# План лекции Конструкционные схемы и параметры ПГ с различными теплоносителями

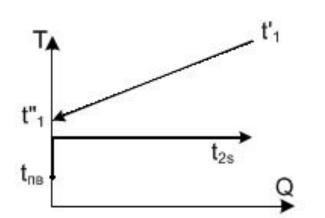
- Конструкционные схемы
- Особенности схем с водным теплоносителем
  - Параметры пара ПГ, обогреваемых водой под давлением
- Конструкционные схемы ПГ с жидкометаллическим теплоносителем
  - Параметры пара ПГ, обогреваемых жидкими металлами
- Конструкционные схемы ПГ с газообразными теплоносителем
  -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

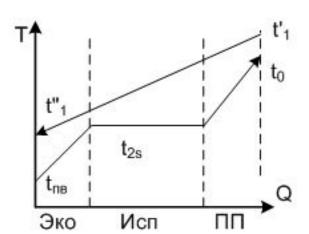
## Конструкционные схемы ПГ

- 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

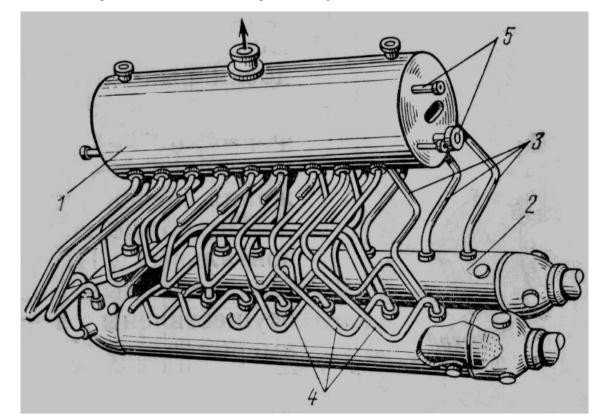
- Компоновка элементов ПГ:
  - пароперегреватель отдельно
  - ЭКО и испаритель совместно или раздельно
- Отдельный ЭКО имеет малую F<sub>пто</sub> (тепловые потоки малы, интенсивность т/о высокая). Выполняется по простой схеме
- При объединении ЭКО и испарителя 2 варианта:
  - поверхность т/о эко обособлена 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  $t''_1 < t_{2s}$





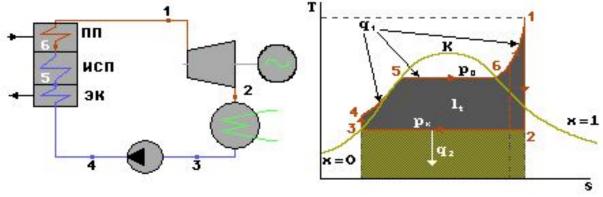
# Конструкционные схемы ПГ

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

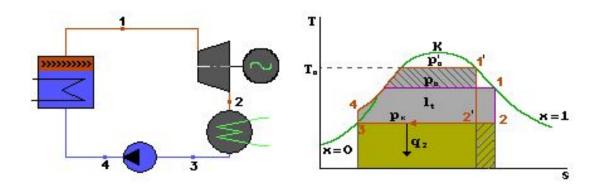


## Влияние параметров пара на экономичность

- С ростом  $T_0$  и  $P_0$  экономичность цикла растет: КПД =  $(T_0 T_K)/T_0$
- Для перегретого пара рост Т возможен при постоянном Р. И всегда ведет к росту КПД
- Ограничение по жаропрочности материалов (545-555°C)

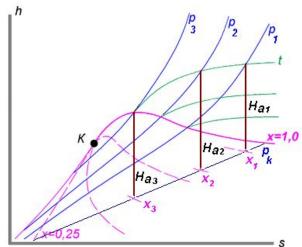


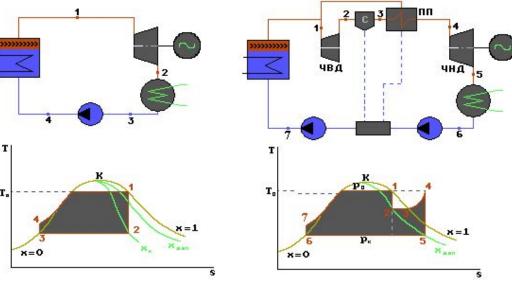
Для насыщенного пара рост Т связан с ростом Р
 И влияние давления на КПД неоднозначно: (рост до 165 бар)



## Влияние параметров пара на экономичность

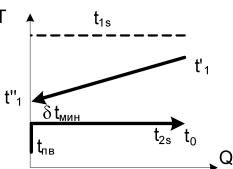
- Влияние начального давления неоднозначно даже для перегретого пара. При одной и той же  $T_{o}$  с ростом  $P_{o}$  полезный теплоперепад сначала растет, потом снижается. КПД= $H_{a}/Q_{1}$
- Тепловая экономичность зависит не только от термического КПД, но и от КПД, оценивающих потери в других устройствах.
- С ростом Р<sub>о</sub> увеличивается конечная влажность пара и снижается внутренний относительный КПД
- $x_{KD} = 14\%$
- Необходим ввод в схему промежуточной сепарации и перегрева пара





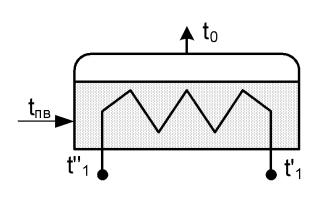
### Параметры пара ПГ, обогреваемых водой под давлением

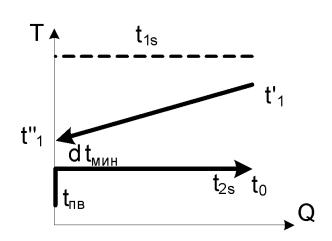
- Температура теплоносителя на выходе из реактора должна быть ниже  $t_{1s}$  (при  $p_1$ ) на величину, гарантирующую исключение парообразования в реакторе. Запас до кипения 20-40°C
- для воды t<sub>кр</sub> = 374,12°C (22,13 МПа)
- давление в 1 контуре для ВВЭР не выше 17 МПа (352°С), значит с учетом запаса до кипения, максимальная  $t'_1 = 330$ °С
- для увеличения параметров пара необходимо иметь в ПГ минимально возможный темп. напор ( $\delta t_{\text{мин}}$ ). В то же время низкий напор ведет к росту поверхности  $F = Q/(k \ \delta t)$ .
- По технико-экономическим обоснованиям δt<sub>мин</sub>=10-20°C
- Поверхность теплообмена большая многопетлевая компоновка
- Макс. давление пара (и  $t_{2s}$ ) зависит не только от  $\delta t_{\text{мин}}$ , но и от  $t_{1\text{исп}}$ . Наибольшее значение её возможно при малом  $\Delta t_1$ .
- Ho Q =  $G_1 \cdot C_p \cdot \Delta t_1$  уменьшение  $\Delta t_1$  ведет к росту  $G_{1_T}$
- Πο т/э расчетам Δt<sub>1</sub>=30-35°C
- В итоге: макс.  $t_{2s} = 330 30 10 = 290$ °C,
- а максимальное давление пара  $= 7-7,5 \ \text{М}$ Па
- Пар насыщенный или слабо перегретый
- Все ПГ с ВВЭР производят насыщенный пар 6,5 МПа



# Особенности конструкционных схем ПГ с водой под давлением

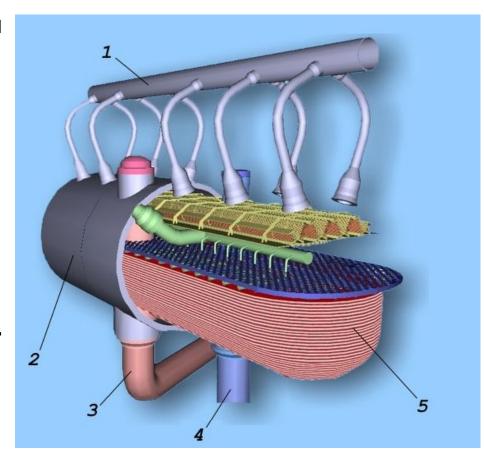
- При максимальных давлениях пара перегрев пара не м.б. больше 30°С.
  Больший перегрев возможен только при снижении давления пара
- Малый перегрев не дает большого выигрыша в КПД, но значительно усложняет конструкцию ПГ.
- Из-за низкого значения  $\Delta t_1$  введение экономайзера не даст большого роста  $\mathbf{t}_{2s}$  и давления, но усложнит конструкцию ПГ, увеличит его габариты.
- Поэтому в тепловой схеме ПГ есть только испаритель. Подогрев п.в. до  $\mathsf{t}_{_{\mathrm{S}}}$  идет за счет конденсации части образующегося пара.
- $P_1 >> P_2$ , поэтому теплоноситель в трубках, рабочее тело в МТП.
- Hauболе удобен вариант с погруженной F<sub>пто</sub> и внутренней сепарацией.





# Особенности конструкционных схем ПГ с водой под давлением

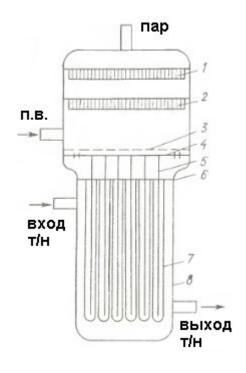
- В России применяются горизонтальные ПГ с внутренними коллекторами.
- За рубежом вертикальные ПГ с погруженной поверхностью ТО и трубными досками.
- Горизонтальные ПГ имеют предел единичной мощности.
- Применение трубок меньшей толщины повысит интенсивность ТО, уменьшить температурный напор и увеличить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

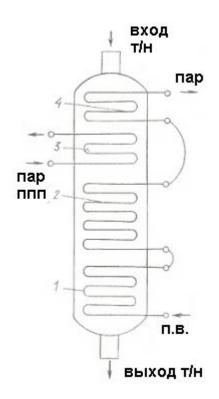


## Параметры пара ПГ, обогреваемых жидкими металлами

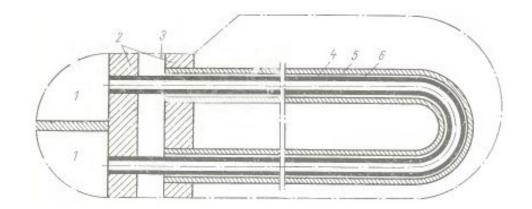
- Высокотемпературный т/носитель, максимальная Т на выходе из реактора (550-600°С) определяется
  - необходимостью обеспечения надежной работы оболочек твэл при 600-800°C
  - и получением пара высоких параметров
- Из-за низкой Ср для уменьшения  $G_1 -> \Box \Delta t_1 (Q = G_1 Cp \Delta t_1)$ .
- $\Delta t_1 = 150\text{-}200$ °C. На блоке БН-600  $\Delta t_1 = 170$  и 200°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°С)
- ПГ на ж/м т/н вырабатывают перегретый пар с параметрами 13-16 МПа и 500 − 510°С
- Выработка пара СКД проблематична проблема металлов, работающих одновременно с жидким металлом и при высоких давлениях

- Охлаждение теплоносителя большое, t'₁ высокая ПП всегда
- если  $t''_1 < t_{2s}$  обязателен отдельный ЭКО, иначе м.б. совмещен с ИСП
- $P_{_{\text{т/н}}}$  много меньше  $P_{_{\text{р.т}}}$ : 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)

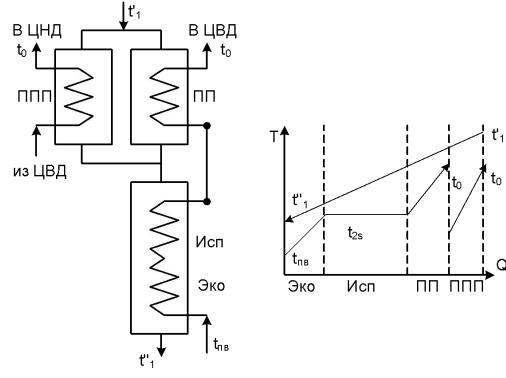




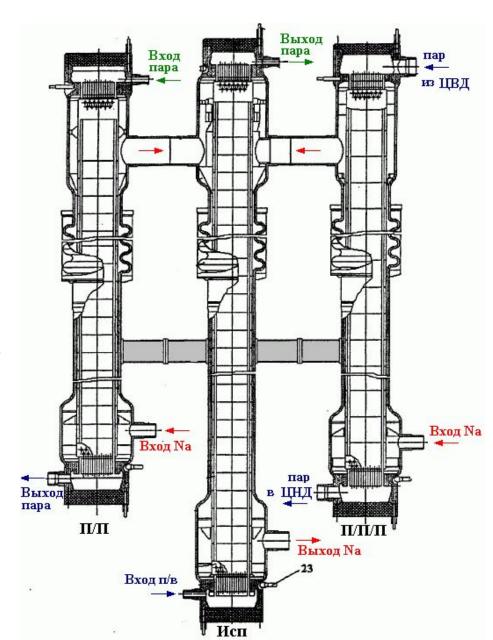
- Высокие температуры и высокие коэф-ты теплоотдачи усложняют проблему температурных напряжений. Первые ПГ выполнялись с обратными элементами (трубками Фильда) или змеевиковыми поверхностями.
- Для контроля утечек многослойные трубки с индикаторами протечек. Кольцевой зазор (4) соединен с камерой индикатора 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.

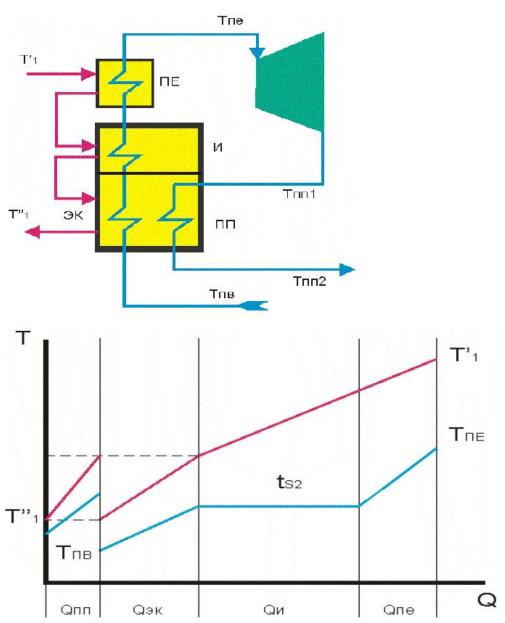


- БН-350 и БОР-60 двухкорпусные, в первом корпусе ЭКО и испаритель, во втором – ПП. Трубки – змеевиковые.
- ПГ для БН-350 с естественной циркуляцией, ПГ для БН-600 по прямоточной схеме.
- ПГ для БН-600 по секционно-модульной компоновке (ПГ-200М). Возможность ремонта и замены секций.
- В каждом ПГ 8 параллельно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



- 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°C.
- На выходе из испарителя слабоперегретый пар (на 20-25°С)
- На выходе из ПП − пар с t=505 °C
- Конструкция ПГ для БН-800 похожа, но без П/П/П – для повышения надёжности.





### Параметры пара ПГ, обогреваемых газообразными теплоносителями

- Газовые теплоносители высокотемпературные
- t'<sub>1</sub> 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°С. Если теплоноситель углекислый газ с Р 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  $\mathbf{t'}_1 = 550\text{-}600$  °C при  $\mathbf{t}$  оболочек до  $800^\circ$  C второе поколение АЭС
  - переход на гелий при этих условиях позволит иметь  $t'_1 = 700$  °C и выше
  - применение гелия более высокого давления и кермитов t¹₁ до 850 °C
- Из-за низких ТФС очень большие расходы теплоносителя, поэтому выгодно иметь большие теплоперепады 200-400°С
- Высокая t теплоносителя позволяет иметь любые параметры пара
- Для АЭС первого поколения перегретый пар с Р-4-6МПа и t до 410°С.
  Применялись схемы двух давлений
- АЭС второго поколения перегретый пар с Р=16,3 МПа и 565°С

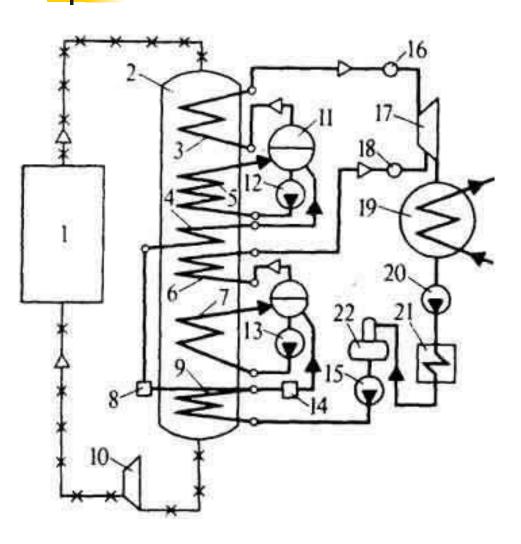
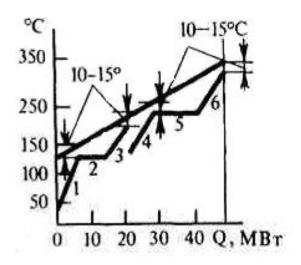


схема двух давлений

- *1* реактор;
- *2* ΠΓ;
- 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