

## План лекции

# Конструкционные схемы и параметры ПГ с различными теплоносителями

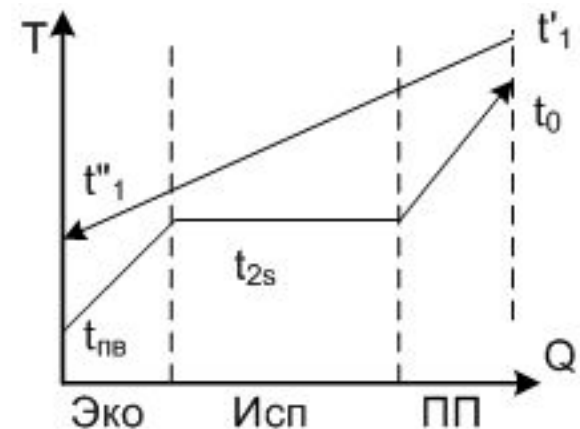
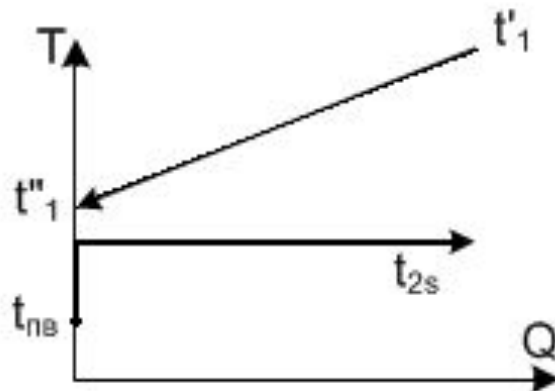
- Конструкционные схемы
- Особенности схем с водным теплоносителем
  - Параметры пара ПГ, обогреваемых водой под давлением
- Конструкционные схемы ПГ с жидкометаллическим теплоносителем
  - Параметры пара ПГ, обогреваемых жидкими металлами
- Конструкционные схемы ПГ с газообразными теплоносителем
  - Параметры пара ПГ, обогреваемых газообразными теплоносителями

## Конструкционные схемы ПГ

- ПГ АЭС выполняются с поверхностью нагрева в виде трубной системы.
- Способ омывания поверхности нагрева :
  - среду с большим давлением – из соображений прочности и экономичности – направлять в каналы с меньшим эквивалентным диаметром, соблюдая принцип противотока
  - в МТП – более вязкую среду (например, газы)
  - по трубкам – среду, вызывающую более интенсивную коррозию
- Форма поверхности – из условий компактности и минимума температурных напряжений
  - применение компенсаторов, самокомпенсация трубок, материалов с одинаковым КТР, разделение трубных досок и др.

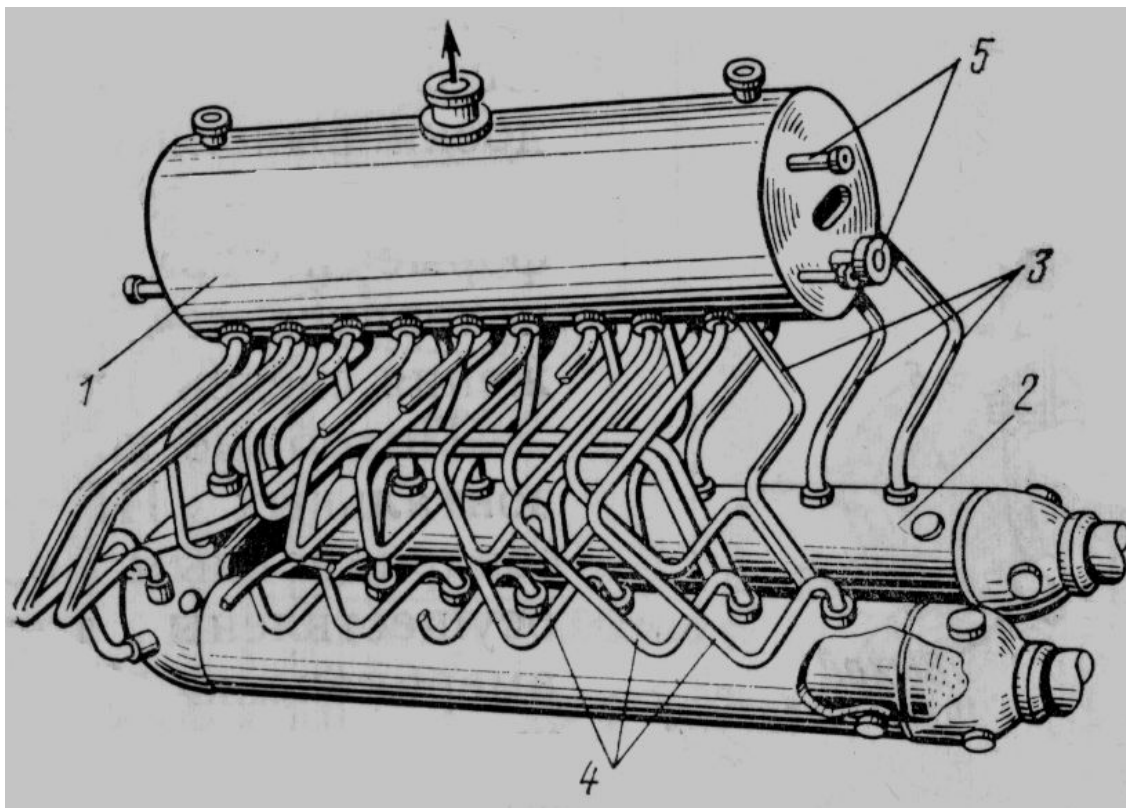
## Конструкционные схемы ПГ

- Компоновка элементов ПГ:
  - пароперегреватель отдельно
  - ЭКО и испаритель – совместно или отдельно
- Отдельный ЭКО имеет малую  $F_{\text{пто}}$  (тепловые потоки малы, интенсивность т/о высокая). Выполняется по простой схеме
- При объединении ЭКО и испарителя 2 варианта:
  - поверхность т/о эко обособлена и имеет собственный кожух, ликвидация собств. т/о поверхности
  - общая поверхность ничем не разделена, обогрев водой с  $t_{2s'}$ . Подогрев пит. воды до  $t_{2s}$  идет за счет конденсации части образующегося пара. Вариант возможен при условии  $t''_1 > t_{2s}$ .
- Отдельный ЭКО обязателен при  $t''_1 < t_{2s}$



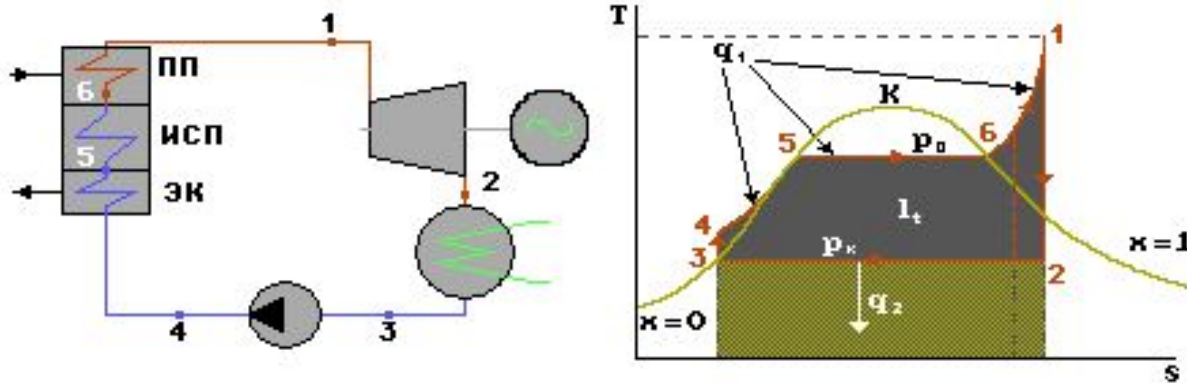
## Конструкционные схемы ПГ

- Вид циркуляции рабочего тела – любой
- Для ПГ с погруженной поверхностью т/о единственный вариант – естественная циркуляция с парообразованием в МТП. Кипение по законам для большого объема – естественная конвекция.
- Сепарация пара – в отдельном корпусе или совместная
- Сепарация осуществляется за счет естественной гравитации или принудительной (механической) сепарации

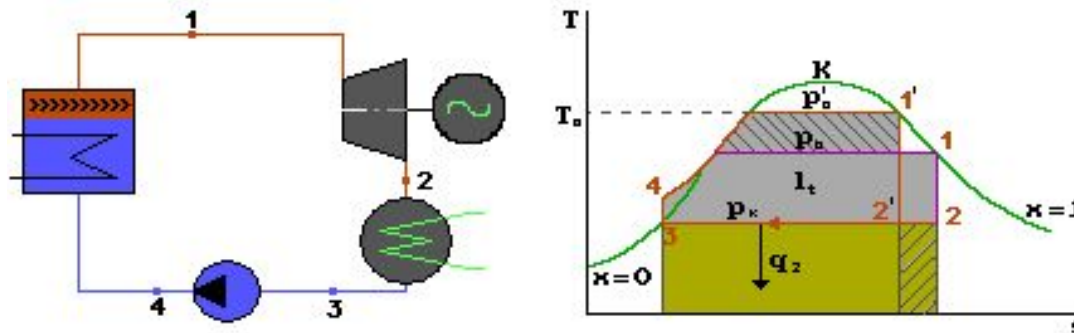


## Влияние параметров пара на экономичность

- С ростом  $T_0$  и  $P_0$  экономичность цикла растет:  $\text{КПД} = (T_0 - T_k) / T_0$
- Для перегретого пара рост  $T$  возможен при постоянном  $P$ . И всегда ведет к росту КПД
- Ограничение по жаропрочности материалов (545-555°C)

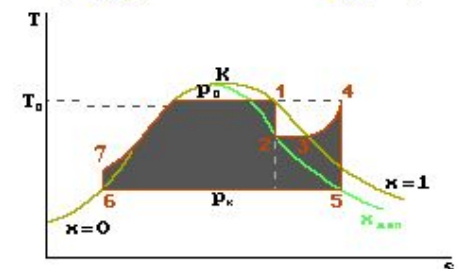
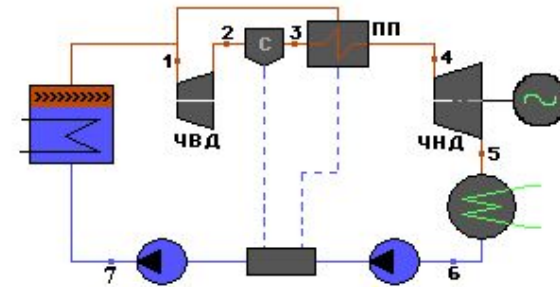
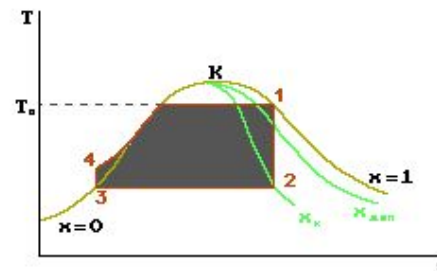
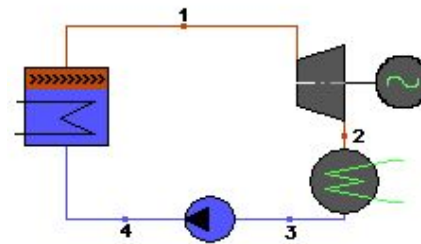
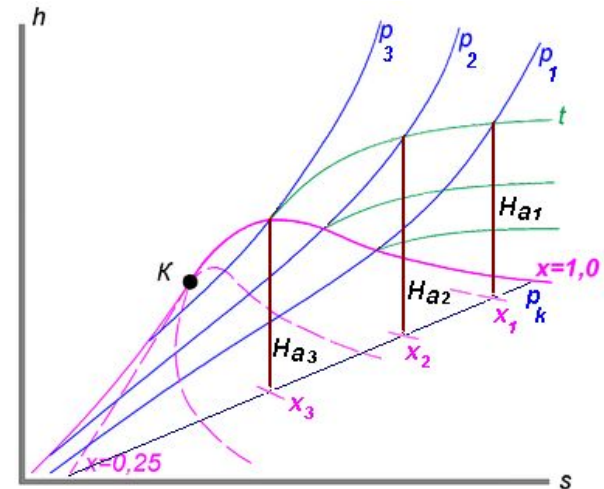


- Для насыщенного пара рост  $T$  связан с ростом  $P$   
И влияние давления на КПД неоднозначно: (рост до 165 бар)



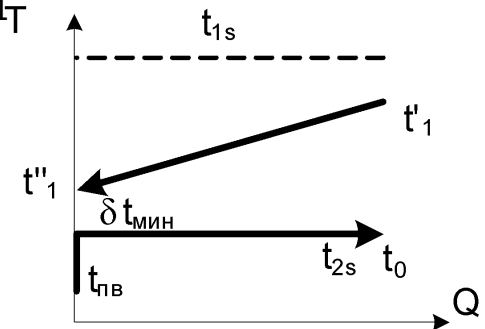
## Влияние параметров пара на экономичность

- Влияние начального давления неоднозначно даже для перегретого пара. При одной и той же  $T_0$  с ростом  $P_0$  полезный теплоперепад сначала растет, потом снижается.  $\text{КПД} = H_a / Q_1$
- Тепловая экономичность зависит не только от термического КПД, но и от КПД, оценивающих потери в других устройствах.
- С ростом  $P_0$  увеличивается конечная влажность пара и снижается внутренний относительный КПД
- $x_{\text{кр}} = 14\%$
- Необходим ввод в схему промежуточной сепарации и перегрева пара



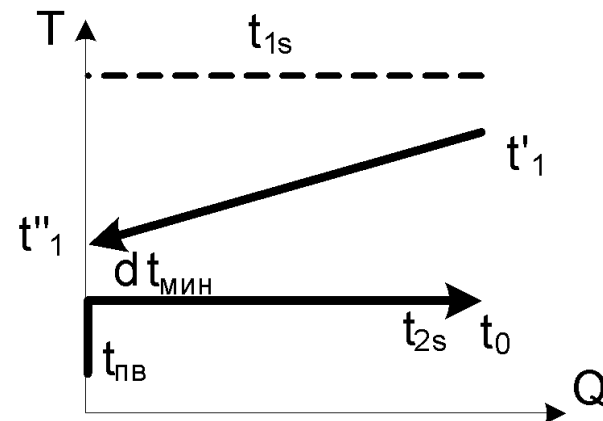
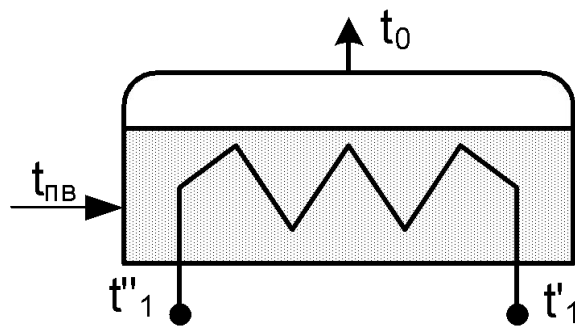
## Параметры пара ПГ, обогреваемых водой под давлением

- Температура теплоносителя на выходе из реактора должна быть ниже  $t_{1s}$  (при  $p_1$ ) на величину, гарантирующую исключение парообразования в реакторе. Запас до кипения – 20-40°C
- для воды  $t_{кр} = 374,12^\circ\text{C}$  (22,13 МПа)
- давление в 1 контуре для ВВЭР - не выше 17 МПа (352°C), значит с учетом запаса до кипения, максимальная  $t'_{1} = 330^\circ\text{C}$
- для увеличения параметров пара необходимо иметь в ПГ минимально возможный темп. напор ( $\delta t_{мин}$ ). В то же время низкий напор ведет к росту поверхности  $F = Q/(k \delta t)$ .
- По технико-экономическим обоснованиям  $\delta t_{мин} = 10-20^\circ\text{C}$
- Поверхность теплообмена большая – многопетлевая компоновка
- Макс. давление пара (и  $t_{2s}$ ) зависит не только от  $\delta t_{мин}$ , но и от  $t''_{1исп}$ . Наибольшее значение её возможно при малом  $\Delta t_1$ .
- Но  $Q = G_1 \cdot c_p \cdot \Delta t_1$  – уменьшение  $\Delta t_1$  ведет к росту  $G_{1Т}$
- По т/э расчетам  $\Delta t_1 = 30-35^\circ\text{C}$
- В итоге: макс.  $t_{2s} = 330 - 30 - 10 = 290^\circ\text{C}$ ,  
а максимальное давление пара = 7-7,5 МПа
- Пар насыщенный или слабо перегретый
- Все ПГ с ВВЭР производят насыщенный пар 6,5 МПа



## Особенности конструкционных схем ПГ с водой под давлением

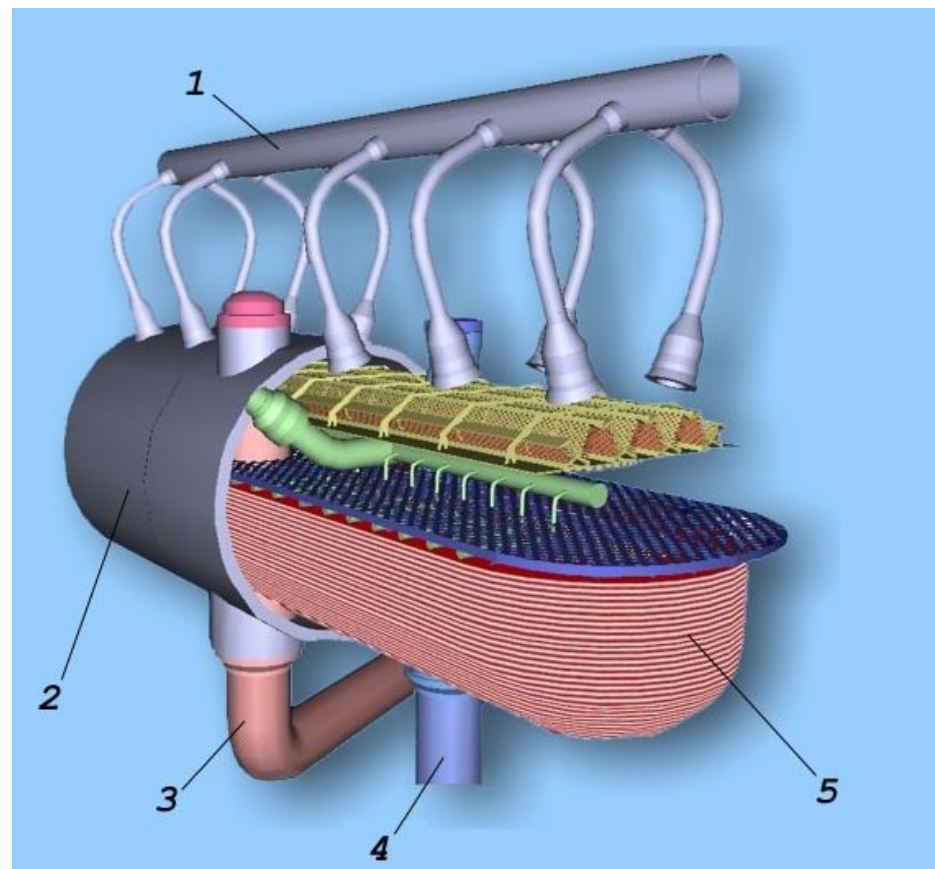
- При максимальных давлениях пара перегрев пара не м.б. больше  $30^{\circ}\text{C}$ . Большой перегрев возможен только при снижении давления пара
- Малый перегрев не дает большого выигрыша в КПД, но значительно усложняет конструкцию ПГ.
- Из-за низкого значения  $\Delta t_1$  введение экономайзера не даст большого роста  $t_{2s}$  и давления, но усложнит конструкцию ПГ, увеличит его габариты.
- Поэтому в тепловой схеме ПГ есть только испаритель. Подогрев п.в. до  $t_s$  идет за счет конденсации части образующегося пара.
- $P_1 \gg P_2$ , поэтому теплоноситель – в трубках, рабочее тело – в МТП.
- Наиболее удобен вариант с погруженной  $F_{\text{ПТО}}$  и внутренней сепарацией.





## Особенности конструкционных схем ПГ с водой под давлением

- В России применяются горизонтальные ПГ с внутренними коллекторами.
- За рубежом – вертикальные ПГ с погруженной поверхностью ТО и трубными досками.
- Горизонтальные ПГ имеют предел единичной мощности.
- Применение трубок меньшей толщины повысит интенсивность ТО, уменьшить температурный напор и увеличить давление пара.
- Применение выделенного ЭКО позволит увеличить тепловую мощность ПГ (проект для ПГВ-1600)

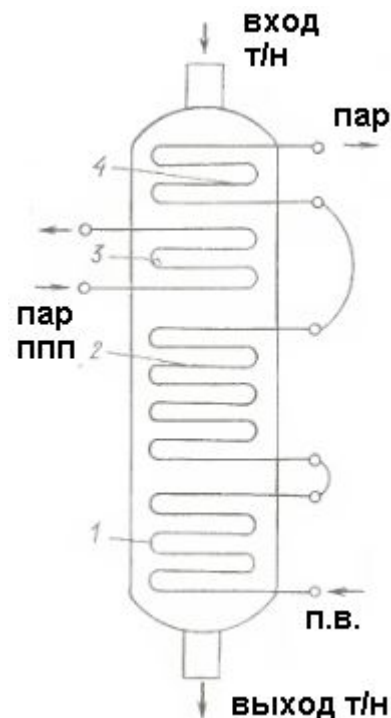
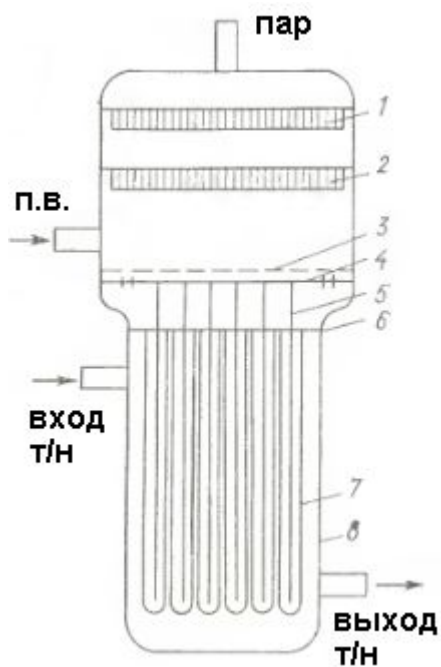


## Параметры пара ПГ, обогреваемых жидкими металлами

- Высокотемпературный т/носитель, максимальная  $T$  на выходе из реактора (550-600°C) определяется
  - необходимостью обеспечения надежной работы оболочек твэл при 600-800°C
  - и получением пара высоких параметров
- Из-за низкой  $C_p$  для уменьшения  $G_1 \rightarrow \Delta t_1$  ( $Q = G_1 C_p \Delta t_1$ ).  
 $\Delta t_1 = 150-200^\circ\text{C}$ . На блоке БН-600  $\Delta t_1 = 170$  и  $200^\circ\text{C}$  (1 контур: 550 – 380, пром. контур: 520 – 320°C)
- Дополнительный контур и пром. теплообменник снижают параметры пара, поэтому стремятся уменьшить температурный напор (до 10-20°C)
- ПГ на ж/м т/н вырабатывают перегретый пар с параметрами 13-16 МПа и 500 – 510°C
- Выработка пара СКД проблематична – проблема металлов, работающих одновременно с жидким металлом и при высоких давлениях

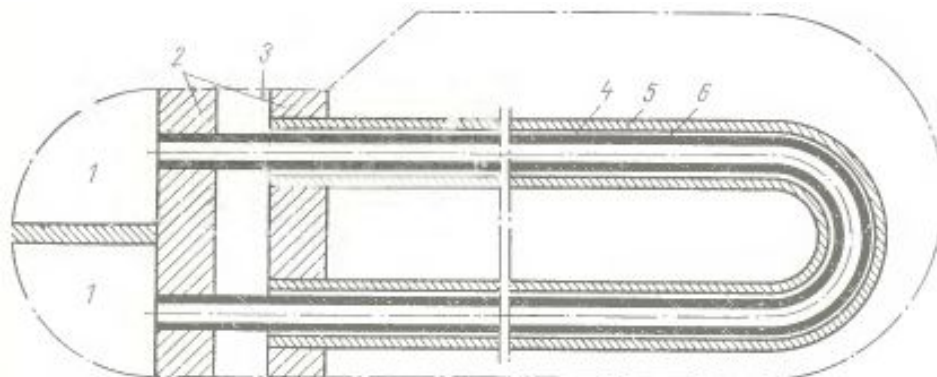
## Схемы ПГ, обогреваемых жидкими металлами

- Охлаждение теплоносителя большое,  $t'_1$  высокая - ПГ всегда
- если  $t''_1 < t_{2s}$  - обязателен отдельный ЭКО, иначе м.б. совмещен с ИСП
- $R_{т/н}$  много меньше  $R_{р.т}$  : водотрубная конструкция (вода - по трубкам) - это позволяет выполнить любую компоновку элементов.
- Водотрубная конструкция позволяет использовать любую схему организации движения р.т. (от ЕЦ до прямоточной - предпочтительнее)



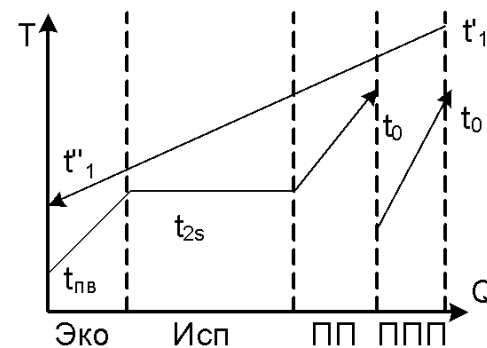
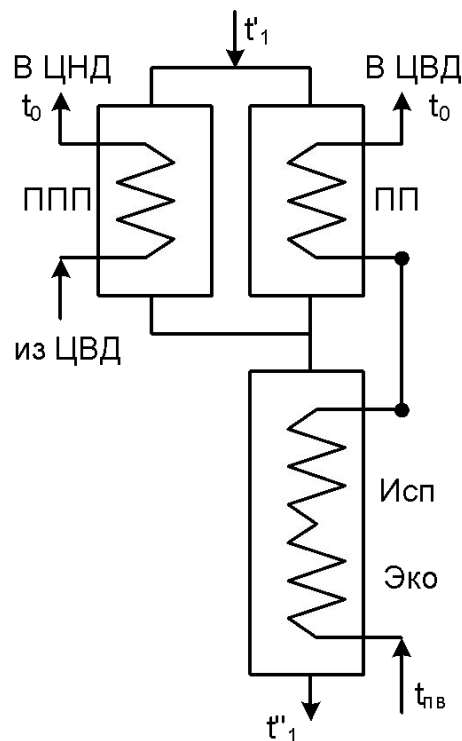
## Схемы ПГ, обогреваемых жидкими металлами

- Высокие температуры и высокие коэф-ты теплоотдачи усложняют проблему температурных напряжений. Первые ПГ выполнялись с обратными элементами (трубками Фильда) или змеевиковыми поверхностями.
- Для контроля утечек - многослойные трубки с индикаторами протечек. Кольцевой зазор (4) соединен с камерой индикатора протечек (3). В зазоре индикатор – ртуть или гелий (вещество с хорошими теплопроводными свойствами). При аварии изменяется давление или хим. состав.
- За период эксплуатации БН-600 было 27 аварий с потерей плотности. Все – без последствий.



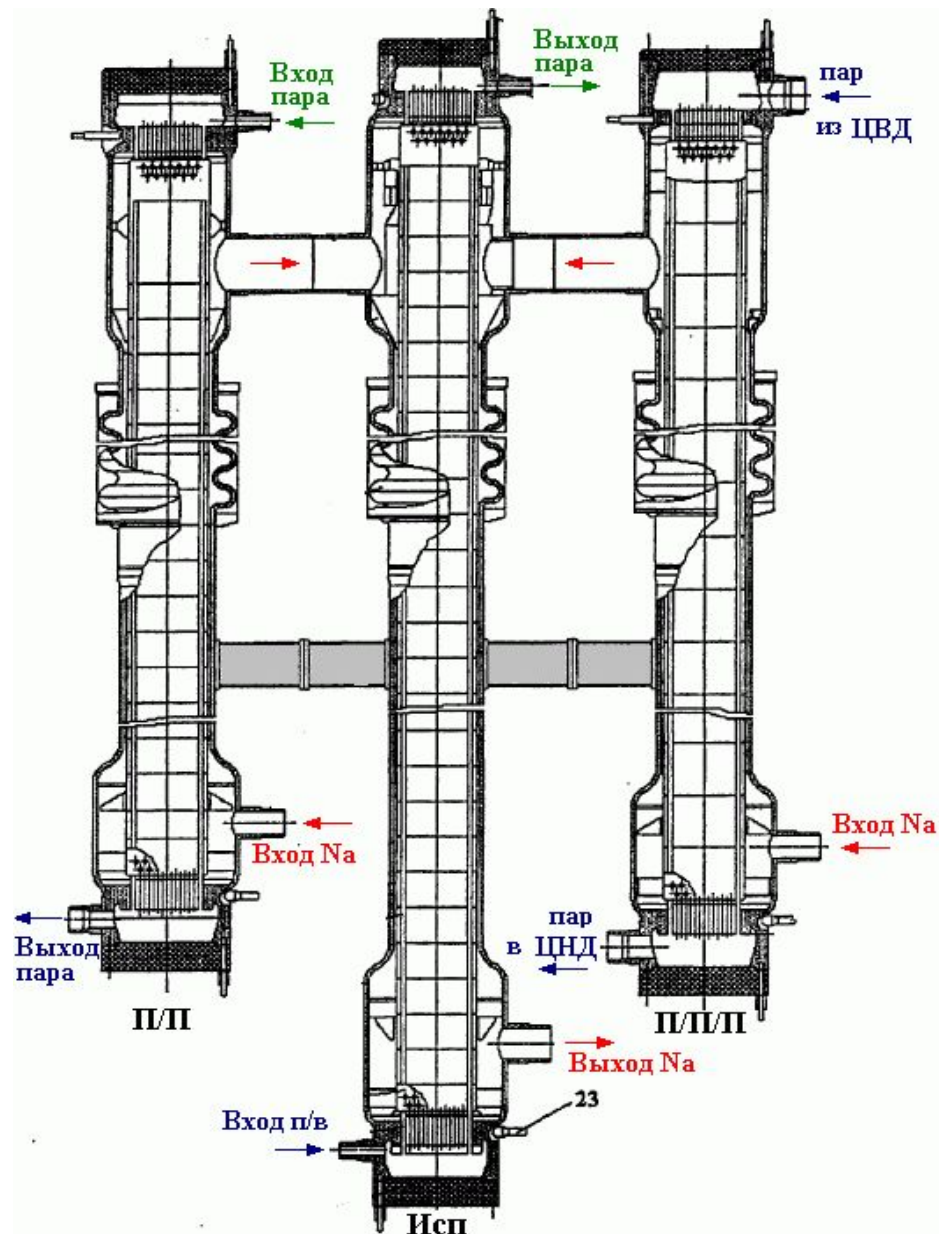
## Схемы ПГ, обогреваемых жидкими металлами

- БН-350 и БОР-60 - двухкорпусные, в первом корпусе – ЭКО и испаритель, во втором – ПП. Трубки – змеевиковые.
- ПГ для БН-350 с естественной циркуляцией, ПГ для БН-600 - по прямоточной схеме.
- ПГ для БН-600 по секционно-модульной компоновке (ПГ-200М). Возможность ремонта и замены секций.
- В каждом ПГ – 8 параллельно включенных секций. В каждой секции 3 модуля: испаритель, ПП и ППП. Объединены по натрию, пару и воде. Каждая секция – прямоточный ПГ.

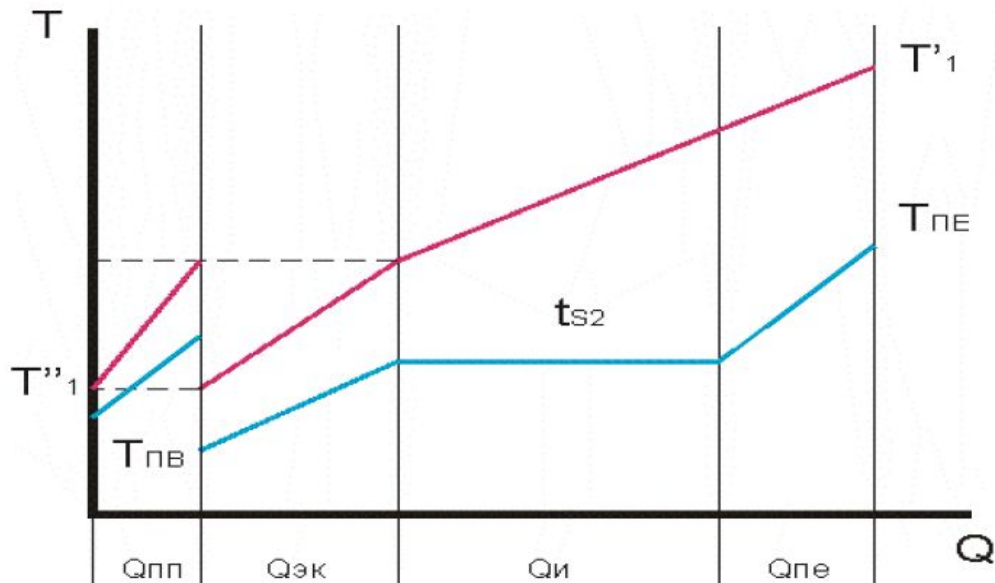
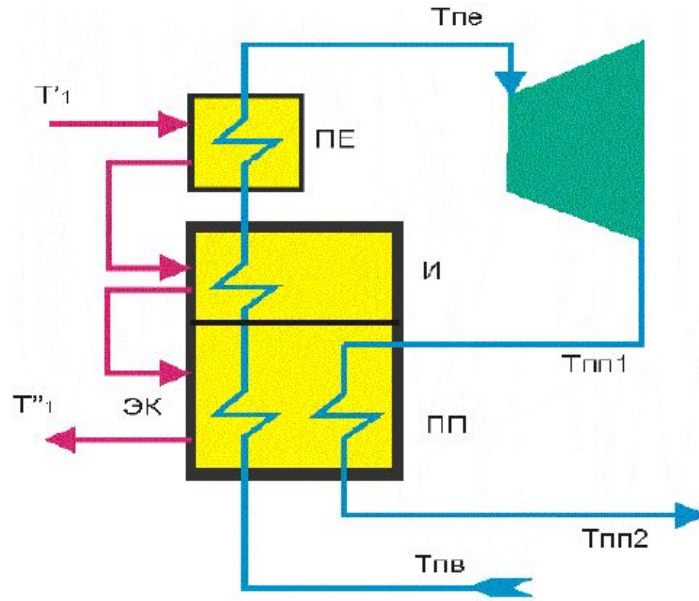


## Схемы ПГ, обогреваемых жидкими металлами

- Модули – вертикальные теплообменники с прямыми трубками. Трубки испарителя и п/п имеют диаметр 16 x 2.5 мм, а п/п/п – 25 x 2.5 мм.
- Испаритель ПГ сделан из стали 10Х2М, а пароперегреватели – из аустенитной хромоникелевой стали.
- Компенсация температурных удлинений корпуса – с помощью линзовых компенсаторов.
- Длина модуля составляет 16 метров (при длине трубок – 15 м), диаметр – около 820 мм.
- Пит. вода входит с  $t=240^{\circ}\text{C}$ .
- На выходе из испарителя – слабоперегретый пар (на  $20-25^{\circ}\text{C}$ )
- На выходе из ПП – пар с  $t=505^{\circ}\text{C}$
- Конструкция ПГ для БН-800 похожа, но без П/П/П – для повышения надёжности.



### Схемы ПГ, обогреваемых жидкими металлами



## Параметры пара ПГ, обогреваемых газообразными теплоносителями

- Газовые теплоносители - высокотемпературные
- $t'_1$  зависит от вида топлива (природный или обогащенный уран), материала покрытия твэлов (магниевый сплав, сталь) и рабочего давления газа
  - природный уран и оболочка твэлов с покрытием из магниевых сплавов дают температуру на поверхности твэлов 420 - 450°C. Если теплоноситель - углекислый газ с  $P$  до 2,0 МПа, то  $t'_1 = 350-400$  °С. – 1 поколение АЭС
  - обогащенное топливо в виде двуокиси урана, стальные оболочки и давление до 5 МПа позволяют иметь  $t'_1 = 550-600$  °С при  $t$  оболочек до 800° С – второе поколение АЭС
  - переход на гелий при этих условиях позволит иметь  $t'_1 = 700$  °С и выше
  - применение гелия более высокого давления и кермитов -  $t'_1$  до 850 °С
- Из-за низких ТФС очень большие расходы теплоносителя, поэтому выгодно иметь большие теплоперепады 200-400°C
- Высокая  $t$  теплоносителя позволяет иметь любые параметры пара
- Для АЭС первого поколения – перегретый пар с  $P=4-6$  МПа и  $t$  до 410°C. Применялись схемы двух давлений
- АЭС второго поколения – перегретый пар с  $P=16,3$  МПа и 565°C



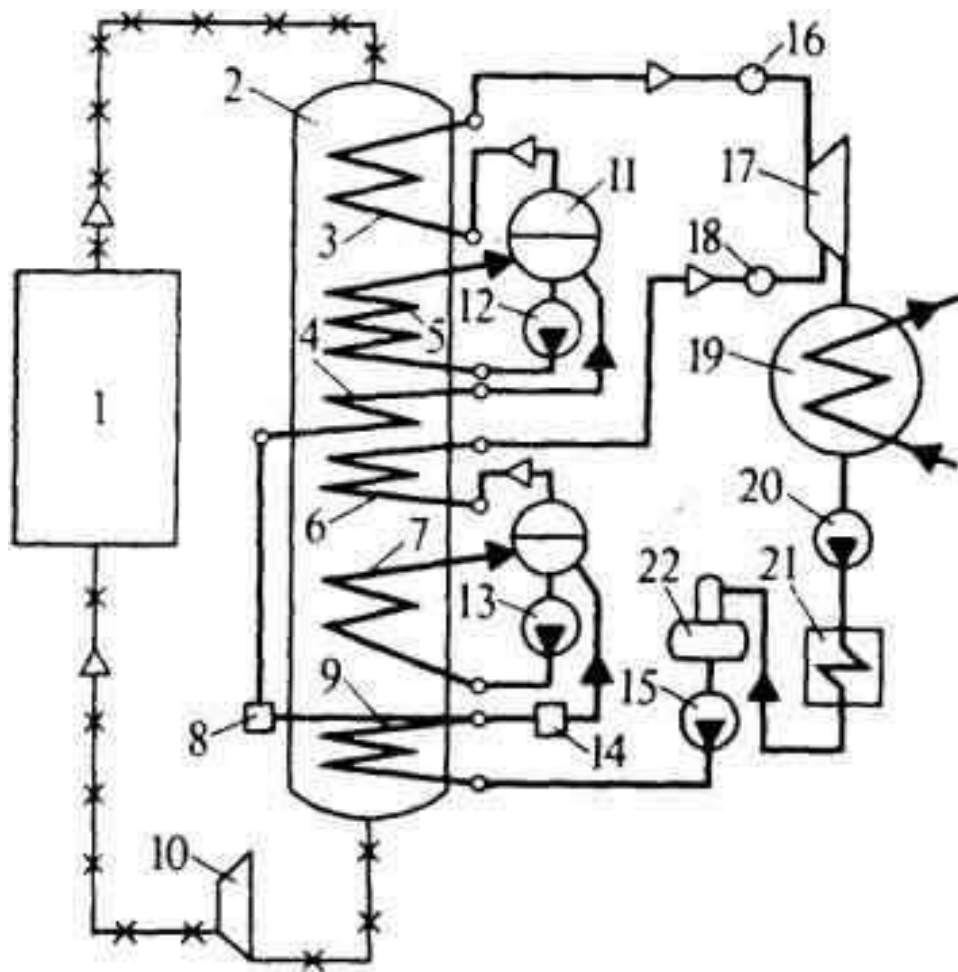
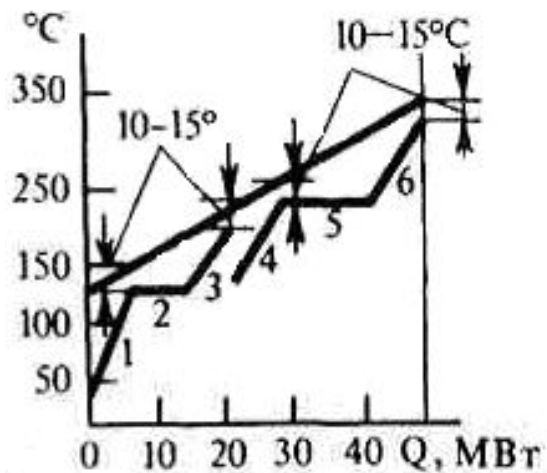


схема двух давлений

- 1 - реактор;
- 2 - ПГ;
- 3 - ПП высокого давления (ВД);
- 4 - экономайзер второй ступени ВД;
- 5 - испаритель ВД;
- 6 - ПП низкого давления (НД);
- 7 - испаритель НД;
- 8 - регулирующий клапан питания ВД;
- 9 - экономайзер ВД (общий);
- 10 - газодувка;
- 11 - барабан-сепаратор ВД;
- 12 - циркуляционный насос ВД;
- 13 - циркуляционный насос НД;
- 14 — регулирующий клапан питания НД;
- 15 — питательный насос;
- 16 — паровой коллектор ВД;
- 17 — паровая турбина;
- 18 — паровой коллектор НД;
- 19 — конденсатор;
- 20 — конденсатный насос;
- 22 — вакуумный деаэратор

## Параметры пара ПГ, обогреваемых газообразными теплоносителями



- 1 – ЭКО ВД (общая часть)
- 2 – Испаритель НД
- 3 – ПП НД
- 4 – ЭКО вторая часть (ВД)
- 5 – испаритель ВД
- 6 – ПП НД