

# ПАРОГЕНЕРАТОРЫ АЭС

---

**Тема.      Теплотехнические      схемы  
парогенераторов АЭС**

---

# Основные вопросы

- Теплотехнические схемы парогенераторов АЭС с водяным теплоносителем.
- Теплотехнические схемы ПГ АЭС с ЖМ теплоносителем.
- $tQ$  – диаграммы и тепловые балансы ПГ АЭС

# Понятие теплотехнической схемы ПГ

Теплотехнической (тепловой) схемой парогенератора называют схему, отражающую в графическом виде процесс передачи тепла от греющего теплоносителя к рабочему телу.

Теплообменную поверхность ПГ при этом условно разбивают на участки (зоны, элементы), выполняющие специфичные функции:

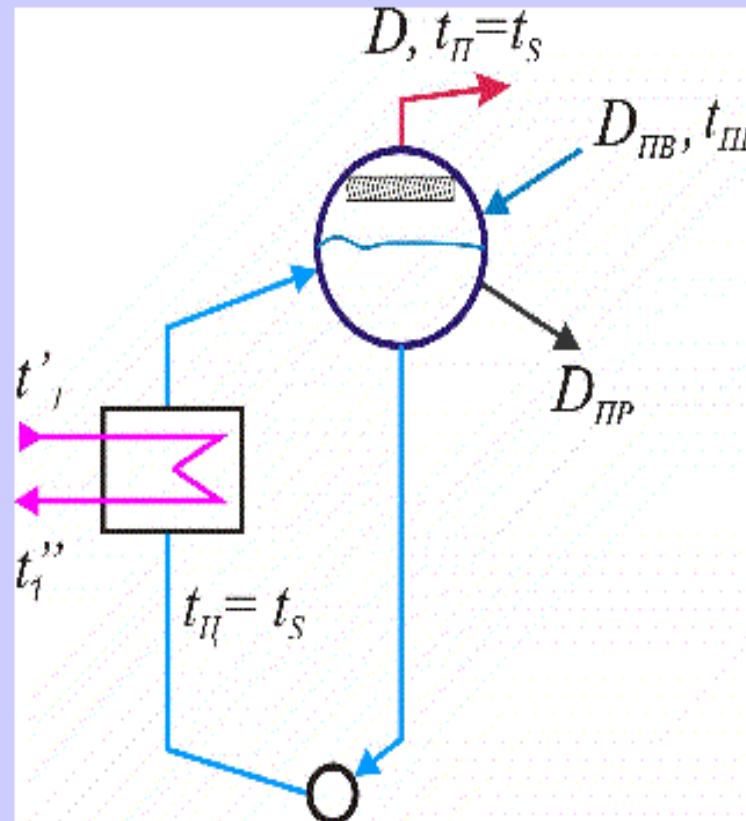
- ❖экономайзер (Э),
- ❖испаритель (И),
- ❖первичный пароперегреватель (ПЕ)
- ❖вторичный (промежуточный) пароперегреватель (ПП).

## Понятие tQ-диаграммы парогенератора

tQ - диаграмма представляет собой графическое представление распределения температур сред и температурных напоров по участкам тепловой мощности ПГ.

tQ-диаграмма строится в соответствии с выбранной тепловой схемой ПГ и на основе решения уравнений балансов .

# $tQ$ -диаграмма парогенератора без Э и ПЕ



# Тепловые и материальные балансы

Уравнения теплового и материального балансов определяют количество тепла, передаваемое как в целом в парогенераторе, так и в его отдельных поверхностях: Э, И, ПЕ, и ПП.

Структура системы уравнения теплового и материального балансов ПГ составляется в соответствии с его теплотехнической схемой.

# Теплотехнические схемы ПГ, обогреваемых водой

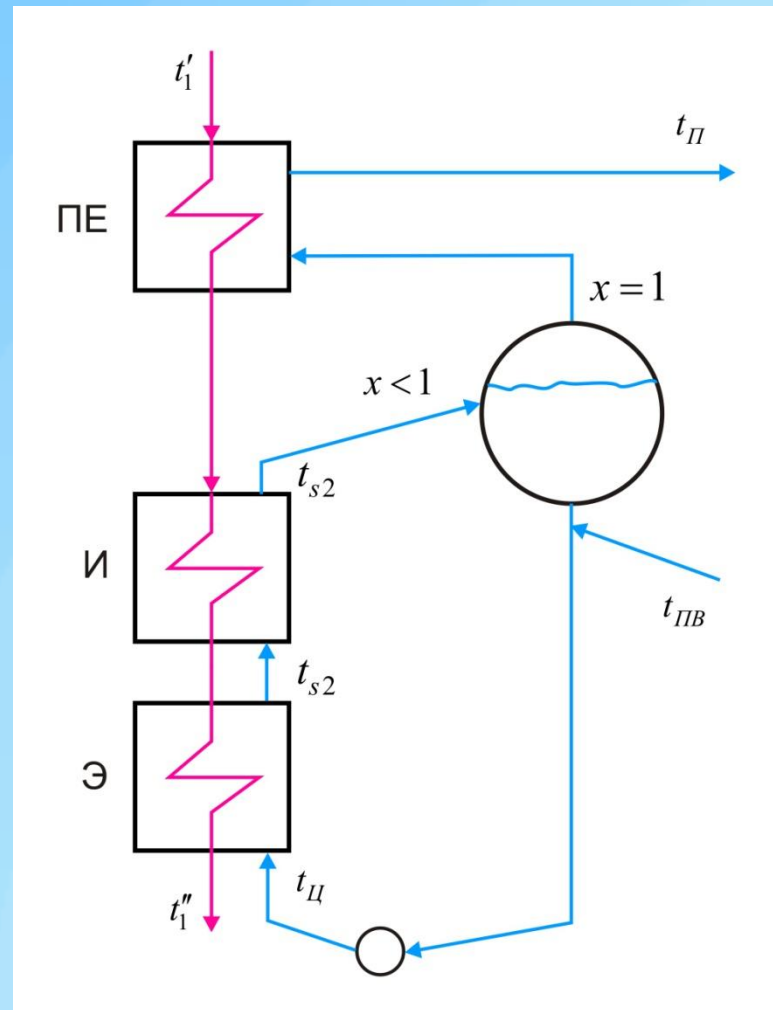
- ПГ перегретого пара с естественной циркуляцией.
- ПГ насыщенного пара с естественной циркуляцией (с экономайзерным участком и без него).
- ПГ перегретого пара прямоточный.

## Структура и параметры теплотехнических схем ПГ, обогреваемых водяным теплоносителем

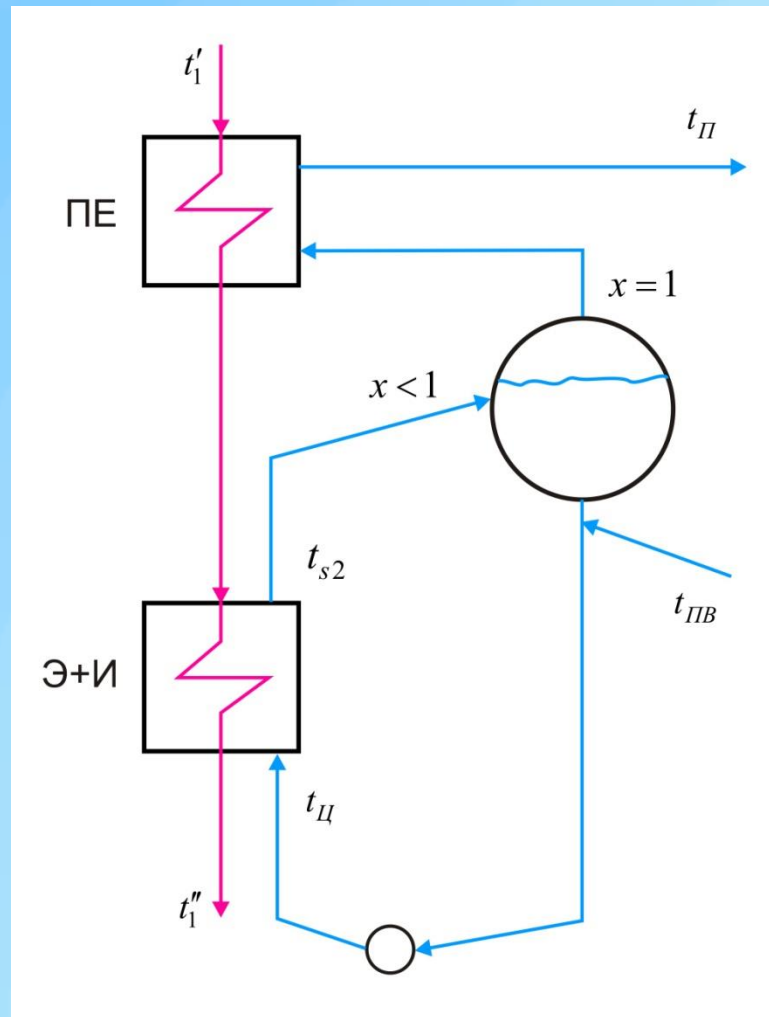
- Вода – теплоноситель низкотемпературный (насыщенный или слабоперегретый пар, отсутствие ПП).
- Вода имеет невысокую температуру насыщения (повышенные расходы теплоносителя, относительно низкое давление рабочего тела)



# ПГ перегретого пара с естественной циркуляцией (с выделенным экономайзером)



# ПГ перегретого пара с естественной циркуляцией (с совмещенным Э+И)



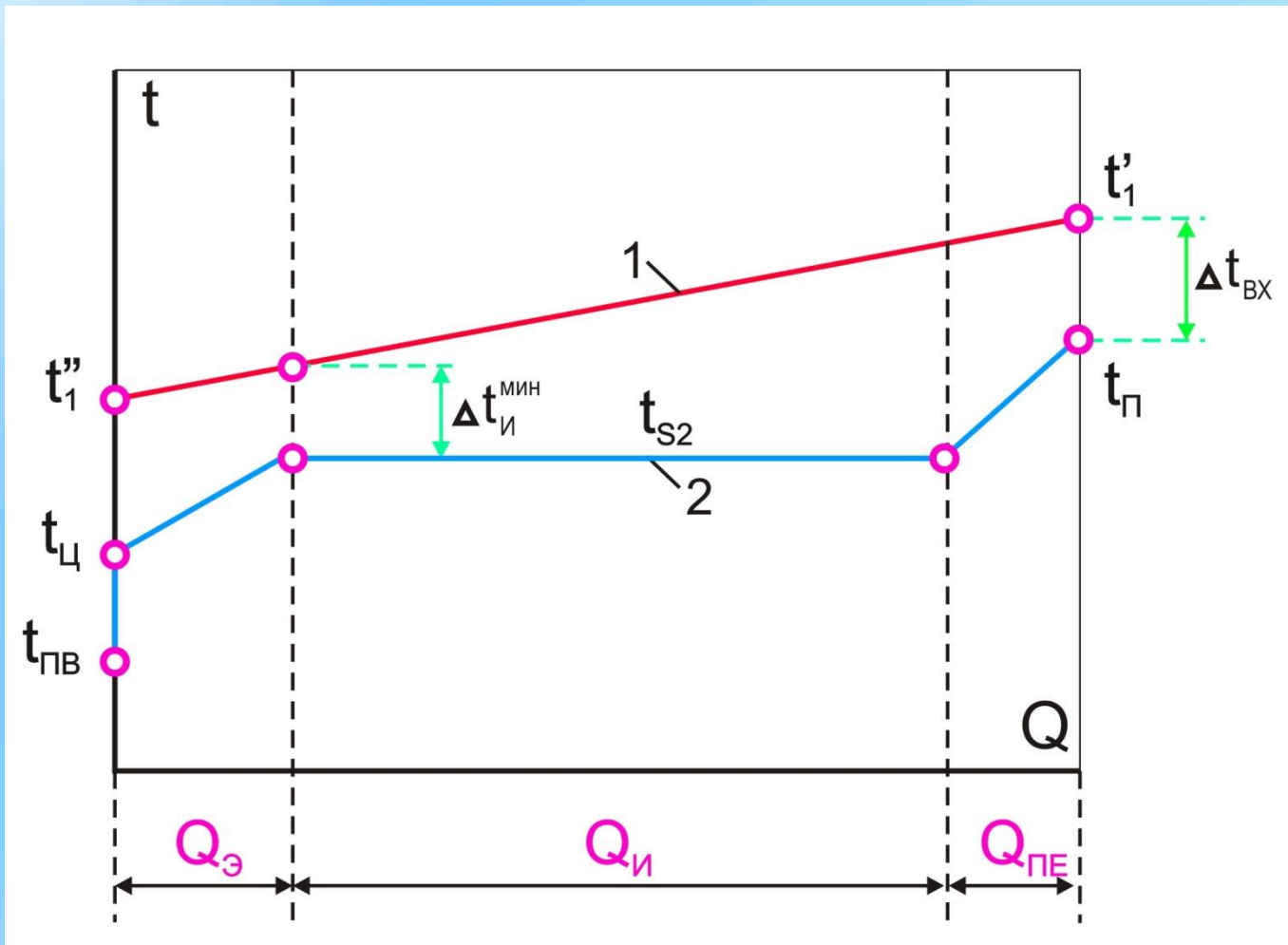


Рис.  $tQ$ - диаграмма ПГ перегретого пара с ЕЦ в испарителе

## Характерные точки (температуры) на tQ - диаграмме

- $t'_1$  -
- $t''_1$  -
- $t_n$  -
- $t_{s2}$  -
- $t_{пв}$  -
- $t_u$  -

## Температура теплоносителя на **входе** в ПГ

Температура теплоносителя на выходе из реактора ограничивается **двумя** условиями:

- ❖ однофазность теплоносителя на выходе из реактора;
- ❖ непревышение максимальной рабочей температуры оболочек ТВЭЛов (Zr+1%Nb), равной 350 °C

$$(t'_1)_{\text{макс}} \leq t_{s1} - \delta t_n$$

$$(t'_1)_{\text{макс}} \leq 350 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Примечание:  $\delta t_n = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

## Температура теплоносителя на **входе** в ПГ

Давление теплоносителя в реактора принимается максимально возможным по условиям изготовления его корпуса. При современном состоянии мирового и отечественного реакторостроения таким давлением является **16 МПа**

$$(t'_1)_{\text{макс}} \leq t_{s1} - \delta t_n = 347,4 - 25 \approx 322 \text{ } ^\circ\text{C}$$

# Влияние давления теплоносителя на конструктивные характеристики корпуса реактора

Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки корпуса производится по формулам типа

$$\delta_p = \frac{p_p \cdot D_H}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma_H] + p_p} + c$$

$P_p = 16$  МПа;  $D_H = 4$  м;  $[\sigma_H] = 17$  кгс/мм<sup>2</sup>;  **$\delta = 180$  мм;**

$P_p = 17$  МПа;  $D_H = 4$  м;  $[\sigma_H] = 17$  кгс/мм<sup>2</sup>;  **$\delta = 190$  мм;**

## Температура теплоносителя на **выходе** из ПГ

При заданной температуре на входе в ПГ температура на выходе  $t''_1$  однозначно определяется подогревом теплоносителя в реакторе

$$t''_1 = t'_1 - \Delta t_p$$

Подогрев теплоносителя  $\Delta t_p$  в реакторе влияет на величину его расхода  $G$  и давление генерируемого пара  $p_2$  (на температуру насыщения в парогенераторе  $t_{s2}$ )

$$t_{s2} \approx t'_1 - \Delta t_p - \Delta t_u^{мин}$$

$$G = Q / (c_p \cdot \Delta t_p)$$

Примечание: оптимальное значение  $\Delta t_u^{мин} = 10...20 \text{ } ^\circ\text{C}$



## Анализ влияния подогрева теплоносителя

При **заданном** и **неизменном** минимальном температурном напоре в испарителе...

$$\Delta t_p \uparrow$$

Снижается расход теплоносителя и расход эл.эн. на его циркуляцию, уменьшаются размеры трубопроводов 1-го контура

Снижается температура насыщения в ПГ, а значит и давление генерируемого пара

С учетом этих факторов

$$\Delta t_p^{onm} \approx 30^\circ C \quad t_1'' \approx 290^\circ C$$

## Температура насыщения рабочего тела в ПГ

$$t_{s2} \approx t'_1 - \Delta t_p - \Delta t_u^{мин} = 322 - 30 - (10...20) = 282...272 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Этим значениям температуры насыщения соответствуют значения давления генерируемого пара

$$p_2 \approx 5,67...6,6 \text{ МПа}$$

## Температура пара на **выходе** из ПГ

При заданной температуре теплоносителя  $t'_1$  температура генерируемого пара  $t_n$  однозначно определяется температурным напором во входном сечении ПГ

$$t_n = t'_1 - \Delta t_{ex}$$

Примечание: оптимальное значение  $\Delta t_{ex} = 10...15 \text{ } ^\circ\text{C}$

## Температура питательной воды

Определяется по результатам вариантных оптимизационных паротурбинной и парогенераторной установок

$$t_{пв}^{opt} = t'_к + (0,8...0,9) \cdot \frac{t_0 - t'_к}{z - 1} \cdot z$$

## Температура циркуляции

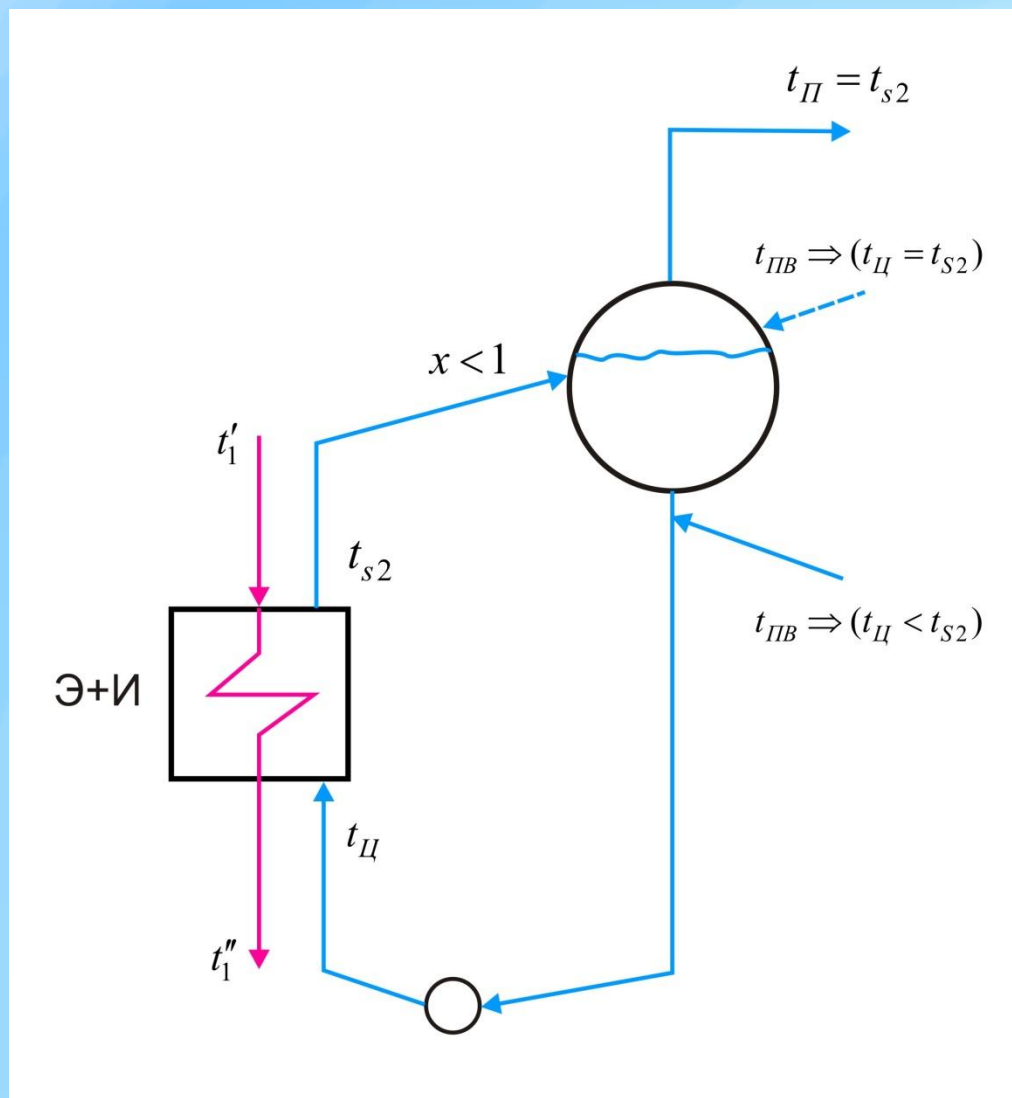
Определяется из теплового баланса точки смешения

$$D_u \cdot h_u = D \cdot h_{нв} + (D_u - D) \cdot h'_2$$

$$h_u = \frac{h_{нв} + (k_u - 1) \cdot h'_2}{k_u}$$

$$t_u = f(h_u, p_2)$$

# ПГ насыщенным пара с естественной циркуляцией

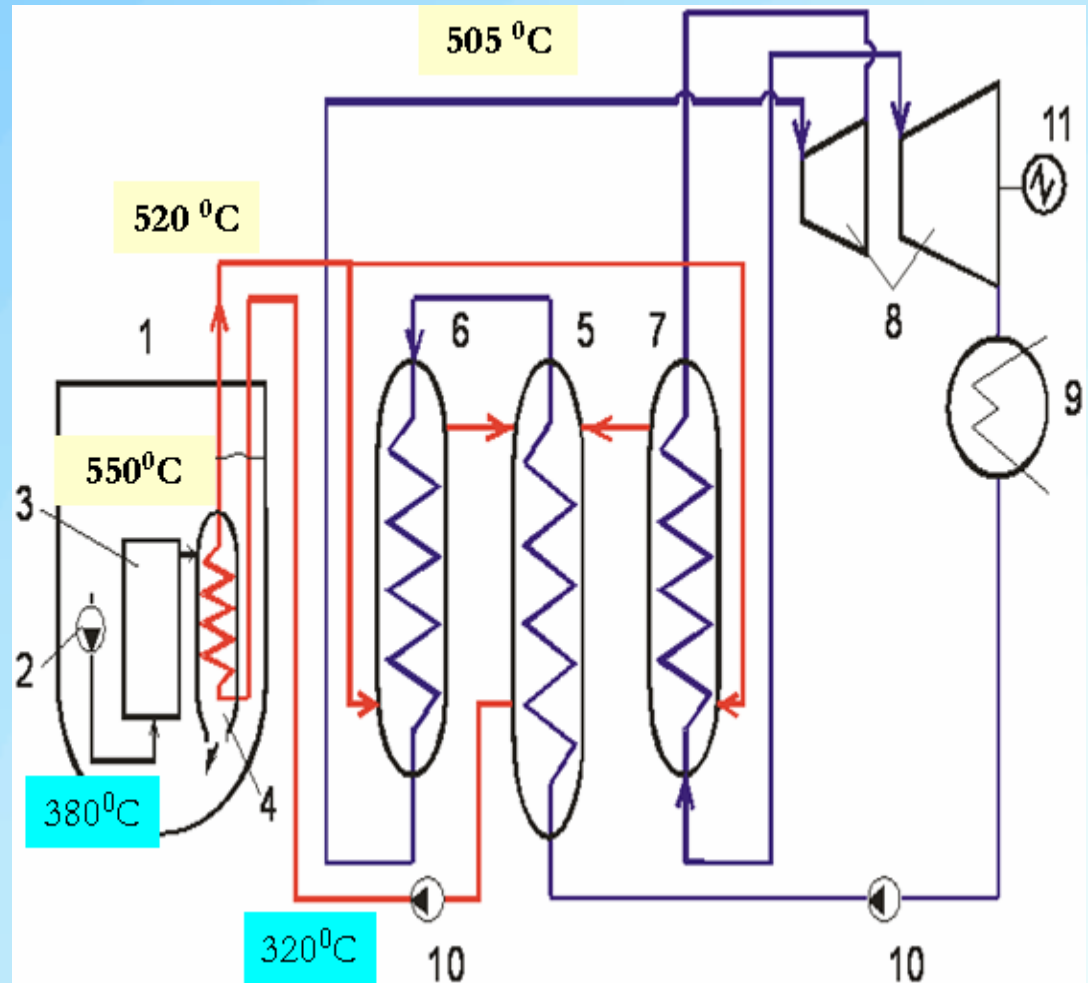


# Теплотехнические схемы ПГ, обогреваемых жидкометаллическими теплоносителями

ЖМТ – теплоноситель высокотемпературный.

Максимально допустимая температура на входе в ПГ  $T'_1$  определяется с учетом:

- необходимость получения пара высоких параметров (реализация цикла перегретого пара);
- возможность обеспечения надежной температуры реактора (температура оболочек)



## Особенности теплотехнических схемы ПГ, обогреваемых ЖМТ

- Из-за относительно небольшой теплоемкости ЖМТ возникает необходимость в повышенных подогревах (150 – 200 °С) в реакторе.

*Это приводит к существенным перепадам температур ЖМТ (вход-выход) в ПТО и ПГ.*

- Наличие промежуточного теплообменника (2-го контура) приводит к снижению температуры ЖМТ на входе в ПГ.

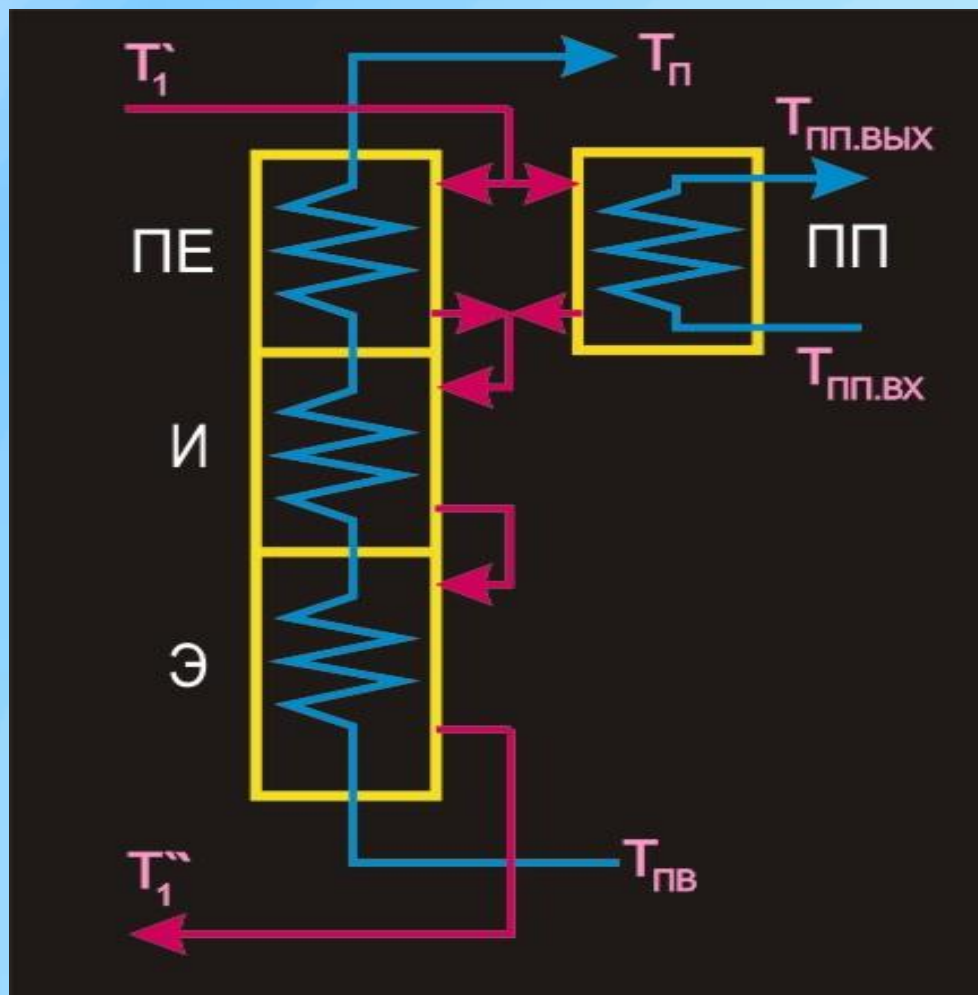
*Частичное смягчение этого недостатка – уменьшение температурного напора в ПТО до мин. допустимого 15 – 25 °С.*

- Возможны самые различные варианты включения промежуточного перегрева пара и схем включения ПП.

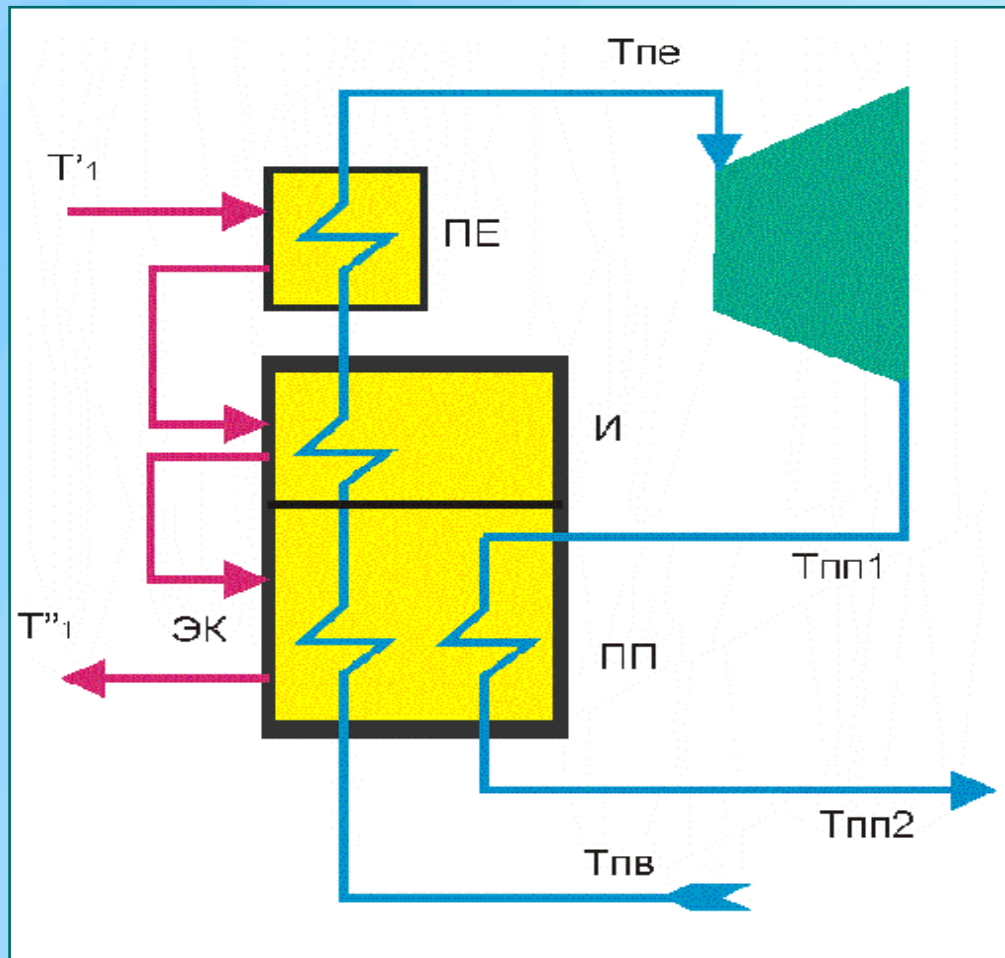
*“Газовый” или паропаровой; высокотемпературный или низкотемпературный.*



# Высокотемпературный промперегрев в ПГ АЭС с жидкометаллическими теплоносителями



# Низкотемпературный промперегрев в ПГ АЭС с жидкометаллическими теплоносителями



# Низкотемпературный промперегрев в ПГ АЭС с жидкометаллическими теплоносителями

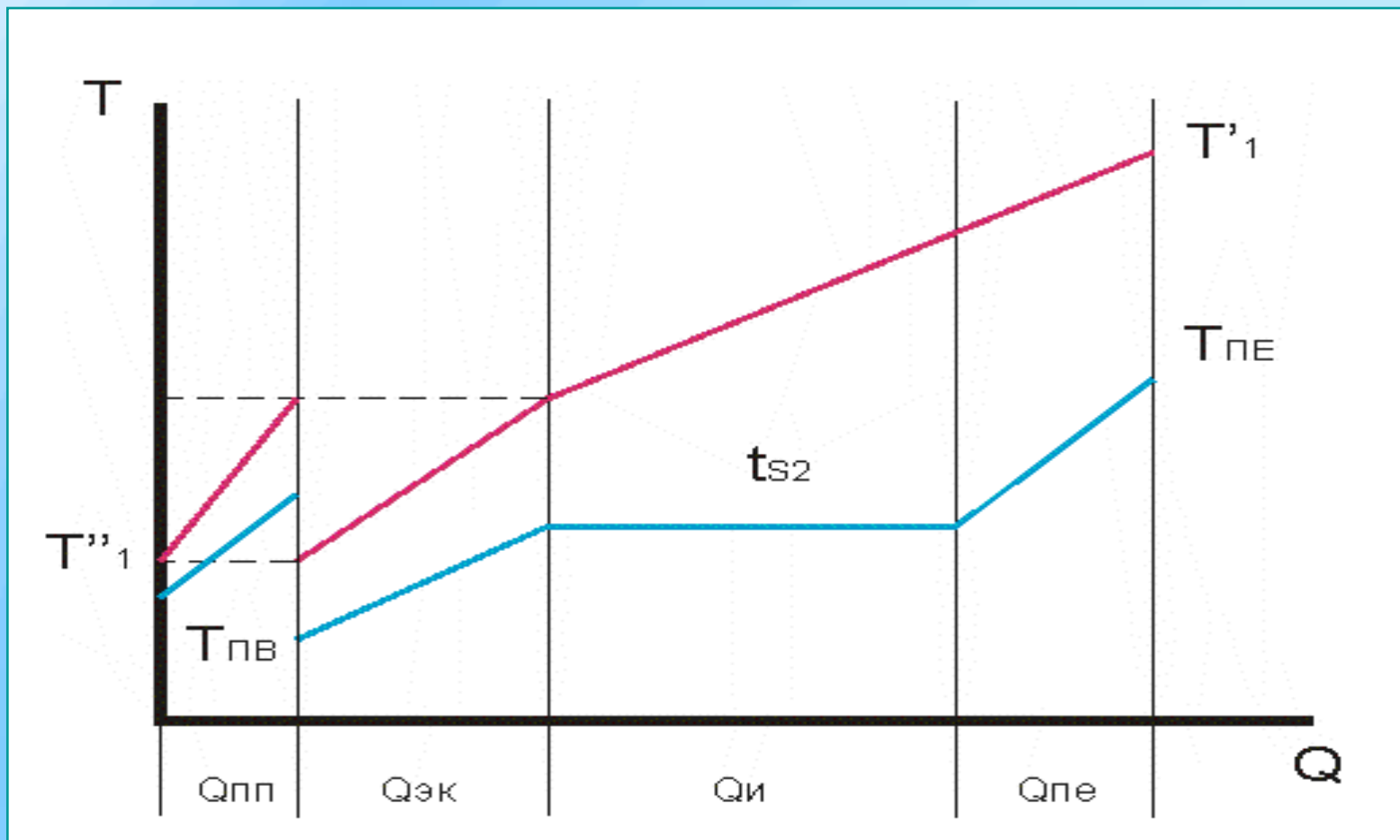


Рис. TQ-диаграмма ПГ ЖМТ с низкотемпературным промперегревом

Спасибо за внимание