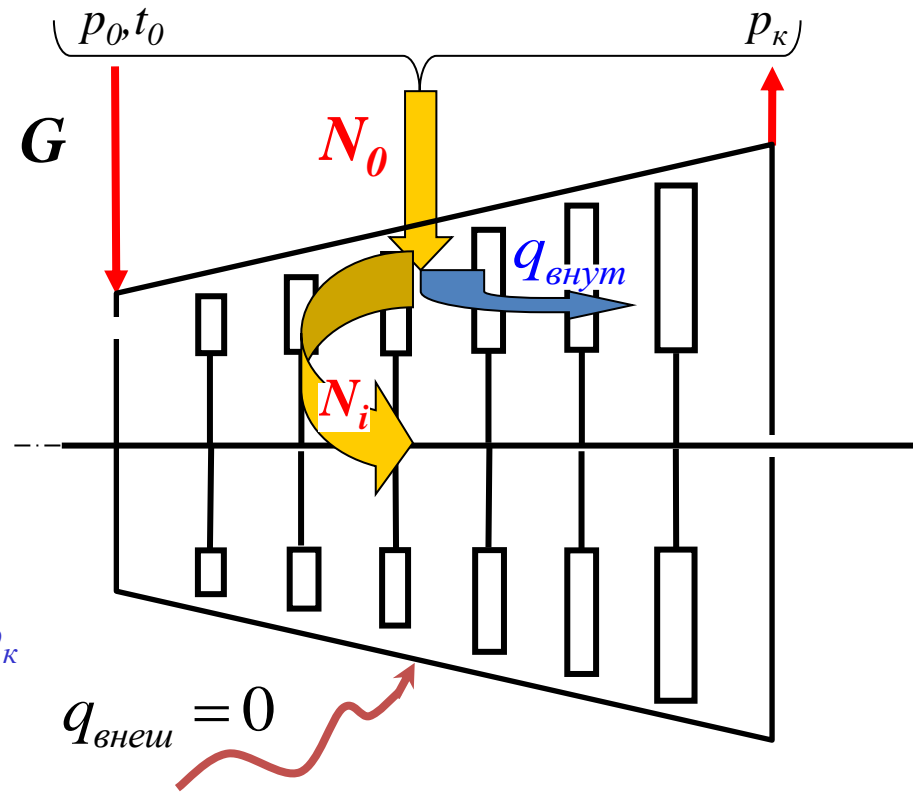
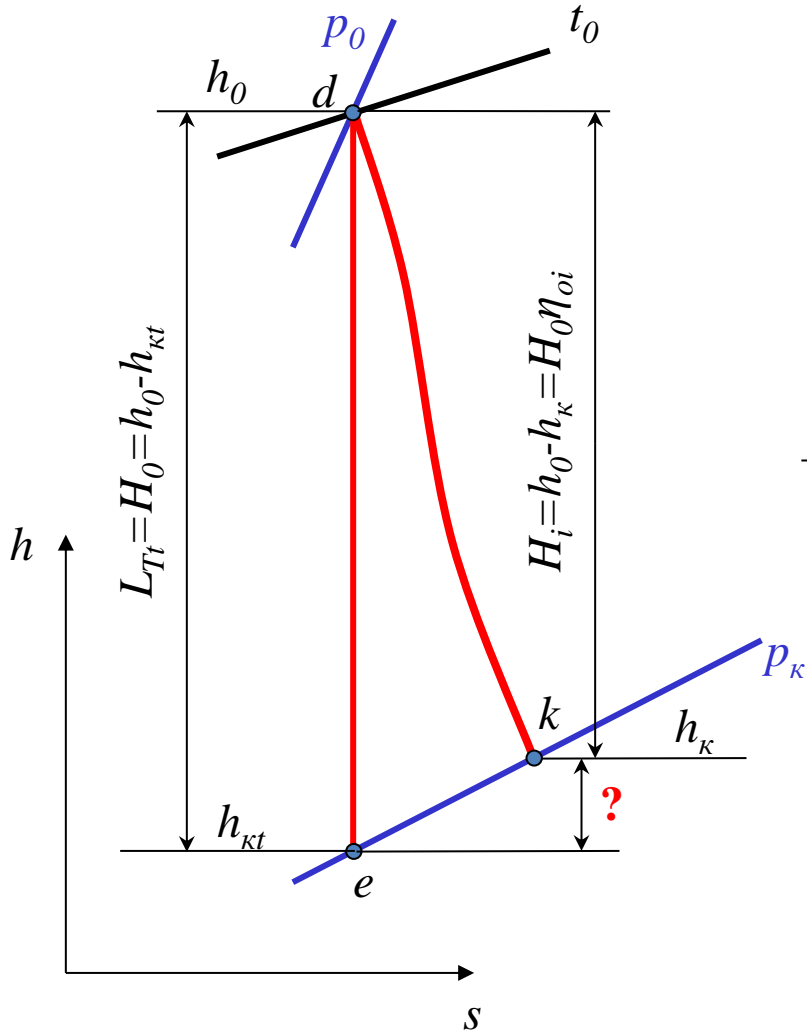
$$\eta_t = \frac{L}{q_{TУ}} = \frac{q_{TУ} - q_K}{q_{TУ}} = \frac{(h_0 - h_{kt}) - (h_{нв} - h'_k)}{h_0 - h_{нв} + h'_k - h'_k}$$

$$\eta_t = \frac{L}{q_{TУ}} = \frac{(h_0 - h_{kt}) - (h_{нв} - h'_k)}{(h_0 - h'_k) - (h_{нв} - h'_k)}$$

$$\eta_t \approx \frac{L}{q_{TУ}} \approx \frac{h_0 - h_{kt}}{h_0 - h'_k}$$

η_t **абсолютный**, или **термический**, КПД идеального цикла

• Мощности и относительные КПД турбогенератора

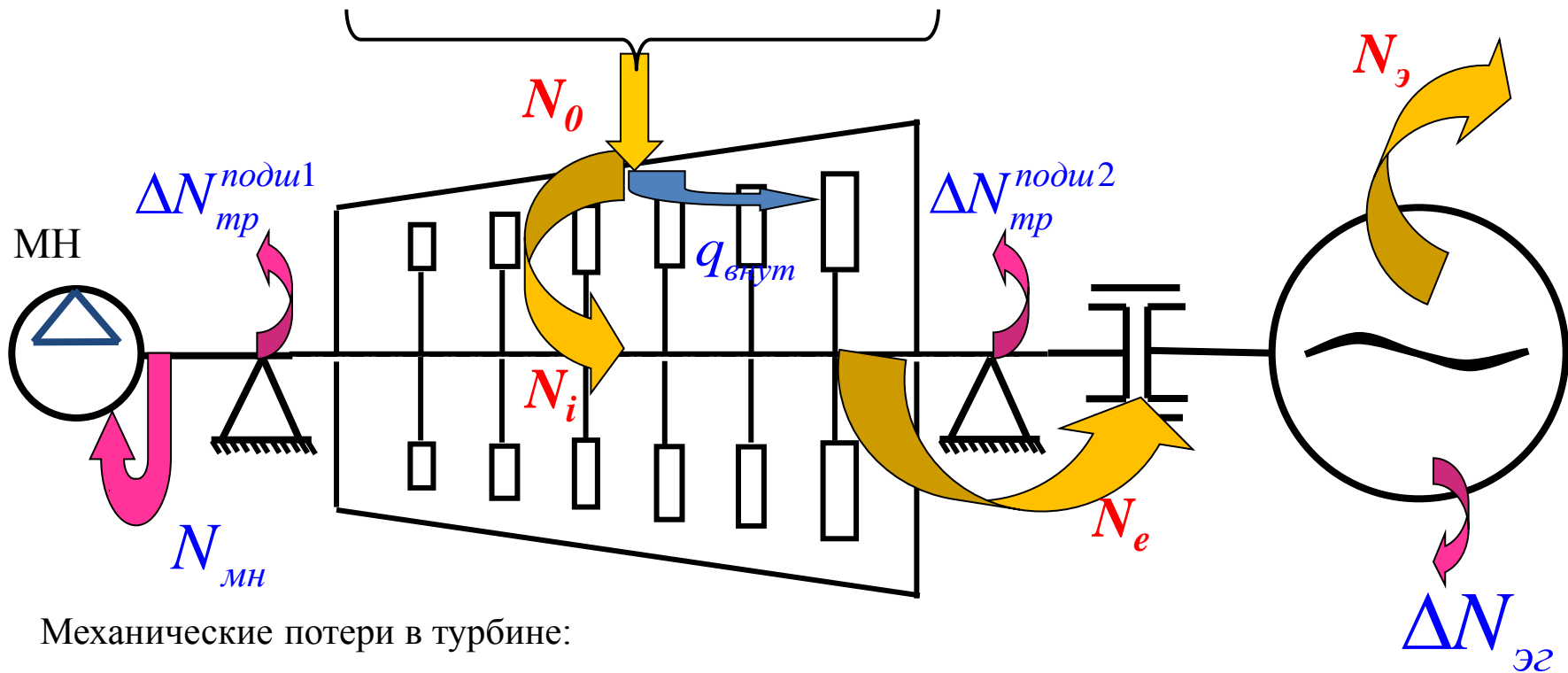


$N_0 = GH_0$ - располагаемая мощность (мощность идеальной турбины)

Относительный внутренний КПД турбины.

$$\eta_{oi} = \frac{N_i}{N_0} = \frac{H_i}{H_0}$$

$$N_i = GH_i$$



Механические потери в турбине:

$$\Delta N_{м} = N_{MH} + \sum \Delta N_{тр}^{подш}$$

Эффективная мощность турбины

$$N_e = N_i - \Delta N_{м} \quad N_i \rightarrow N_e$$

Механический КПД турбины

$$\eta_{м} = \frac{N_e}{N_i} = 1 - \frac{\Delta N_{м}}{N_i}$$

Замечание: $\Delta N_{м}$ при $n = \text{const}$ не зависит от мощности турбины (определяется весом ротора, подшипниками, системой смазки...). Поэтому $\eta_{м} = f(N_i)$

Электрические потери в генераторе: $\Delta N_{эз}$

Электрическая мощность турбогенератора

$$N_э = N_e - \Delta N_{эз} \quad N_i \rightarrow N_e$$

Электрический КПД генератора

$$\eta_{эз} = \frac{N_э}{N_e} = 1 - \frac{\Delta N_{эз}}{N_e}$$

Относительный электрический КПД турбоагрегата

$$\eta_{оэ} = \frac{N_{э}}{N_0} = \frac{N_i}{N_0} \frac{N_e}{N_i} \frac{N_{э}}{N_e} = \eta_{oi} \eta_m \eta_{эг}$$

Относительный эффективный КПД турбины

$$\eta_{оэ} = \frac{N_e}{N_0} = \frac{N_i}{N_0} \frac{N_e}{N_i} = \eta_{oi} \eta_m$$

- Абсолютные КПД турбинной установки

Абсолютный внутренний КПД турбинной установки

$$\eta_i = \frac{L_{Ti}}{q_{TY}} = \frac{H_i}{h_0 - h'_k} = \frac{H_0 H_i}{(h_0 - h'_k) H_0} = \eta_t \eta_{oi}$$

Абсолютный эффективный КПД турбинной установки

$$\eta_e = \frac{N_e}{Q_{TY}} = \eta_i \eta_m = \eta_t \eta_{oi} = \eta_t \eta_{oi} \eta_m$$

Абсолютный электрический КПД турбинной установки

$$\eta_{\varepsilon} = \frac{N_{\varepsilon}}{Q_{TY}} = \eta_e \eta_{\varepsilon z} = \eta_t \eta_{oi} = \eta_t \eta_{oi} \eta_m \eta_{\varepsilon z}$$

Мощности и КПД турбины и турбинной установки

Наименование КПД	Относительный КПД	Абсолютный КПД	Мощность
<i>Идеальной турбины</i>	1	$\eta_t = \frac{H_0}{q_{TY}} = \frac{h_0 - h_{kt}}{h_0 - h_{ne}}$	$N_0 = GH_0$
<i>Внутренний</i>	$\eta_{oi} = \frac{N_i}{N_0} = \frac{H_i}{H_0}$	$\eta_i = \frac{N_i}{Q_{TY}} = \eta_t \eta_{oi}$	$N_i = GH_i = N_0 \eta_{oi}$
<i>Эффективный</i>	$\eta_{oe} = \frac{N_e}{N_0} = \eta_{oi} \eta_m$	$\eta_e = \frac{N_e}{Q_{TY}} = \eta_t \eta_{oe}$	$N_e = GH_i \eta_m = N_0 \eta_{oe}$
<i>Электрический</i>	$\eta_{oэ} = \frac{N_э}{N_0} = \eta_{oi} \eta_m \eta_{э2}$	$\eta_э = \frac{N_э}{Q_{TY}} = \eta_t \eta_{oэ}$	$N_э = GH_0 \eta_{oi} \eta_m \eta_{э2} =$ $= N_0 \eta_{oэ}$

1.3. Значение КПД

$$\eta_{\text{э}} = \eta_t \eta_{oi} \eta_m \eta_{\text{эг}}$$

- А.** КПД – инструмент для поиска технических путей совершенствования процессов преобразования энергии.
- Б.** Знание КПД – необходимо для решения задачи связывающей электрическую мощность с затрачиваемой тепловой мощностью ПТУ (далее с тепловой мощностью реактора).

$$\eta_{\text{э}} = \frac{N_{\text{э}}}{Q_{\text{ТУ}}}$$

Сколько теплоты надо затратить на ТУ для выработки заданной мощности?

$$Q_{\text{ТУ}} = \frac{N_{\text{э}}}{\eta_{\text{э}}}$$

Какую мощность можно получить при расходовании на ТУ заданного количества теплоты?

$$N_{\text{э}} = Q_{\text{ТУ}} \eta_{\text{э}}$$

В. Зачем повышать КПД?

Сколько топлива надо сжечь на ТЭС (АЭС-?) для выработки заданной мощности?

$$Q_{ТУ} = \frac{N_{\text{Э}}}{\eta_{\text{Э}}} \Rightarrow Q_c = \frac{Q_{ТУ}}{\eta_{\text{ППУ}}} \Rightarrow B = \frac{Q_c}{Q_H^P} = \frac{N_{\text{Э}}}{\eta_{\text{Э}} \eta_{\text{ППУ}} Q_H^P}$$

Q_H^P - теплотворная способность топлива, кДж/кг.

Сколько топлива надо сжечь на ТЭС для получения единицы мощности?

$$\frac{B}{N_{\text{Э}}} = \frac{1}{\eta_{\text{Э}} \eta_{\text{ППУ}} Q_H^P}$$

Сколько топлива надо сжечь на ТЭС (АЭС-?) для выработки единицы мощности в течение часа?

$$b = \frac{B}{\text{Э}} = \frac{3600}{\eta_{\text{Э}} \eta_{\text{ПК}} Q_H^P}$$

$(Q_H^P)_{\text{УТ}}$ - теплотворная способность условного топлива, =29300кДж/кг.

$$b_{\text{УТ}}^{\text{Э}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{Э}} \eta_{\text{ПК}}}$$

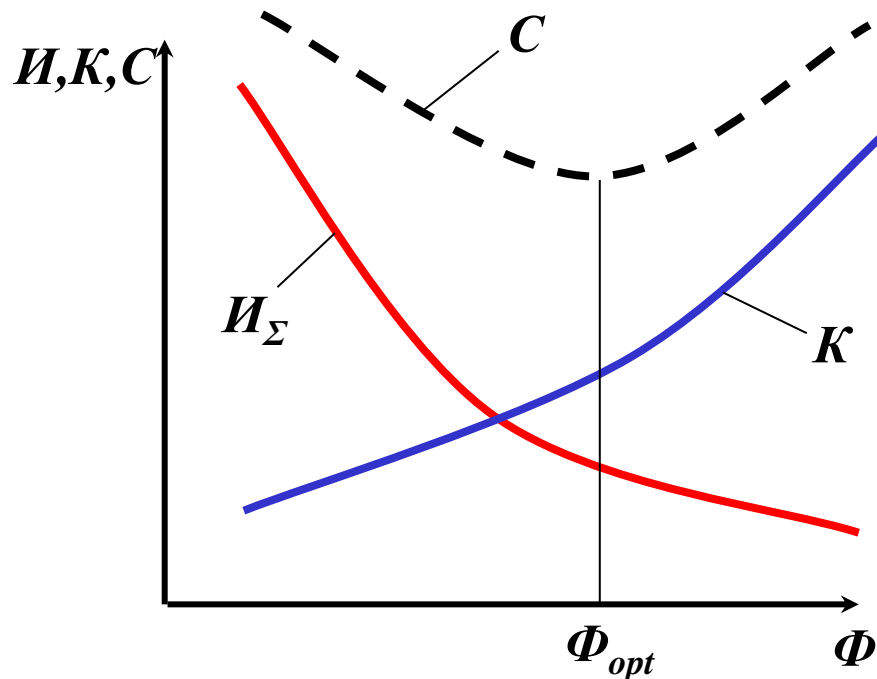
- удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии, кг.у.т/кВт·ч.

Расход топлива просто переводится в экономическую категорию – **деньги**.

Г. Решение технико-экономической задачи

Технико-экономическая задача – выбор наивыгоднейшего (оптимального) значения какого-либо параметра по обобщенному критерию.

- Капитальные затраты: $K_{\Sigma} = \sum K_j$ (затраты, произведенные до начала эксплуатации)
- Эксплуатационные расходы: (издержки производства - затраты, произведенные в процессе эксплуатации)
$$I_{\Sigma} = I_{3П} + I_T + I_{рем} + \dots$$
$$I_{\Sigma} \approx I_T = u_T B = f\left(\frac{1}{\eta}\right)$$
- Себестоимость: $C = I_T + \sum a_j K_j$ (приведение к одному сроку одновременных затрат)



Положим, есть параметр Φ , при росте которого КПД возрастает

$$\eta_{\Sigma} \uparrow = f(\Phi \uparrow)$$

Тогда: $B \downarrow \Rightarrow I_T \downarrow \Rightarrow I_{\Sigma} \downarrow$

Обычно рост КПД достигается увеличением капитальных затрат.

2. Методы повышения тепловой экономичности паротурбинных установок

$$\eta_{\Sigma} = \eta_t \eta_{oi} \eta_m \eta_{\Sigma 2}$$

А. Термодинамические методы.

Направлены на увеличение η_t . Однако они влияют и на η_{oi} .

- Повышение начальных параметров.
- Понижение конечного давления.
- Применение промежуточного перегрева и сепарации влаги.
- Применение регенеративного подогрева питательной воды.

Комбинированное производство электроэнергии и теплоты.

Термодинамические
циклы АЭС

Б. Конструктивные методы.

Направлены на увеличение η_{oi} , η_m , $\eta_{\Sigma 2}$.

Турбомашины АЭС