

План лекции

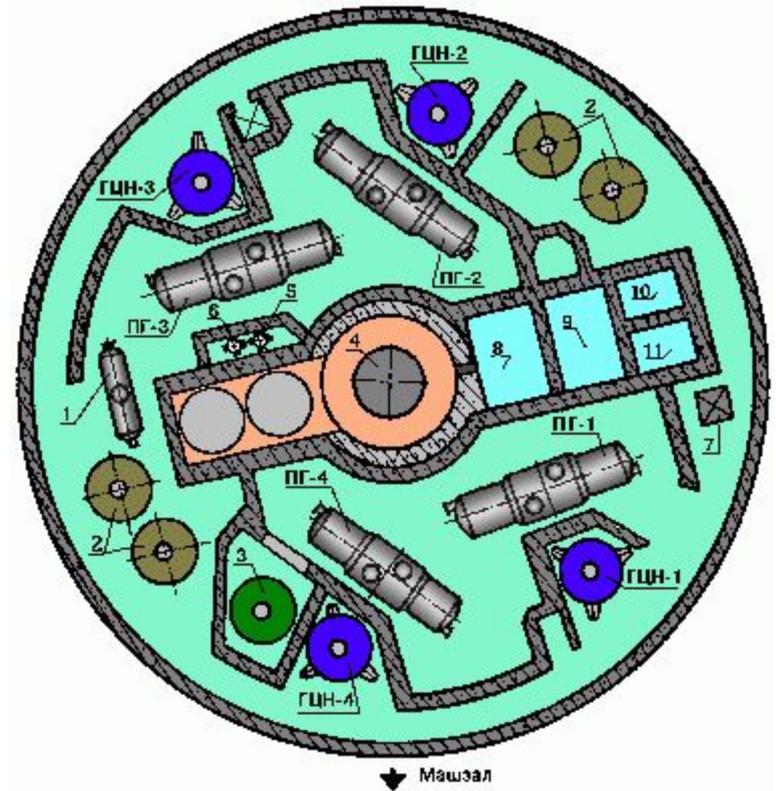
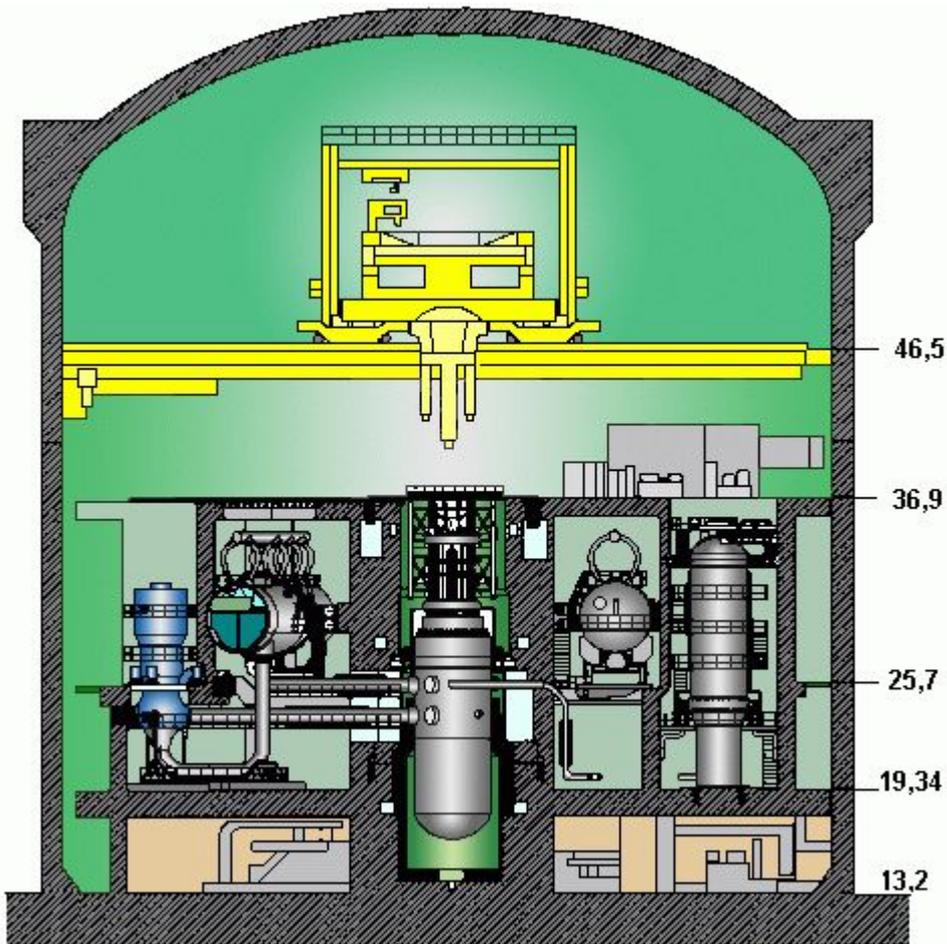
- Понятие парогенератора
- Требования к ПГ
- Общие характеристики и типы ПГ АЭС
- Общие требования к параметрам пара, вырабатываемого ПГ АЭС

Понятие парогенератора

- ПГ – теплообменное устройство, предназначенное для получения пара заданных начальных параметров и в заданном количестве при соблюдении след. требований:
 - необходимое качество пара,
 - надежность и безопасность во всех эксплуатационных режимах,
 - минимизация затрат (конструкционных и эксплуатационных),
 - барьер для перехода радиоактивности в пар.

- ПГ относится к основному оборудованию АЭС (вместе с реактором и турбиной)
- в ПГ всегда две среды: теплоноситель (греющая среда) и рабочее тело (нагреваемый поток, изменяет свое агрегатное состояние)

Размещение парогенератора



Основные характеристики ПГ

- тепловая мощность (МВт),
- паропроизводительность (кг/с), (т/ч),
- параметры генерируемого пара: давление (МПа) и температура ($^{\circ}\text{C}$),
- *температура питательной воды,*
- влажность пара (%)
- расход теплоносителя (кг/с),
- параметры теплоносителя: давление (МПа) и температура на входе и выходе ($^{\circ}\text{C}$),
 - чистота пара (содержание примесей) [мкг-экв/л] ,
 - КПД (98 – 99%)

Основные характеристики ПГ

Показатель	ПГ ВВЭР	ПГ БН-600
тепловая мощность, МВт	750	490
паропроизводительность, кг/с	408	181
давление пара, МПа	6,28	14,2
температура пара, °С	278,5	505
расход теплоносителя, кг/с	3980	1767
давление теплоносителя, МПа	15,7	0,38
температура теплоносителя вход/выход, °С	321/289	520/322

Стоимость 1 ПГ для ВВЭР-1000 – 20 млн. \$ (для АЭС «Белене»)
– конец 2012 года

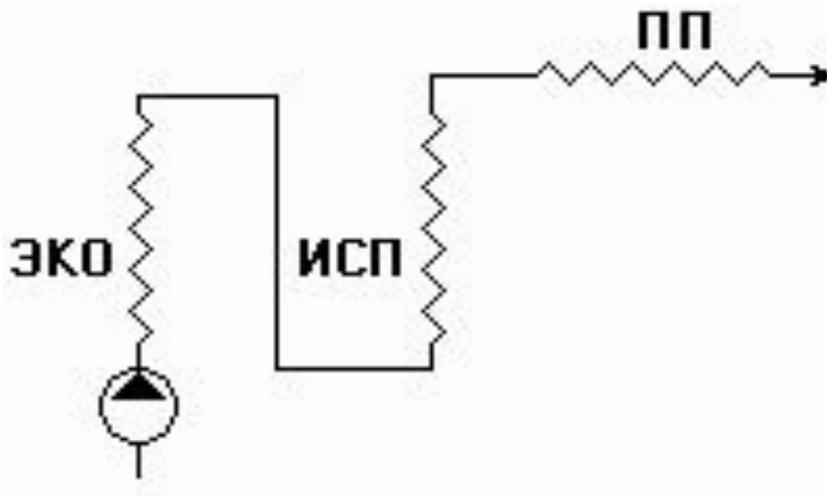
Требования к ПГ

- Схема ПГ и его конструкция должны обеспечить необходимую производительность и заданные параметры пара при любых режимах работы АЭС
- Единичная мощность ПГ должна быть максимально возможной при заданных условиях
- Все элементы ПГ должны обладать безусловной надежностью и абсолютной безопасностью.
- Соединения элементов и деталей ПГ должны обеспечивать плотность, исключаящую возможность перетечек из одного контура в другой
- Конструкция ПГ должна быть простой и компактной, должна обеспечивать удобство монтажа и эксплуатации, возможность обнаружения и ликвидации повреждений, возможность полного опорожнения (дренирования)
- Долговечность (до 60 лет)

Классификация ПГ

- по виду теплоносителя:
 - жидкий,
 - газообразный,
- по составу элементов ПГ:
 - экономайзер,
 - испаритель,
 - пароперегреватель,
- по способу организации движения рабочего тела в испарителе:
 - с естественной циркуляцией,
 - с многократно-принудительной циркуляцией,
 - прямоточные
- по конструктивному исполнению (тип поверхности ТО)

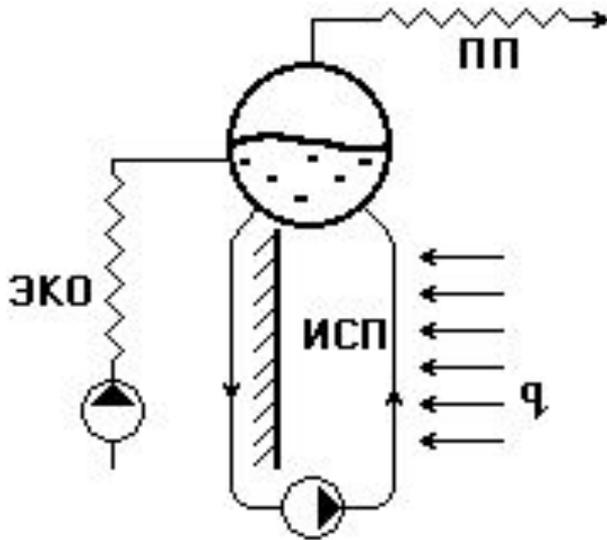
прямоточные ПГ



Однократное
прохождение
рабочего тела
через
поверхность
нагрева

- + простота схемы,
- + небольшая металлоемкость,
- - повышенные требования к качеству воды,

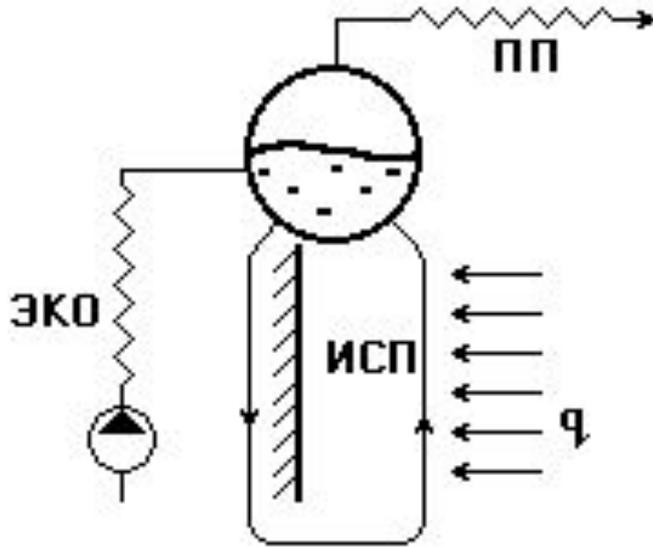
ПГ с многократно-принудительной циркуляцией



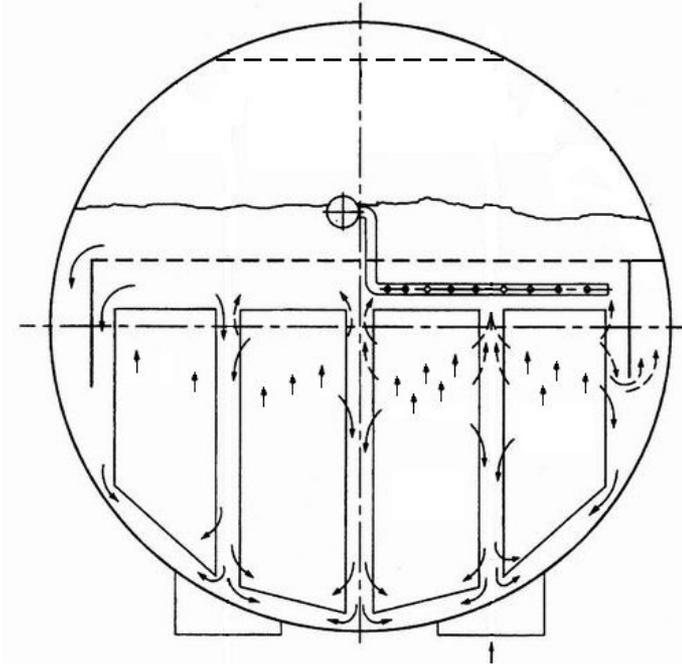
многократное
прохождение
рабочего тела
через
испарительную
поверхность
нагрева

- + удобство эксплуатации,
- + пониженные требования к качеству воды,
- - сложность схемы
- - наличие насоса в трудных условиях

ПГ с естественной циркуляцией



многократное
прохождение
рабочего тела
через
испарительную
поверхность
нагрева



- + удобство эксплуатации,
- + пониженные требования к качеству воды,
- - необходимость обеспечения движущего напора,
- - сложность схемы

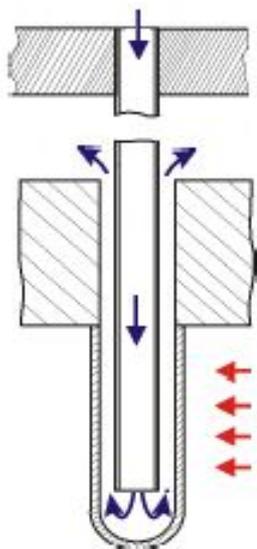
Классификация ПГ по конструктивному исполнению

- по способу омывания теплообменной поверхности
 - прямая схема: теплоноситель – в трубках, рабочее тело – в МТП - (ПГ с ВВЭР),
 - обратная схема: теплоноситель – в МТП, рабочее тело – в трубках – (ПГ с БН);
- по схеме взаимного движения теплоносителя и рабочего тела:
 - противоток,
 - прямоток,
- по расположению корпуса:
 - горизонтальные,
 - вертикальные;
- по компоновке отдельных элементов ПГ:
 - корпусные,
 - секционно-модульные;
- по способу осуществления сепарации пара:
 - внутренняя,
 - внешняя;
- по конфигурации трубного пучка
 - (трубы прямые, U-, V- и S-образные, спиральные, змеевиковые, с прогибом ...)

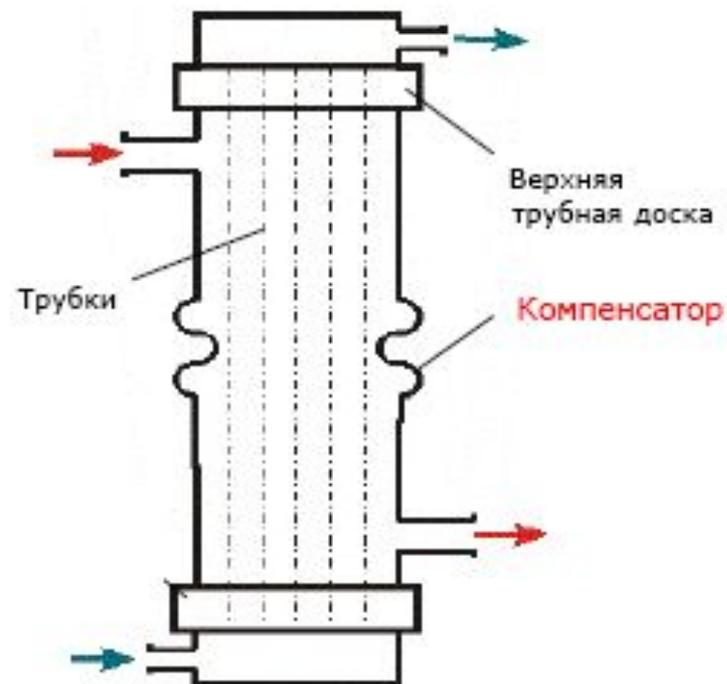
Классификация ПГ по конфигурации трубного пучка

- Принципы:
 - достижение наибольшей компактности,
 - предотвращение температурных напряжений.
- Решения по предотвращению температурных напряжений:
 - самокомпенсация трубок (U-образные трубки, прямые трубки с компенсационным гибом, плоские и спиральные змеевики),
 - компенсаторы корпуса (линзовые компенсаторы),
 - трубки Фильда (обратные элементы),
 - двойные и плавающие трубные доски

Решения по предотвращению температурных напряжений



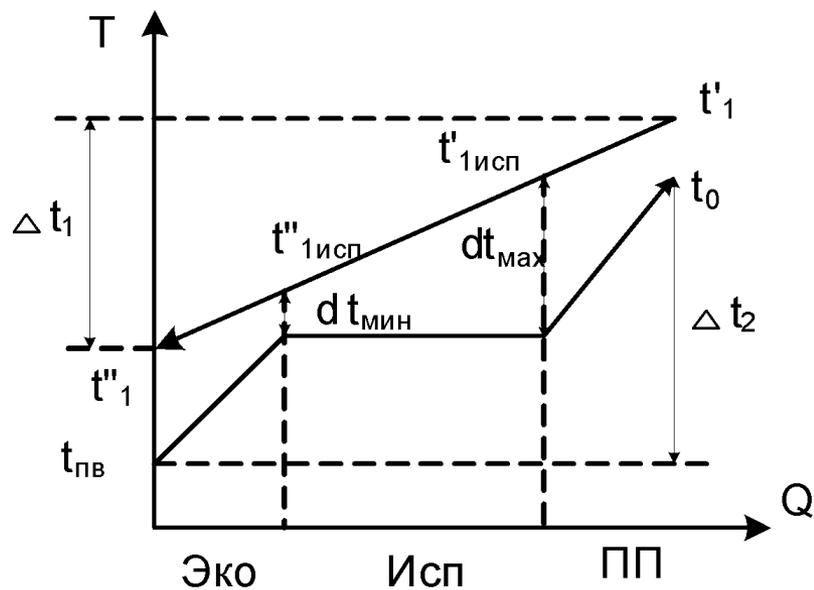
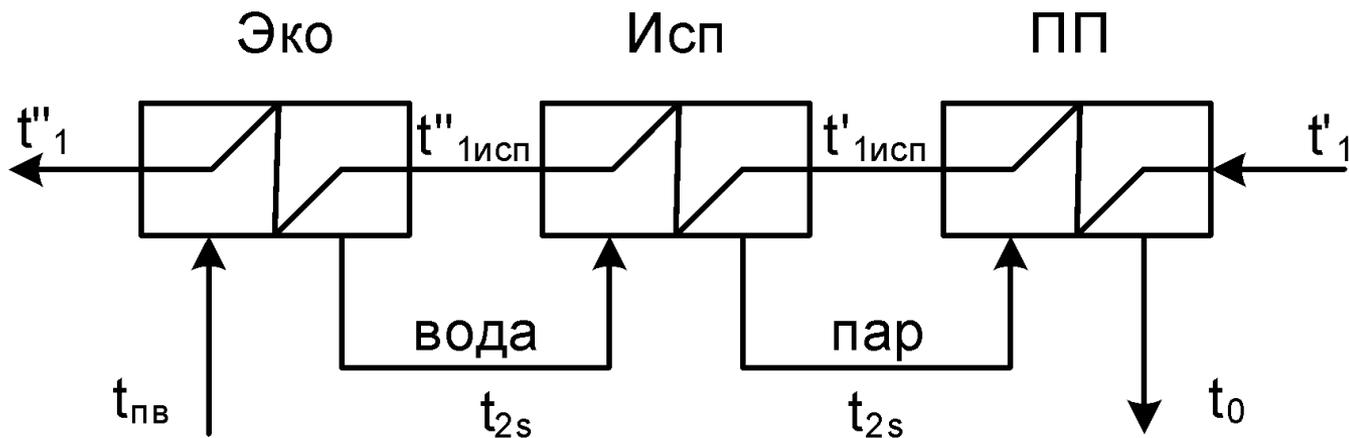
трубка Фильда (наружные и внутренние трубки закреплены только одним концом в разных трубных решетках и могут свободно удлиняться)



линзовый компенсатор



Теплотехническая схема обобщенного ПГ



Параметры пара, вырабатываемого ПГ АЭС

Параметры пара, генерируемого ПГ АЭС определяются:

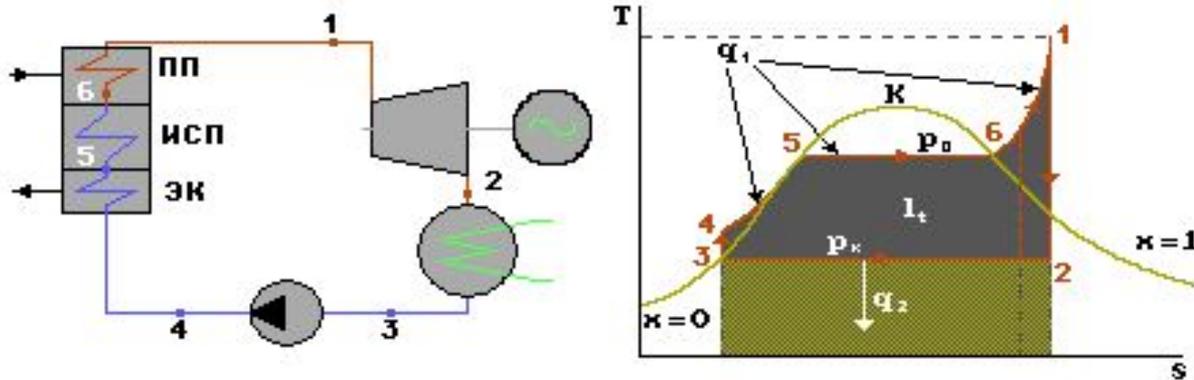
- параметрами теплоносителя на входе в ПГ,
- величиной минимальных температурных напоров между теплоносителем и рабочим телом,
- теплотехнической схемой ПГ.

При выборе параметров нужно:

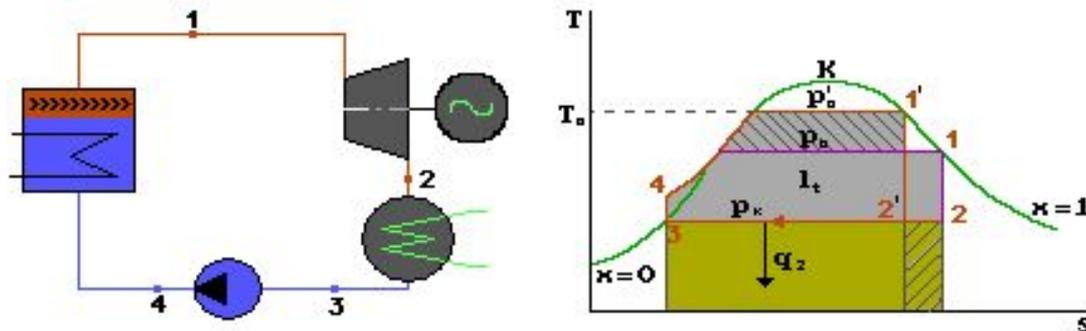
- стремиться к увеличению начальных параметров пара;
- снизить давление и температуру в первом контуре.

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



- Но рост T ограничивается жаропрочностью материалов (545-555°C)
- Для насыщенного пара рост T связан с ростом P , но 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. $\text{КПД} = H_a / Q_1$
- С ростом P_0 увеличивается конечная влажность пара и снижается внутренний относительный КПД
- $\gamma_{\text{кр}} = 14\%$
- Необходим ввод в схему промежуточной сепарации и перегрева пара

