

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

*Энергетический институт*

**Кафедра атомных и тепловых электростанций (АТЭС)**

# Турбомашины АЭС

*Руководитель дисциплины*

**БЕЛЯЕВ Леонид Александрович**

**2017 г.**

# Турбинные установки АЭС

(без нагнетателей и конструкций теплообменников)

## Распределение учебного времени

	Турбомашины АЭС			Термодинамические циклы АЭС	
	Объем в часах		Всего часов		Объем в часах
	6 семестр	7 семестр			
Лекции	32	16	48	32	
Лабораторные занятия	16		16	-	
Практические занятия	32	32	64	32	
Курсовой проект		+		-	
<b>Всего аудиторных занятий</b>	<b>80</b>	<b>48</b>	<b>128</b>	<b>64</b>	
Самостоятельная (внеаудиторная) работа	128 (8 ч/нед.)	48 (3 ч/нед.)	176	64 (4 ч/нед.)	
<b>Общая трудоемкость</b>	<b>208</b>	<b>96</b>	<b>304</b>	<b>128</b>	
Форма отчетности	<b>Экзамен</b>	Зачет Диф. зачет		<b>Экзамен</b>	

## 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

	<b>Группа 5041</b>	<b>Группа 5042</b>
--	--------------------	--------------------

## Турбомашины АЭС

Лекции	Доцент <b>Беляев Леонид Александрович</b>	
Практические занятия	Ассистент <b>Лавриненко Сергей Викторович</b>	Старший преподаватель <b>Шевелев Сергей Анатольевич</b>
Лабораторные занятия	Ассистент <b>Лавриненко С.В.</b>	Старший преподаватель <b>Шевелев С. А.</b>

## Термодинамические циклы АЭС

Лекции	Доцент <b>Беляев Л.А.</b>	
Практические занятия	Доцент <b>Беляев Л.А.</b>	Ассистент <b>Лавриненко Сергей Викторович</b>

## 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. H. P. Bloch, M. P. 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 ( $Вт$ ):

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

$n$  – частота вращения,  $c^{-1}$ ;

$r$  – радиус рамки,  $м$ ;

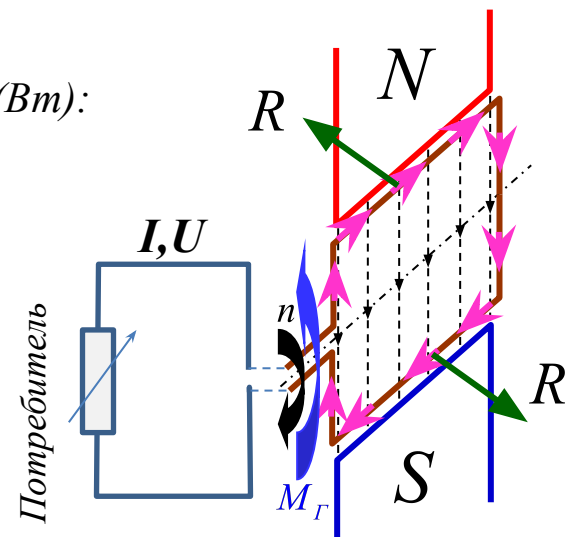
$2\pi r n$  – путь за единицу времени,  $м/с$ ;

$R$  – сила,  $н$ ;

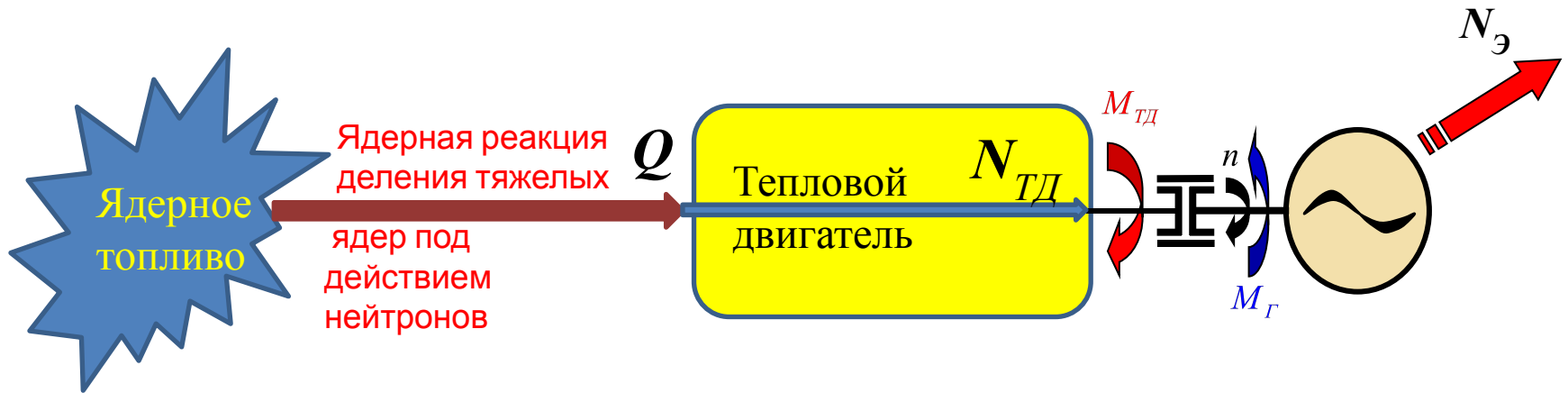
$rR=M$  – крутящий момент,  $нм$ ;

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

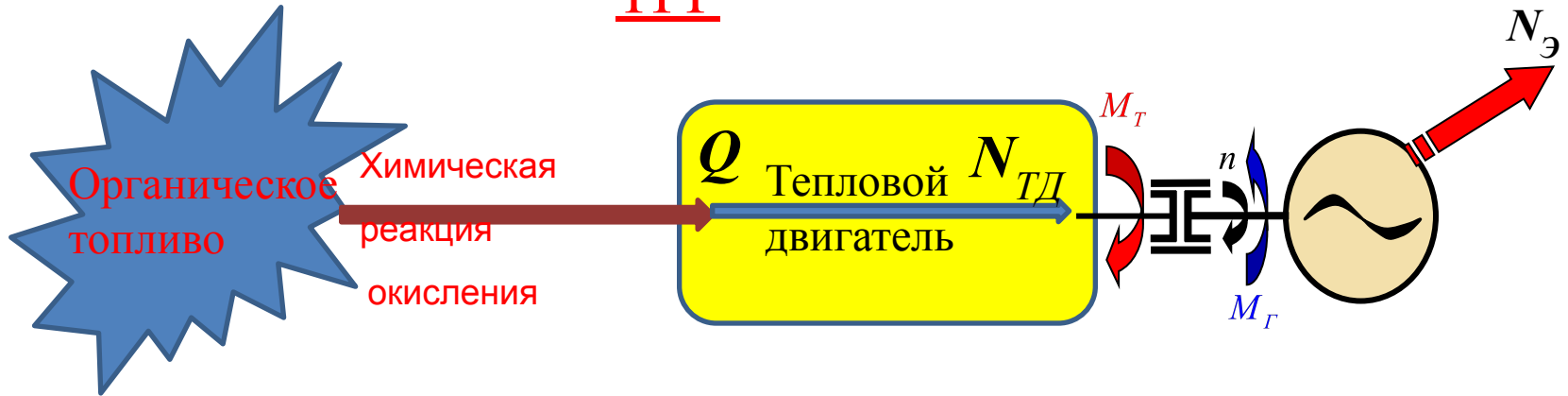
**Вывод:** для того, чтобы получать электрический ток в генераторе, необходимо к ротору генератора **извне** прикладывать крутящий момент.

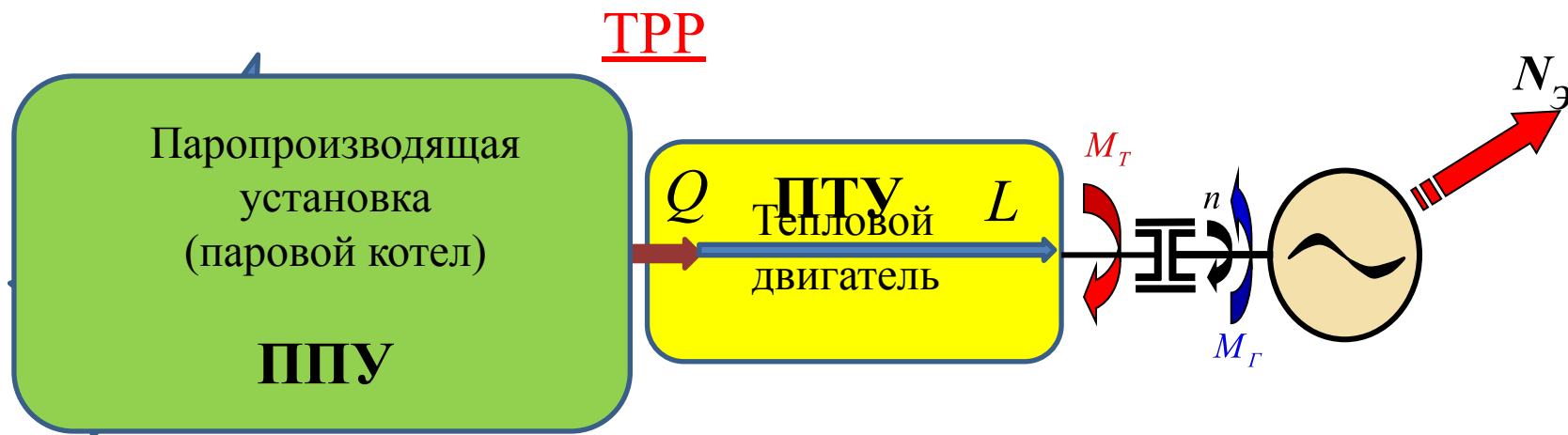
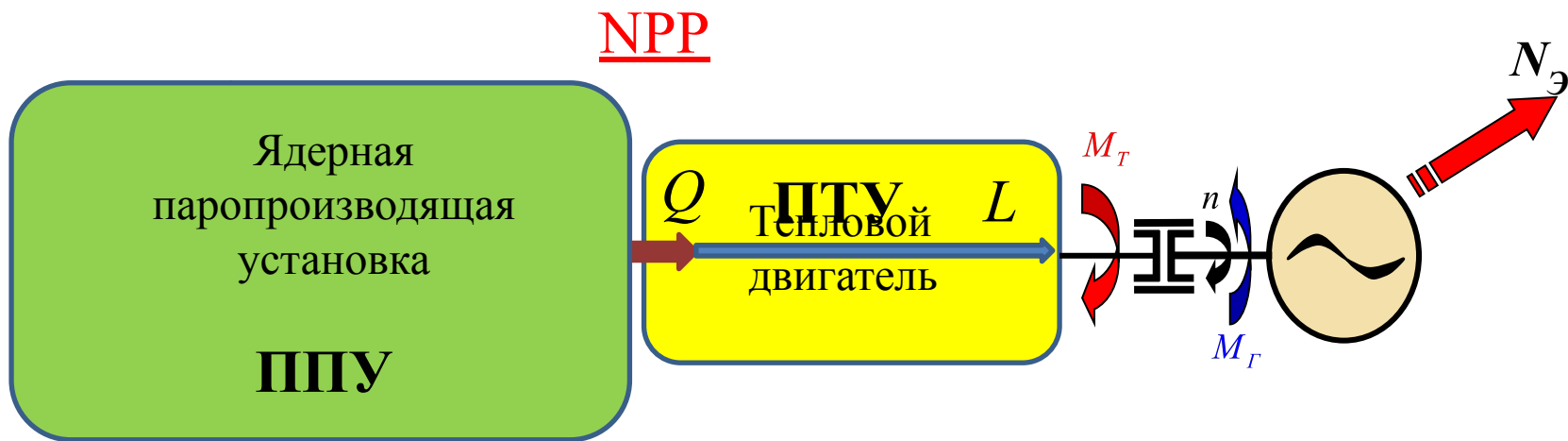


# Nuclear Power Plant (NPP)



## ТРП



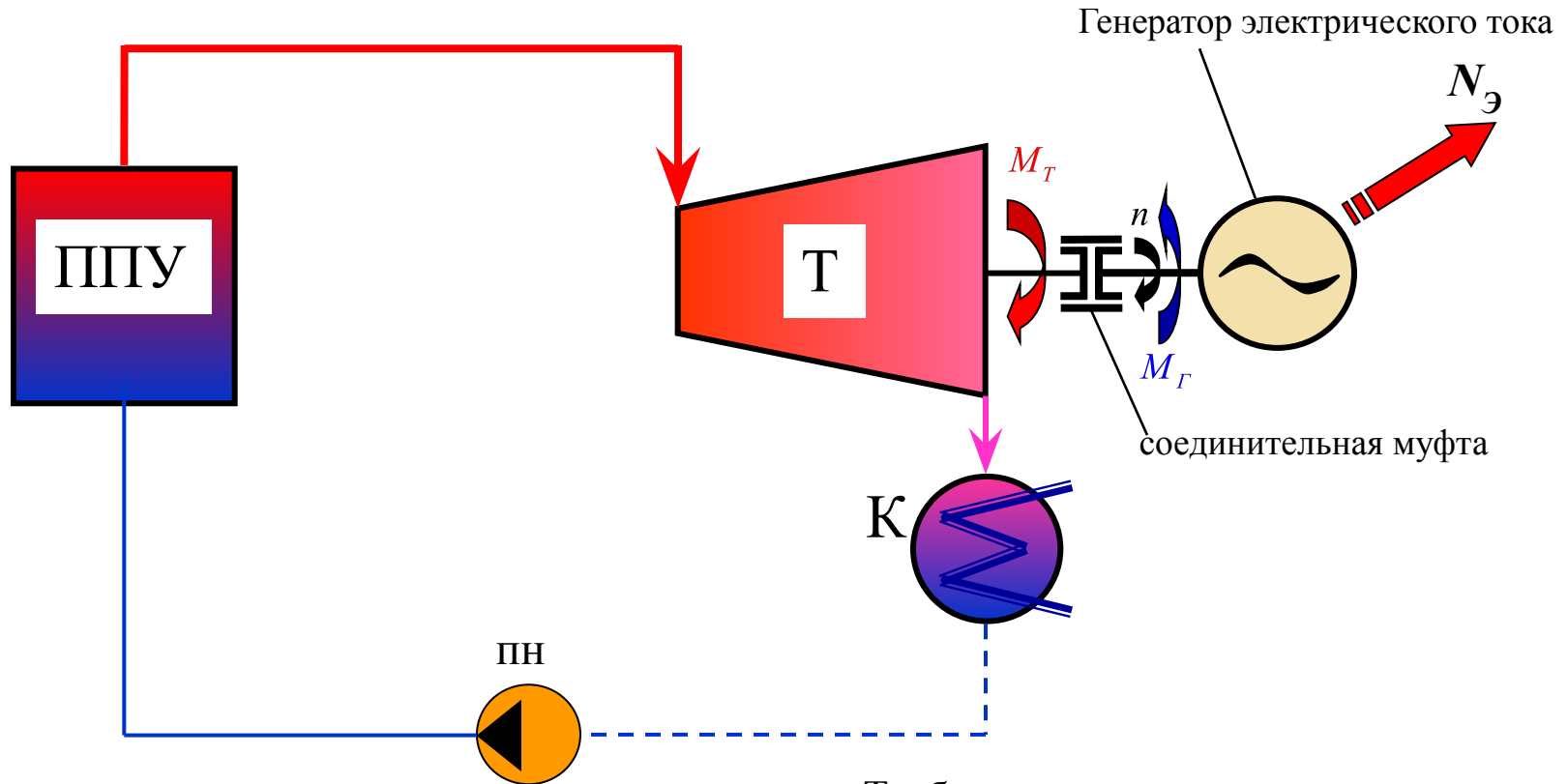


**ПТУ** – паротурбинная установка

**ПШУ** – паропроизводящая установка



# Схема простейшей паротурбинной установки



Трубопроводы:

ПН – *питательный насос*;

ППУ – *паропроизводящая установка*;

Т – *турбина*;

К – *конденсатор*;

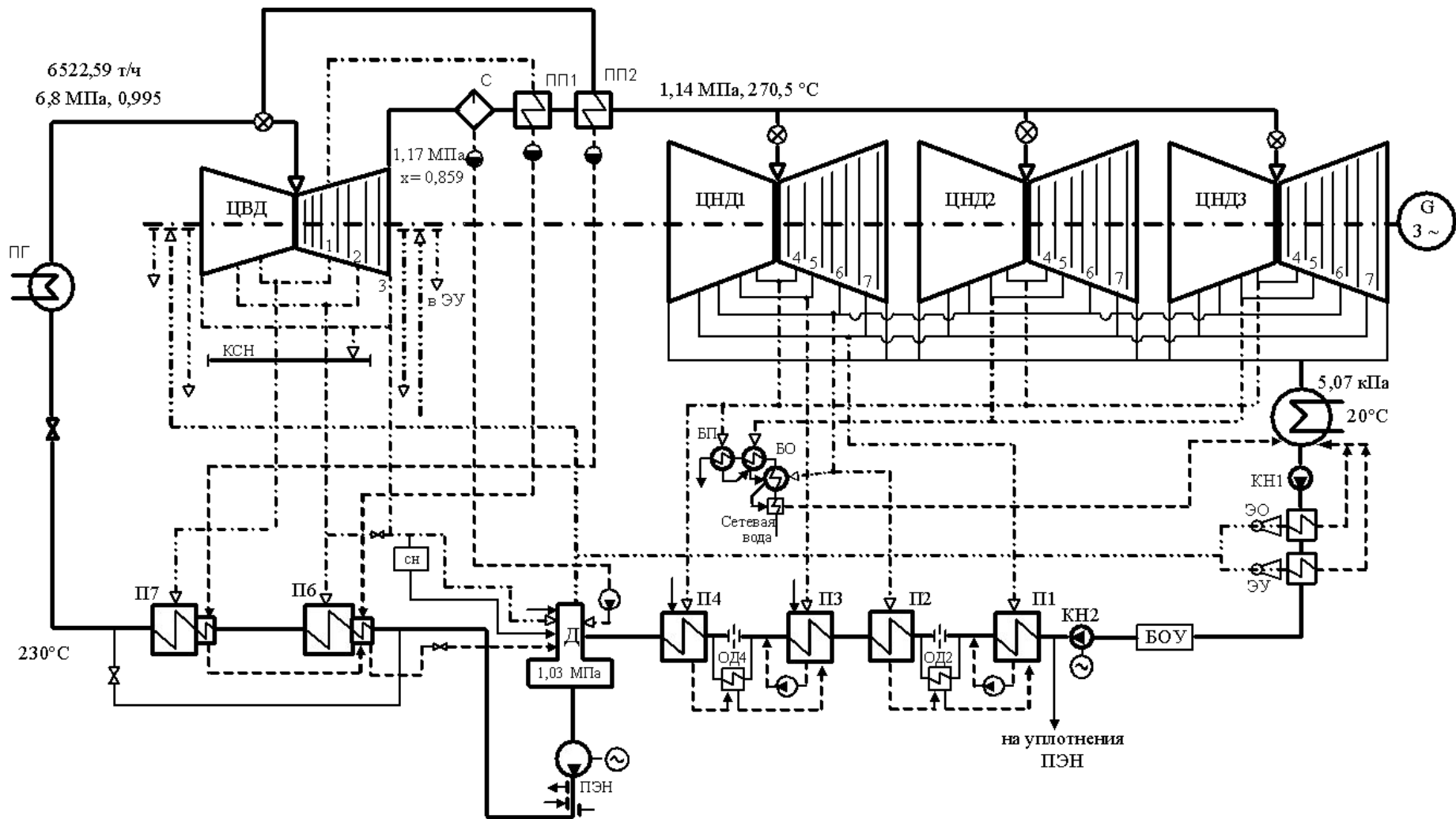
— - *«острый» пар*;

— - *пар на выходе из турбины*;

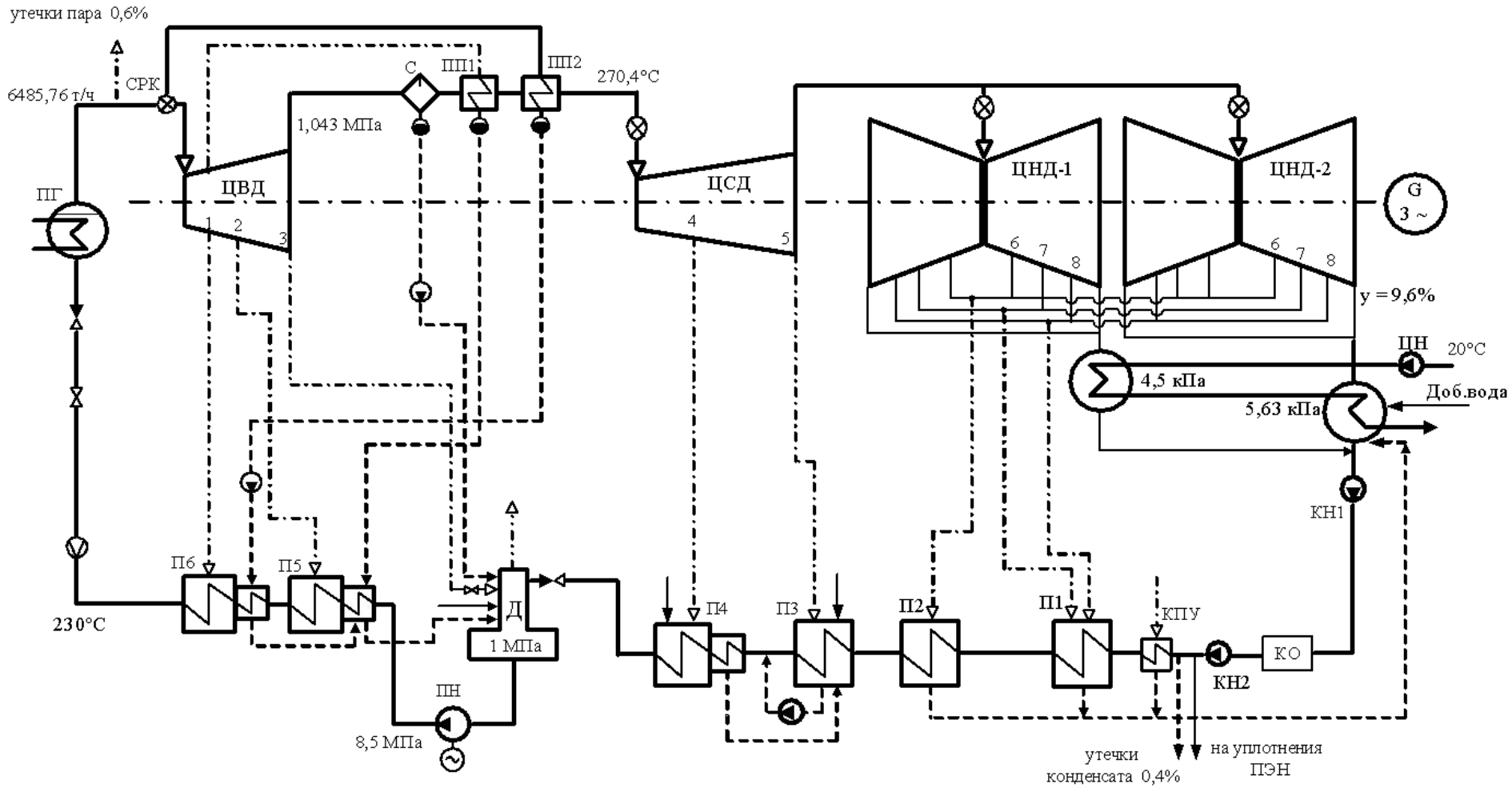
- - - - *основной конденсат*;

— - *питательная вода*;

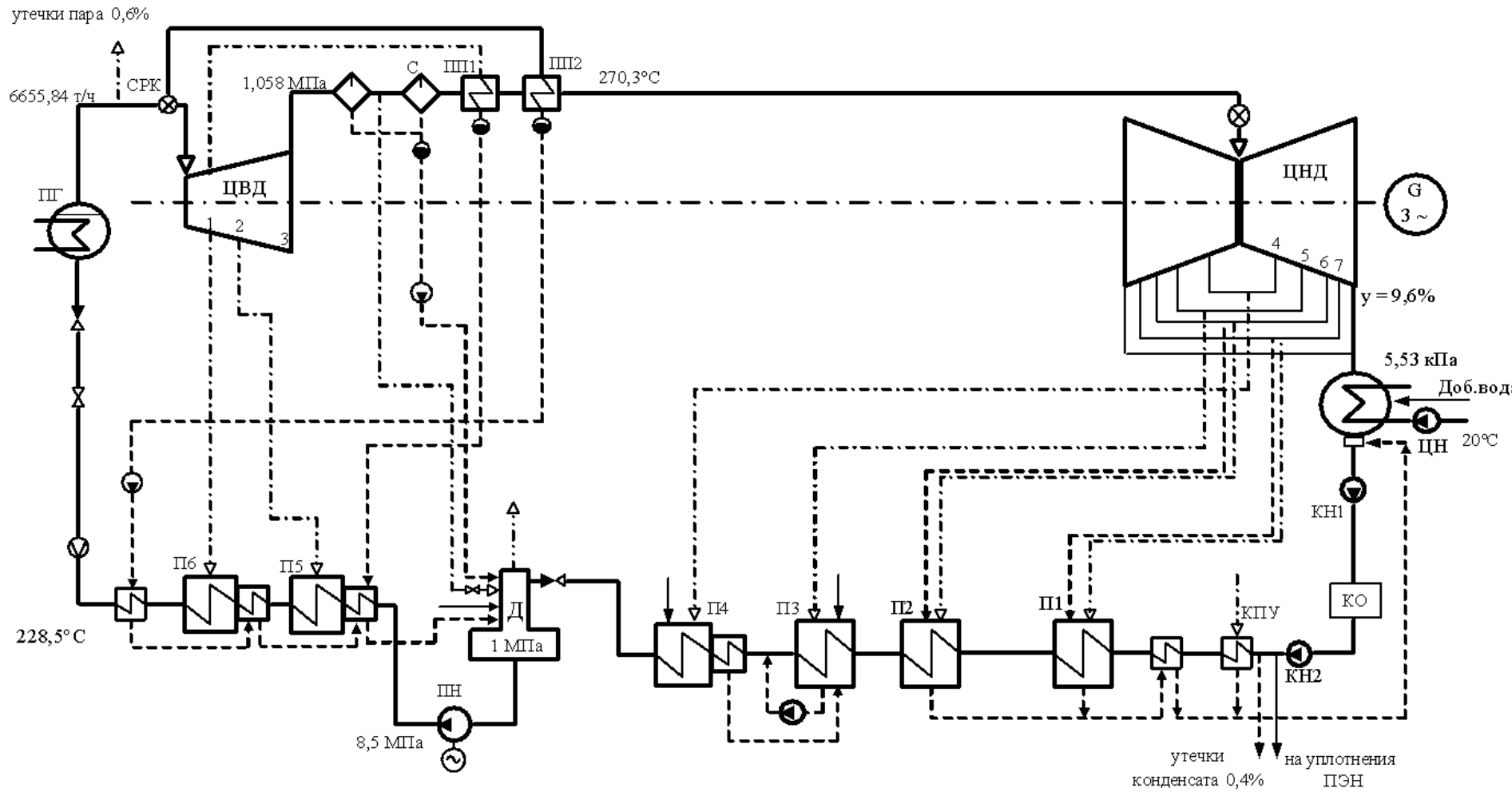




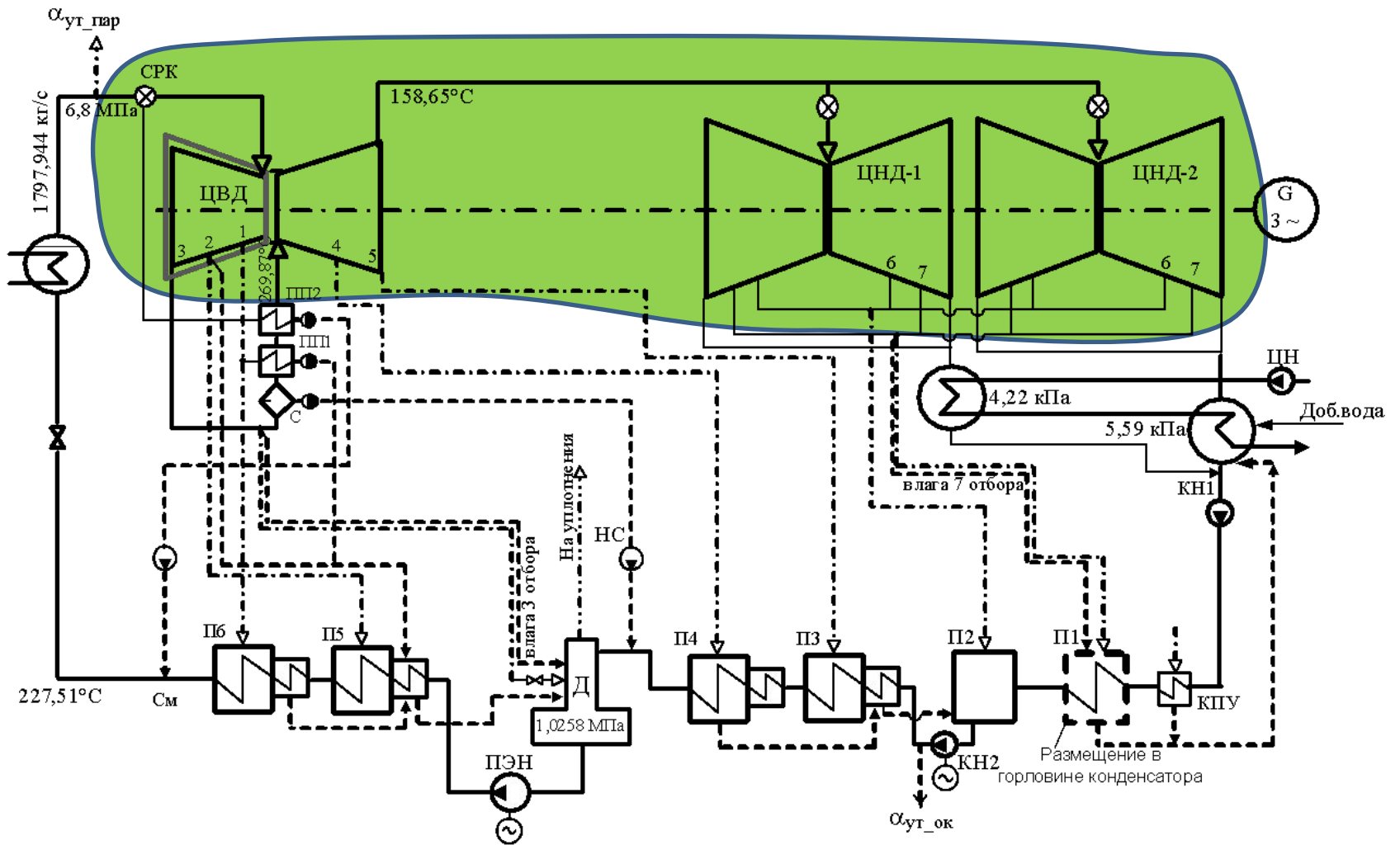
Принципиальная тепловая схема турбоустановки К-1200-6,8/25 ОАО «Турбоатом» (Украина, г. Харьков)



Принципиальная тепловая схема турбоустановки фирмы «ALSTOM»

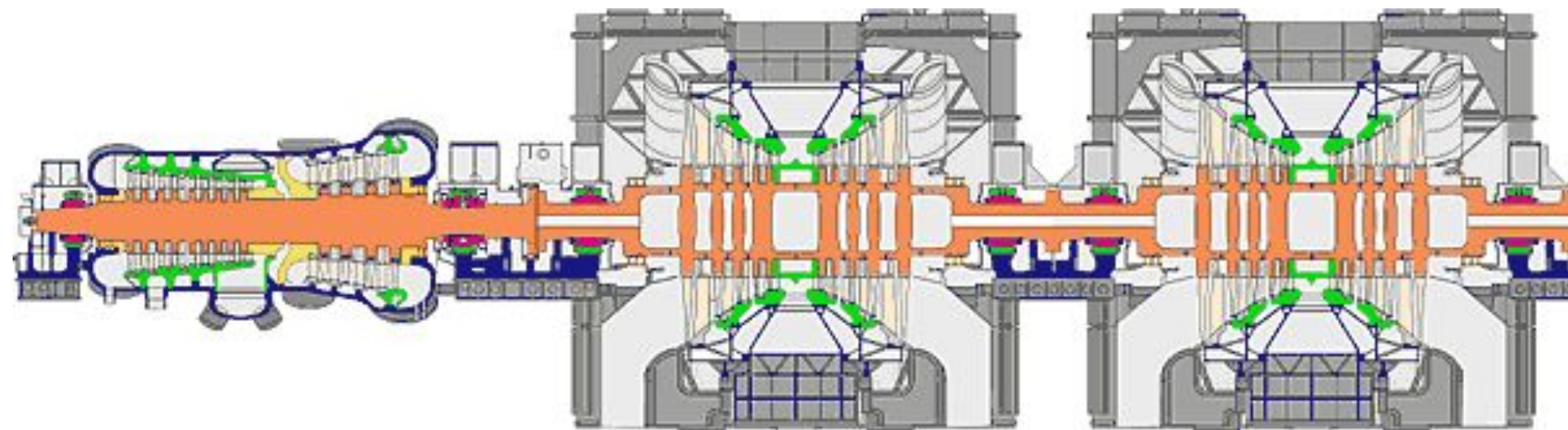


Информационная тепловая схема турбоустановки фирмы «SIEMENS AG»

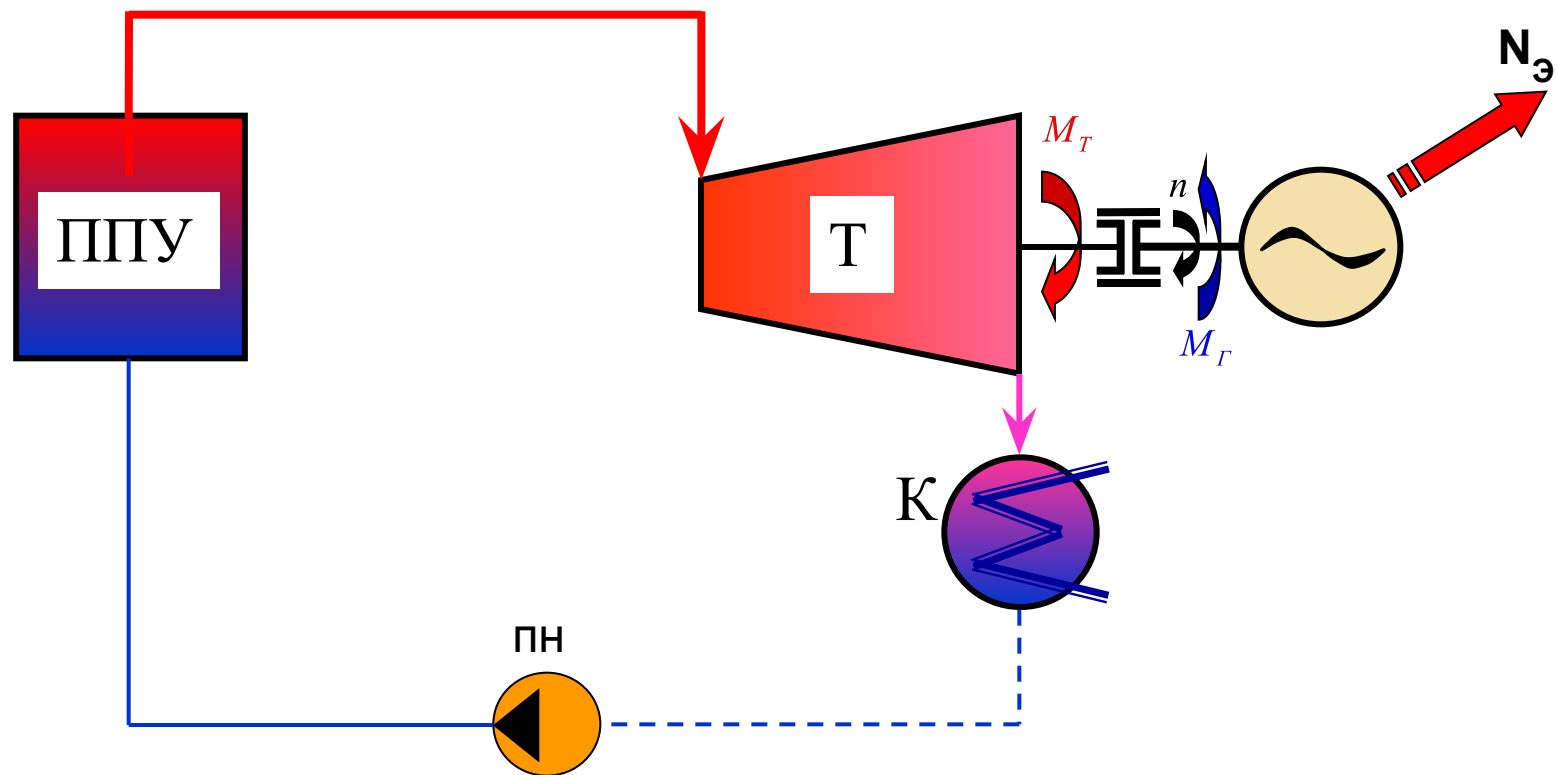


# Продольный разрез турбины К-1200-6,8/25 ОАО “Силловые машины”

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

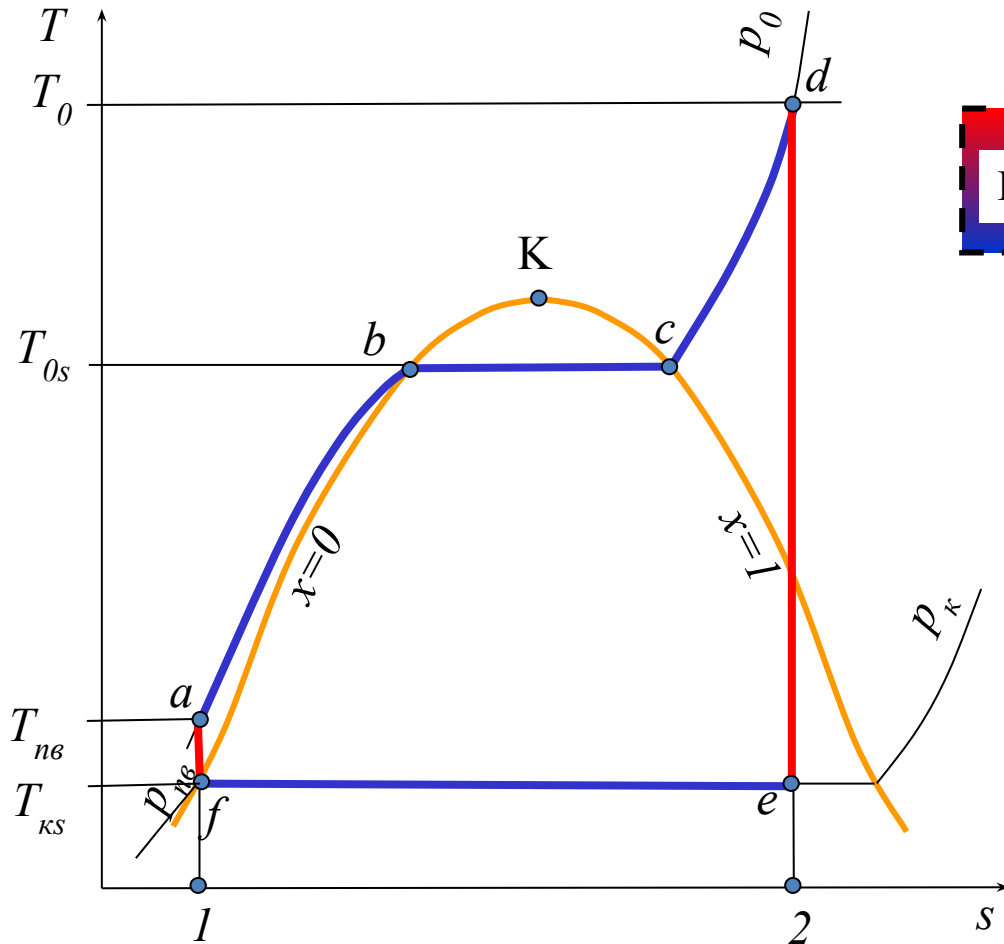


# 1. Паротурбинная установка и ее КПД





# 1.1. Цикл простейшей паротурбинной установки

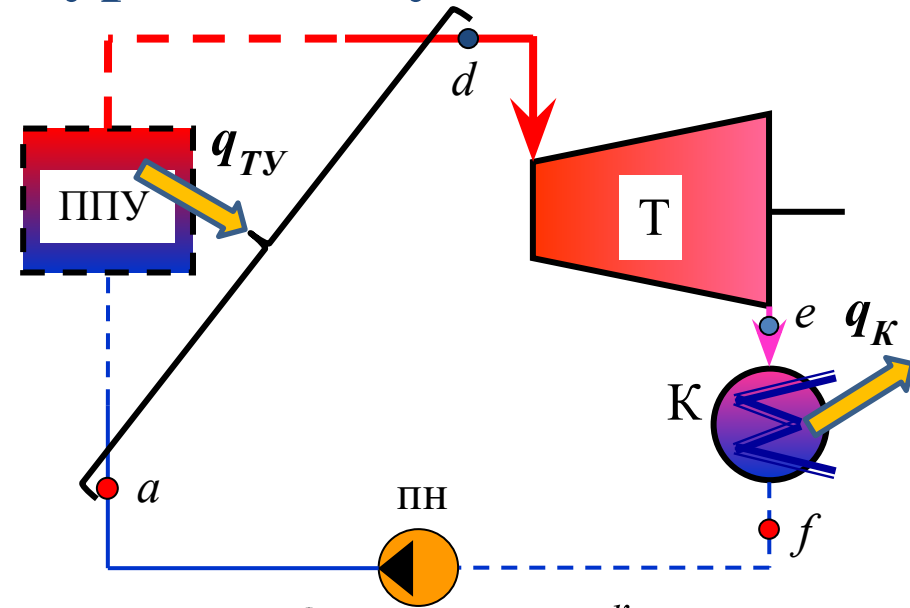


$h_a \rightarrow h_{nv}$  – энтальпия питательной воды [=f(p<sub>nv</sub>, t<sub>nv</sub>)];

$h_d \rightarrow h_0$  – энтальпия острого пара [=f(p<sub>0</sub>, t<sub>0</sub>)];

$h_e \rightarrow h_{kt}$  – энтальпия пара в конце теоретического процесса расширения в турбине [=f(s<sub>0</sub>, p<sub>к</sub>)];

$h_f \rightarrow h'_k$  – энтальпия насыщенной воды на выходе из конденсатора [=f(p<sub>к</sub>, x=1)];



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

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

Количество теплоты, подведенное к турбинной установке:

$$q_{TU} = abcd1$$

$$21 = h_0 - h_{nv}$$

Количество теплоты, отведенное от турбинной установки:

$$q_K = fe .1$$

$$21 = h_{kt} - h'_k$$

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

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:

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

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

где

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

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

## 1.2. Абсолютные и относительные КПД

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

- КПД идеального цикла.

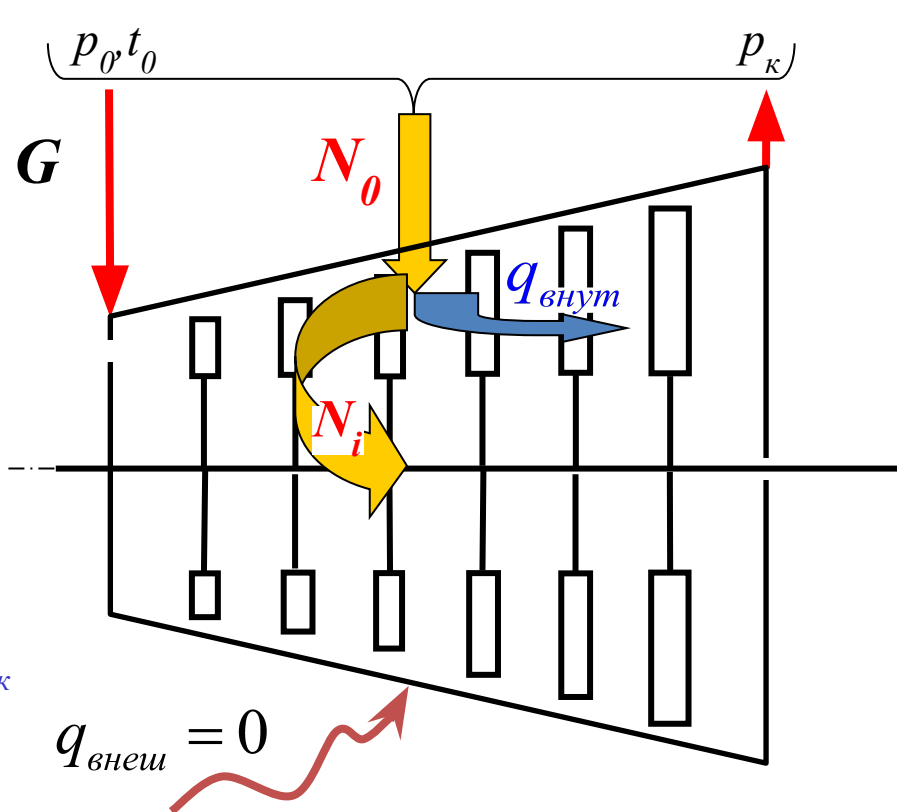
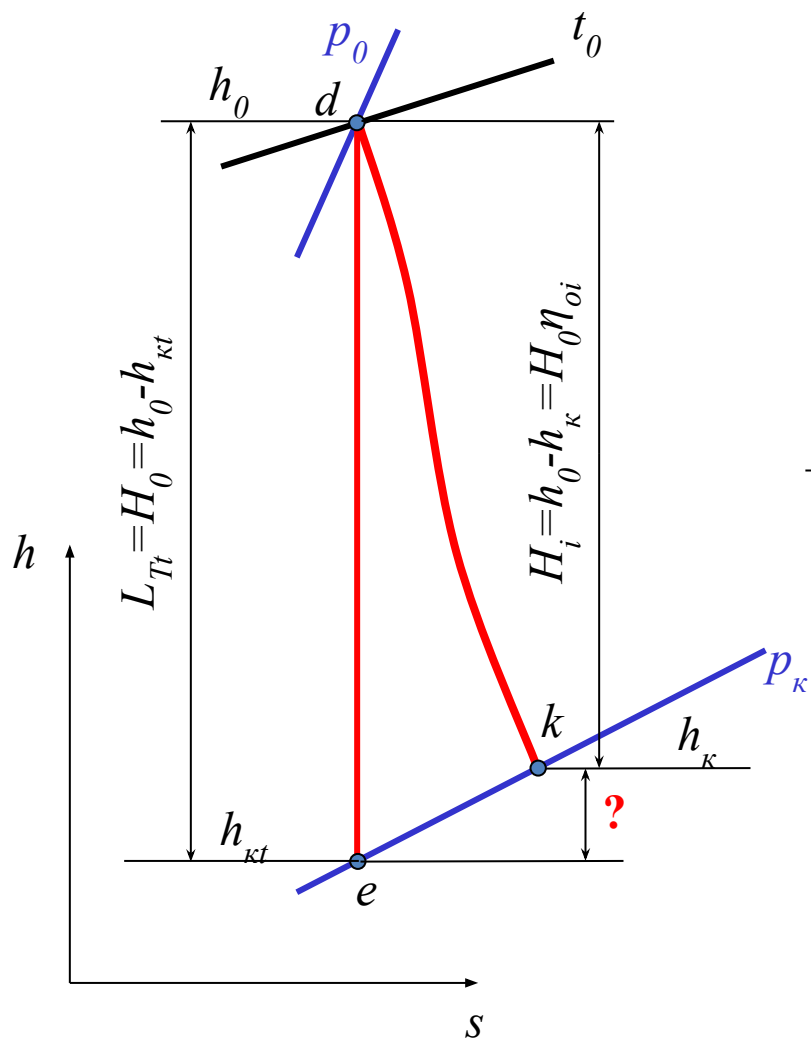
$$\eta_t = \frac{L}{q_{TУ}} = \frac{q_{TУ} - q_K}{q_{TУ}} = \frac{(h_0 - h_{kt}) - (h_{нв} - h'_k)}{h_0 - h_{нв} + h'_k - h'_k}$$

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

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

$\eta_t$  **абсолютный**, или **термический**, КПД идеального цикла

# Мощности и относительные КПД турбогенератора

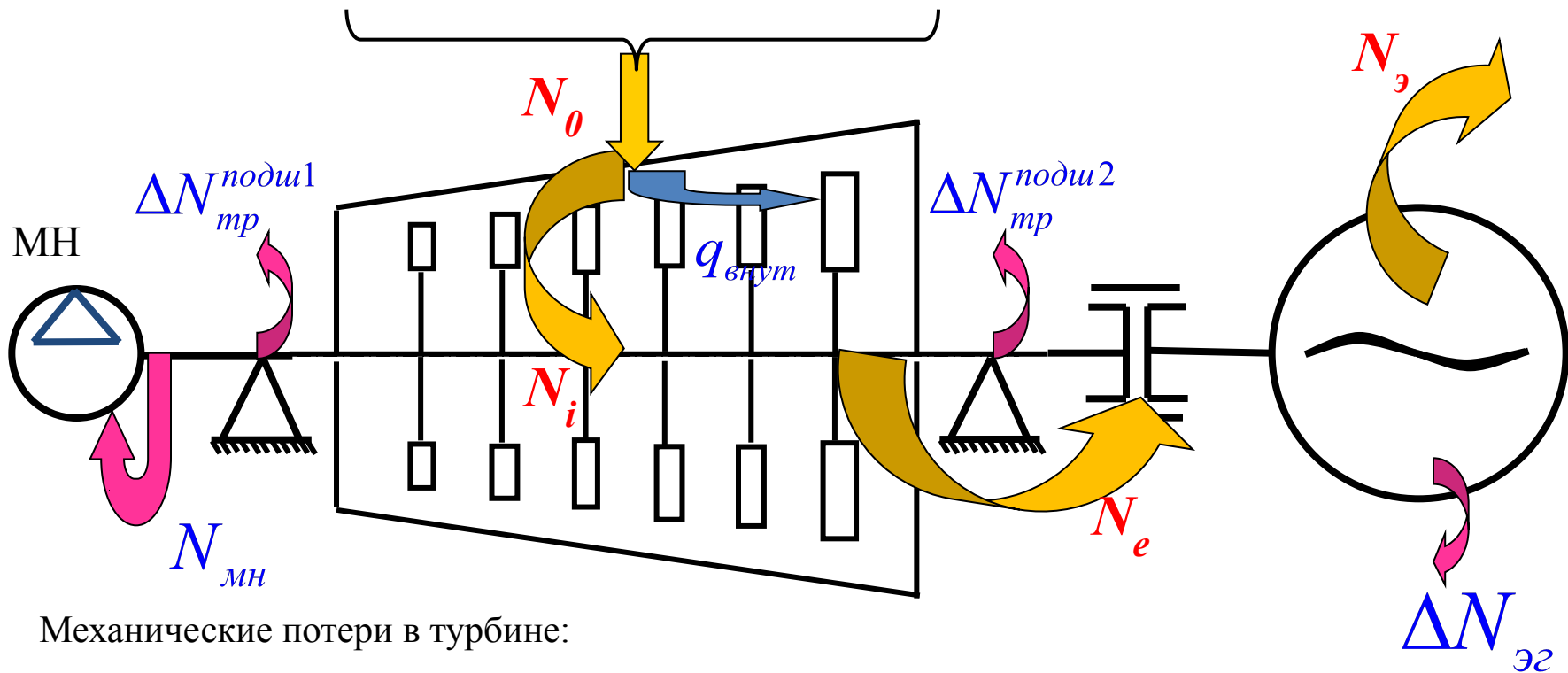


$N_0 = GH_0$  - располагаемая мощность  
 (мощность идеальной турбины)

$$N_i = GH_i$$

**Относительный внутренний КПД турбины.**

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



Механические потери в турбине:

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

**Эффективная** мощность турбины

$$N_{\text{эл}} = N_i - \Delta N \quad N_i \rightarrow N_e$$

**Механический КПД** турбины

$$\eta_{\text{м}} = \frac{N_{\text{эл}}}{N_i} = 1 - \frac{\Delta N}{N_i}$$

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

Электрические потери в генераторе:  $\Delta N_{\text{э2}}$

**Электрическая** мощность турбогенератора

$$N_{\text{э}} = N_e - \Delta N_{\text{э2}} \quad N_i \rightarrow N_e$$

**Электрический КПД** генератора

$$\eta_{\text{э2}} = \frac{N_{\text{э}}}{N_e} = 1 - \frac{\Delta N_{\text{э2}}}{N_e}$$

Относительный электрический КПД турбоагрегата

$$\eta_{\theta} = \frac{N_{\text{э}}}{N_0} = \frac{N_{\dot{i}}}{N_0} \frac{N_e}{N_i} \frac{N}{N_e} = \eta_{\text{oi}} \eta_{\text{эг}} \eta$$

Относительный эффективный КПД турбины

$$\eta_{\text{oe}} = \frac{N_e}{N_0} = \frac{N_i}{N_0} \frac{N_e}{N_i} = \eta_{\text{oi}} \eta$$

- 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

$$\eta_{\text{э}} = \frac{N_{\text{э}}}{Q_{TY}} = \eta_e \eta_{\text{эг}} = \eta_t \eta_{\text{оэ}} = \eta_t \eta_{oi} \eta_m \eta_{\text{эг}}$$

## *Мощности и КПД турбины и турбинной установки*

<b>Наименование КПД</b>	<b>Относительный КПД</b>	<b>Абсолютный КПД</b>	<b>Мощность</b>
<i>Идеальной турбины</i>	1	$\eta_t = \frac{H_0}{q_{TV}} = \frac{h_0 - h_{kt}}{h_0 - h_{nb}}$	$N_0 = GH_0$
<i>Внутренний</i>	$\eta_{oi} = \frac{N_i}{N_0} = \frac{H_i}{H_0}$	$\eta_i = \frac{N_i}{Q_{TV}} = \eta_t \eta_{oi}$	$N_i = GH_i = N_0 \eta_{oi}$
<i>Эффективный</i>	$\eta_{oe} = \frac{N_e}{N_0} = \eta_{oi} \eta$	$\eta_e = \frac{N_e}{Q_{TV}} = \eta_t \eta_{oe}$	$N_{\text{эл}} = GH_{i\text{oe}} = N_0 \eta$
<i>Электрический</i>	$\eta_{o\text{э}} = \frac{N_{\text{э}}}{N_0} = \eta_{oi} \eta_M \eta_{\text{э2}}$	$\eta_{\text{э}} = \frac{N_{\text{э}}}{Q_{TV}} = \eta_t \eta_{o\text{э}}$	$N_{\text{э}} = GH_0 \eta_{oi} \eta_M \eta_{\text{э2}} =$ $= N_0 \eta_{o\text{э}}$



Расход пара на турбину, необходимый для получения заданной мощности:

$$G = \frac{N_{\text{э}}}{H_0 \eta_{\text{oi}} \eta_{\text{эз}} \eta}$$

## 1.3. Значение КПД

$$\eta_{\text{э}} = \eta_M \eta_{\text{ог}} \eta_{\text{г}} \eta_{\text{д}}$$

- 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 ТГУ (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.

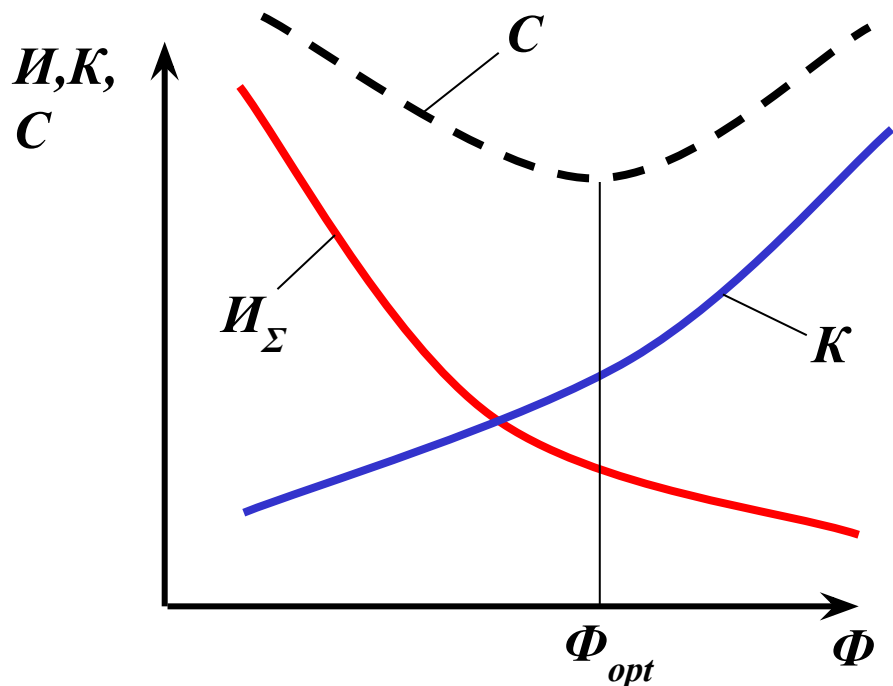
- Капитальные затраты:  $K_{\Sigma} = \sum K_j$  (затраты, произведенные до начала эксплуатации)

- 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 разновременных затрат)



*Положим, есть параметр  $\Phi$ , 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

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

### А. Термодинамические методы.

Направлены на увеличение  $\eta_t$ . Однако они влияют и на  $\eta_{oi}$ .

- 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  $\eta_{oi}$ ,  $\eta_m$ ,  $\eta_{\text{эг}}$ .

Турбомашины АЭС