



Оборудование АЭС



Конструкция ПГ АЭС. Основы
конструкторского расчета

План лекции

1. Понятие парогенератора АЭС
2. Требования к ПГ АЭС
3. Общие характеристики ПГ АЭС
4. Классификация ПГ АЭС
5. Основы конструкторского расчета ПГ АЭС

Понятие ПГ АЭС

Парогенератор - теплообменный аппарат, производящий во втором (третьем) контуре нерадиоактивный пар за счет теплоты первичного теплоносителя.

Парогенератор - поверхностный теплообменник, предназначенный для генерации рабочего тела (пара) за счет тепла, вносимого теплоносителем.

Теплоноситель (*первичный теплоноситель*) – среда, отдающая в ПГ тепло.

Рабочее тело (*вторичный теплоноситель*) – среда, принимающая в ПГ тепло и изменяющая свое агрегатное состояние.

Требования к ПГ АЭС

1. ПГ должен производить пар заданных параметров в требуемом количестве при любых режимах работы энергоблока.
2. Все элементы ПГ должны обладать безусловной надежностью и абсолютной безопасностью (герметичность, коррозионно-эрозионные процессы).
3. ПГ должен иметь низкую стоимость изготовления, транспортировки и монтажа (простота, компактность конструкции).
4. Конструкция ПГ должна обеспечивать требуемую долговечность с учетом обслуживания и ремонта.
5. Схема и конструкция ПГ должны обеспечивать высокие экономические показатели.

Интересные факты...

- *Стоимость комплекта ПГ энергоблока ВВЭР-1000 составляет более 30 млн. долларов (в ценах 2003 г.). Стоимость простоя энергоблока в случае отказа ПГ составляет более 300 тыс. долларов в сутки.*
- *Антирекорд. Один из ПГ Южно-Украинской АЭС проработал до замены всего 6900 ч. при расчетном сроке эксплуатации 30 лет.*

Общие характеристики ПГ АЭС

- $Q_{\text{ПГ}}$ - тепловая мощность, МВт.
- D - паропроизводительность, т/ч (кг/с).
- G – расход теплоносителя, т/ч (кг/с).
- p_2, t_2 – параметры пара, МПа, °С.
- p_1, t'_1, t''_1 – параметры теплоносителя, МПа, °С.
- Y – влажность пара на выходе ПГ.

Классификация парогенераторов АЭС

1. По виду теплоносителя.
2. По параметрам генерируемого пара.
3. По составу входящих в ПГ элементов.
4. По способу организации движения рабочего тела в испарителе и экономайзере.
5. По типу поверхности теплообмена.

1. Классификация парогенераторов АЭС по виду теплоносителя

1.1. С жидким теплоносителем (H_2O , Na, Pb).

1.2. С газообразным теплоносителем (He, CO_2).

Примечание. Рабочее тело ВСЕГДА – вода, водяной пар

2. Классификация парогенераторов АЭС по параметрам генерируемого пара

2.1. Парогенераторы насыщенного пара.

2.2. Парогенераторы перегретого пара

3. Классификация парогенераторов АЭС по составу входящих элементов

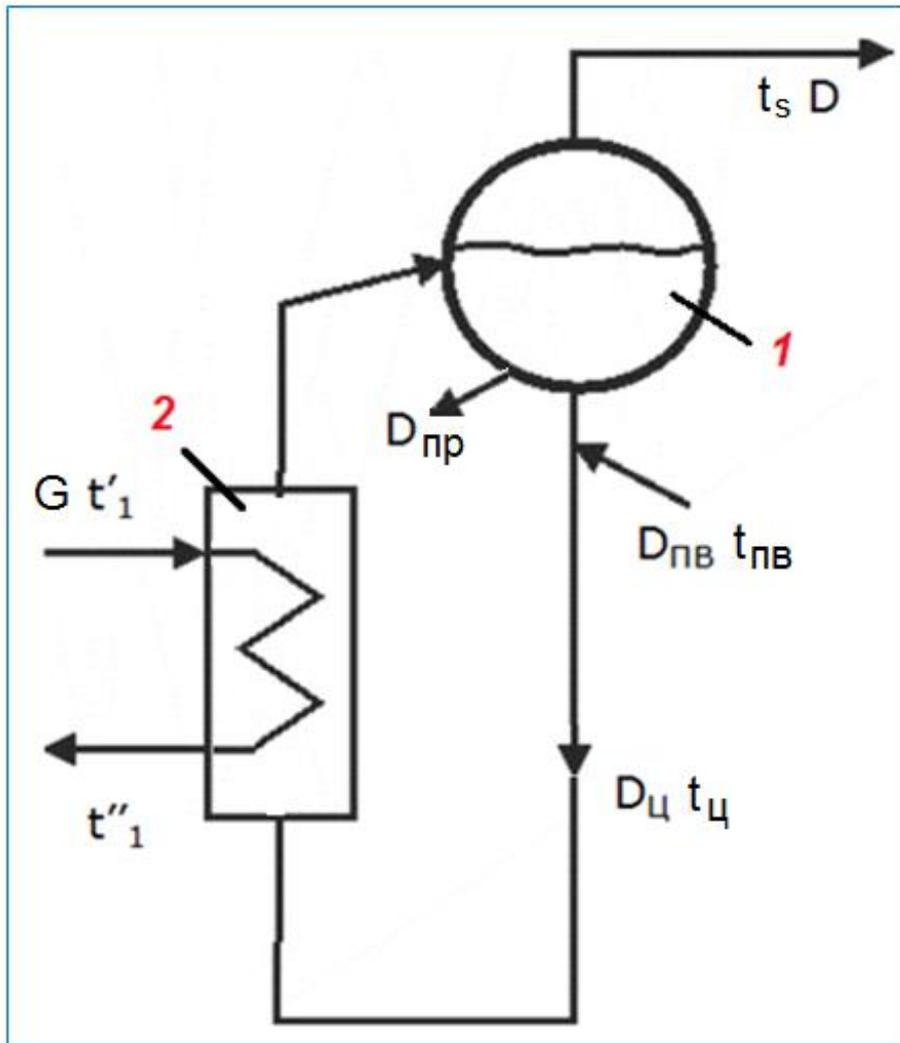
В самом общем случае ПГ может содержать:

- экономайзер Э;
- испаритель И;
- пароперегреватель ПЕ;
- вторичный (промежуточный) пароперегреватель ПП.

4. Классификация ПГ АЭС по способу организации движения рабочего тела **в испарителе** и экономайзере

- ПГ с естественной циркуляцией;
- **ПГ с многократной вынужденной циркуляцией;**
- ПГ прямоточный.

Схема ПГ с естественной циркуляцией (ПГ ЕЦ)



1 – сепарационный объем
(separation volume)

2 – экономайзер-испаритель

D – расход пара

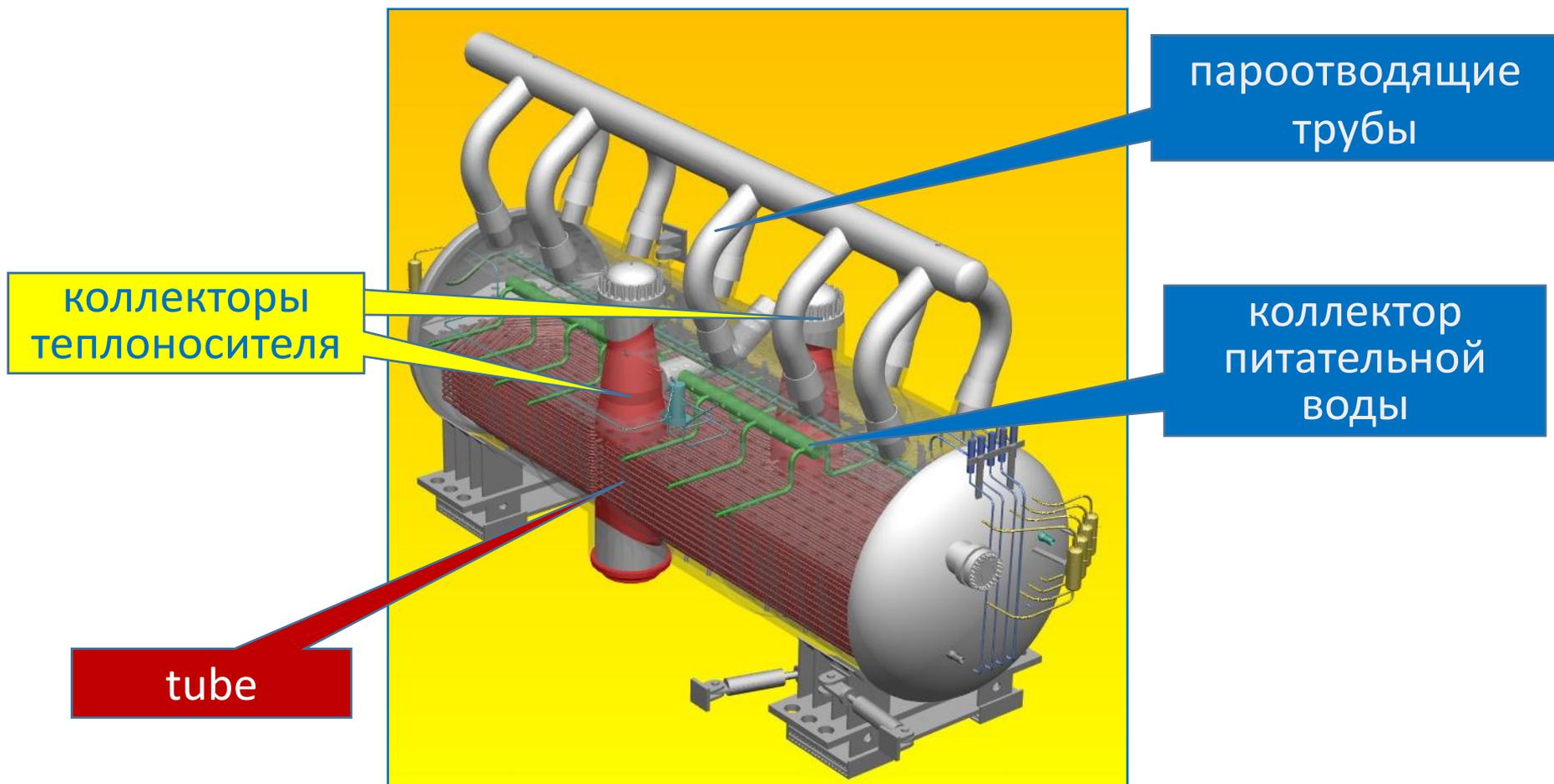
$D_{пв}$ – расход питательной воды

$D_{ц}$ – расход циркуляционной
воды

$D_{пр}$ – расход продувочной
воды

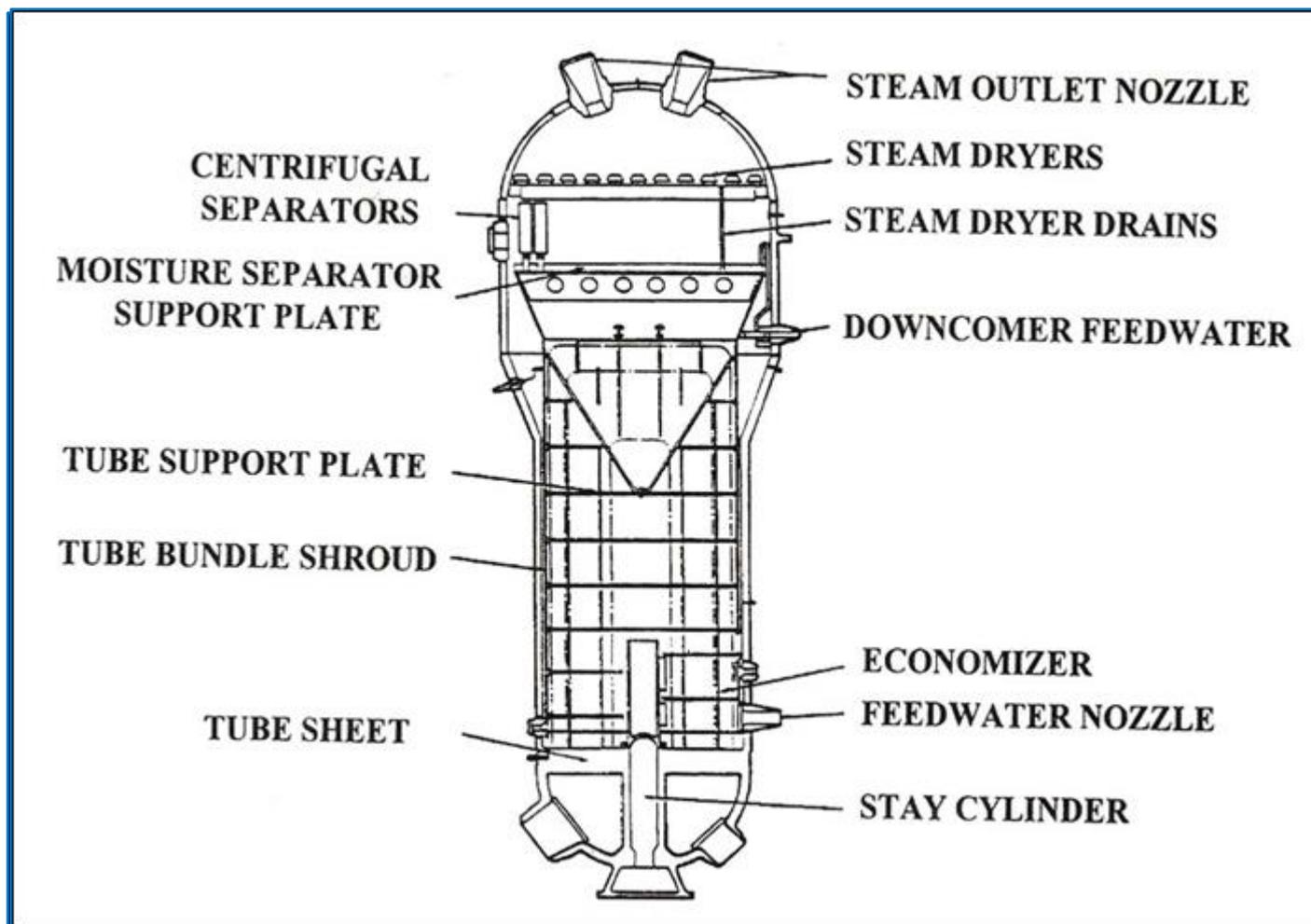
G – расход теплоносителя

Внешний вид ПГ энергоблока ВВЭР



ПГ насыщенного пара, с естественной циркуляцией,
горизонтальный

Внешний вид ПГ энергоблока PWR



ПГ насыщенного пара, с естественной циркуляцией,
вертикальный

Достоинства и недостатки ПГ ЕЦ

- Достоинства

- Удобство эксплуатации
- **Пониженные требования к качеству воды**
- Отсутствие циркуляционных насосов

- Недостатки

- Сложность схемы
- Большая металлоемкость

Достоинства и недостатки ПГ МВЦ

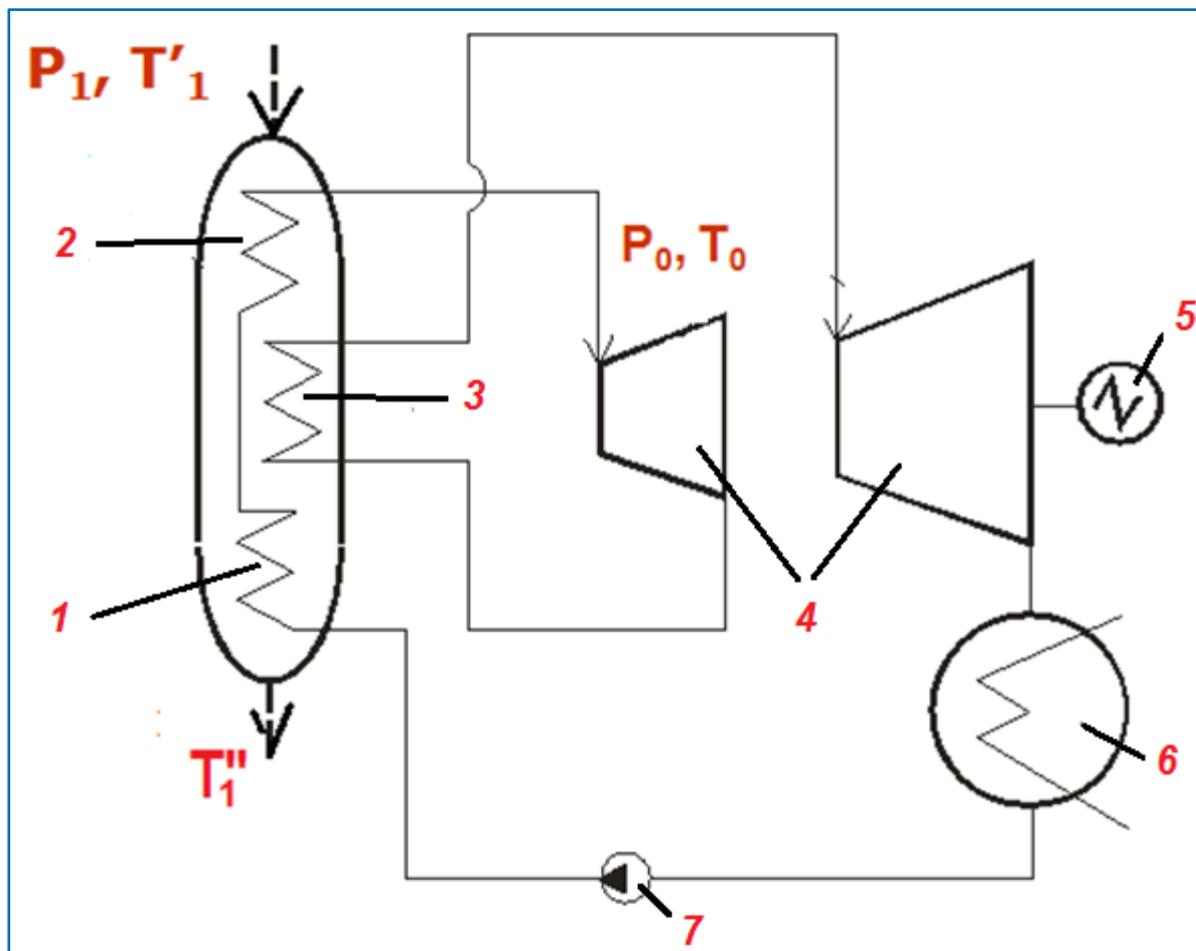
Достоинства

- Удобство эксплуатации.
- Пониженные требования к качеству воды.
- Меньшая материалоемкость (по сравнению с ЕЦ).

Недостатки

- Сложность схемы.
- Большая металлоемкость.
- Наличие циркуляционных насосов.

Схема прямоточного ПГ



Обозначения к схеме прямоточного ПГ

1 – экономайзер+испаритель;

2 - пароперегреватель;

3 - вторичный (промежуточный) пароперегреватель
ПП;

4 – турбина;

5 – электрогенератор;

6 - конденсатор;

7 – питательный насос.

Достоинства и недостатки прямоточных ПГ

Достоинства

- Простота схемы.
- Небольшая металлоемкость.

Недостатки

- Повышенные требования к качеству воды.
- Наличие циркуляционных насосов.

5. Классификация парогенераторов АЭС по типу поверхности теплообмена

- 5.1. По расположению сред (теплоносителя, рабочего тела) в трубках и в межтрубном пространстве
- 5.2. По схеме взаимного движения т/н и р.т.
- 5.3. По конфигурации трубного пучка
- 5.4. По компоновке трубок в трубном пучке и их форме
- 5.5. По способу крепления трубок
- 5.6. По пространственной ориентации корпуса
- 5.7. По компоновке отдельных элементов ПГ
- 5.8. По способу осуществления сепарации пара

4.1. По расположению сред (теплоносителя, рабочего тела) в трубках и в межтрубном пространстве

а) **ПРЯМАЯ схема.** Среда с большим давлением - в трубках, с меньшим – в межтрубном пространстве (МТП).

Пример: ПГ ВВЭР, ПГ БН.

б) **ОБРАТНАЯ схема.** Среда с большим давлением – в МТП, с меньшим – в трубках.

Пример: ПГ ЖМТ типа ОПГ-2.

Достоинства и недостатки ПГ обратного типа

- Достоинства: уменьшение эффекта утечки Na при разгерметизации
- Недостатки: большая металлоемкость, необходимость интенсификации теплообмена со стороны рабочего тела (из-за небольшой скорости в МТП)

4.2. По схеме взаимного движения теплоносителя и рабочего тела

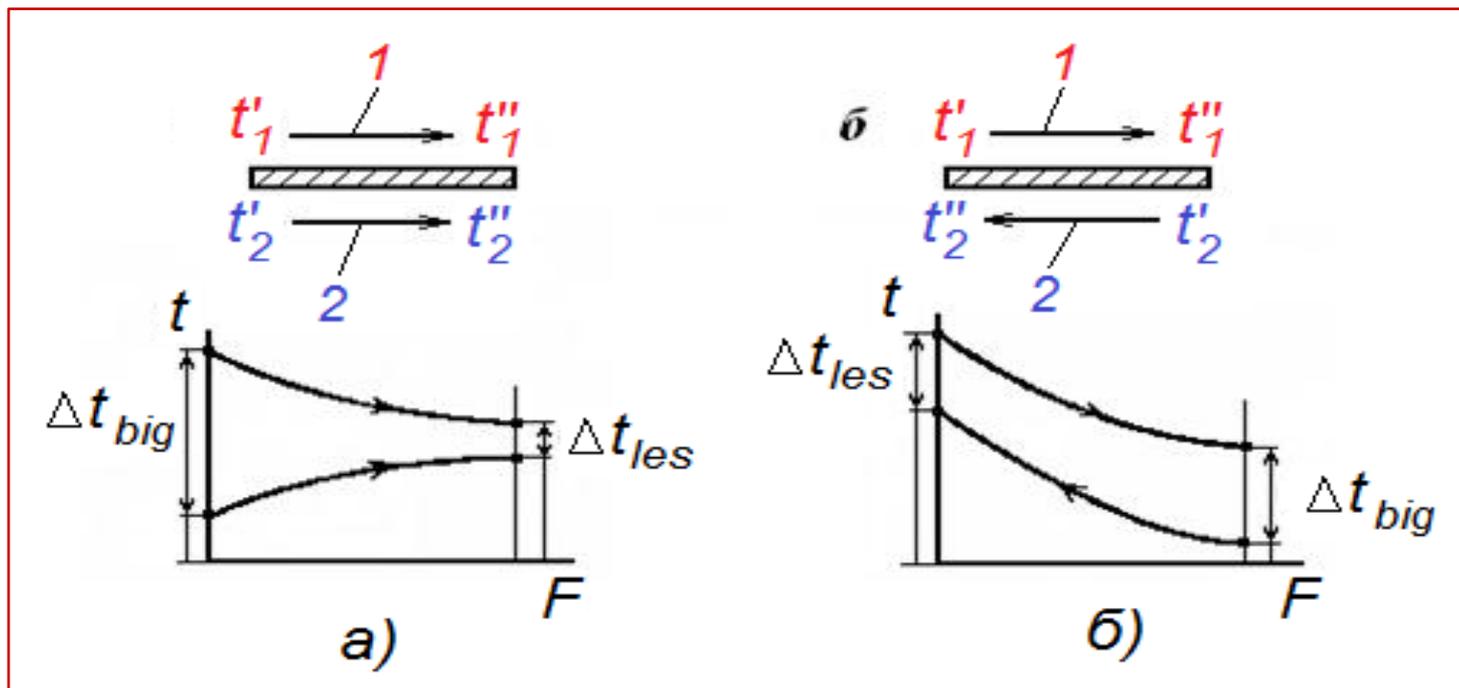
- а) **прямоток** (среды движутся в **одном** направлении);
- б) **противоток** (среды движутся в **противоположных** направлениях);
- в) смешанный ток (с общим перекрестным направлением).

Примечание.

При противотоке средний температурный напор больше, а площадь поверхности теплообмена меньше.

При прямотоке есть возможность ограничить максимальную температуру стенки.

Схемы взаимного движения теплоносителя и рабочего тела



Примечания:

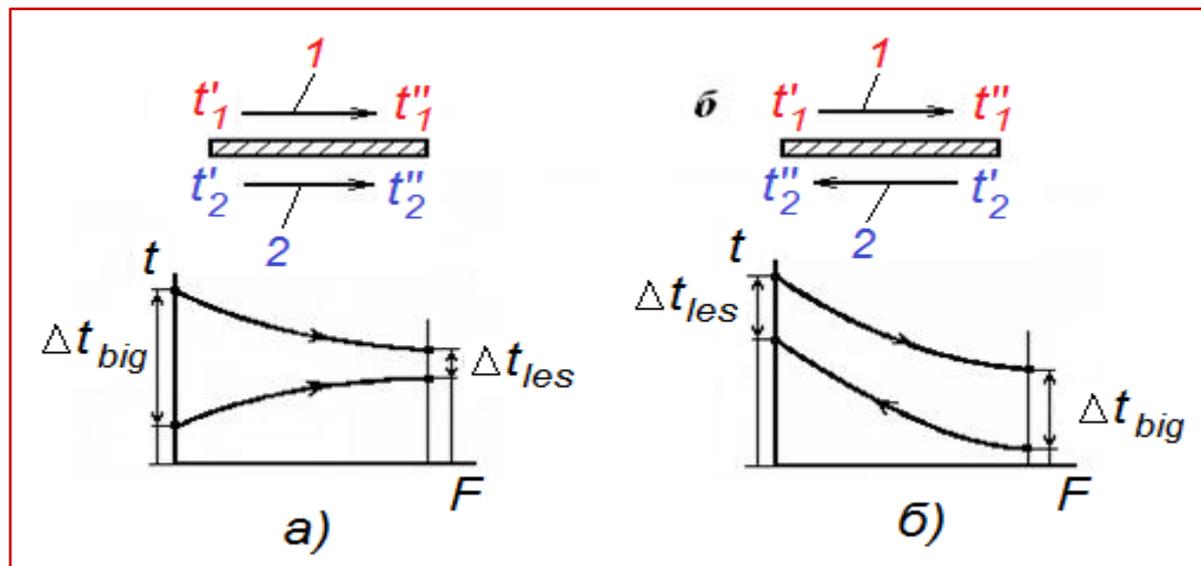
а – прямоток; б – противоток;

1 – теплоноситель; 2 – рабочее тело;

Δt_{big} – большой температурный напор; Δt_{les} – меньший температурный напор;

F – площадь поверхности теплообмена, m^2 .

Схемы взаимного движения теплоносителя и рабочего тела



Примечания:

- ❖ при противотоке (б) средний температурный напор Δt_{mid} больше, а площадь поверхности теплообмена F меньше
- ❖ при прямотоке (а) есть возможность ограничить максимальную температуру стенки

4.3. По конфигурации трубного пучка

Выбирается с учетом двух условий:

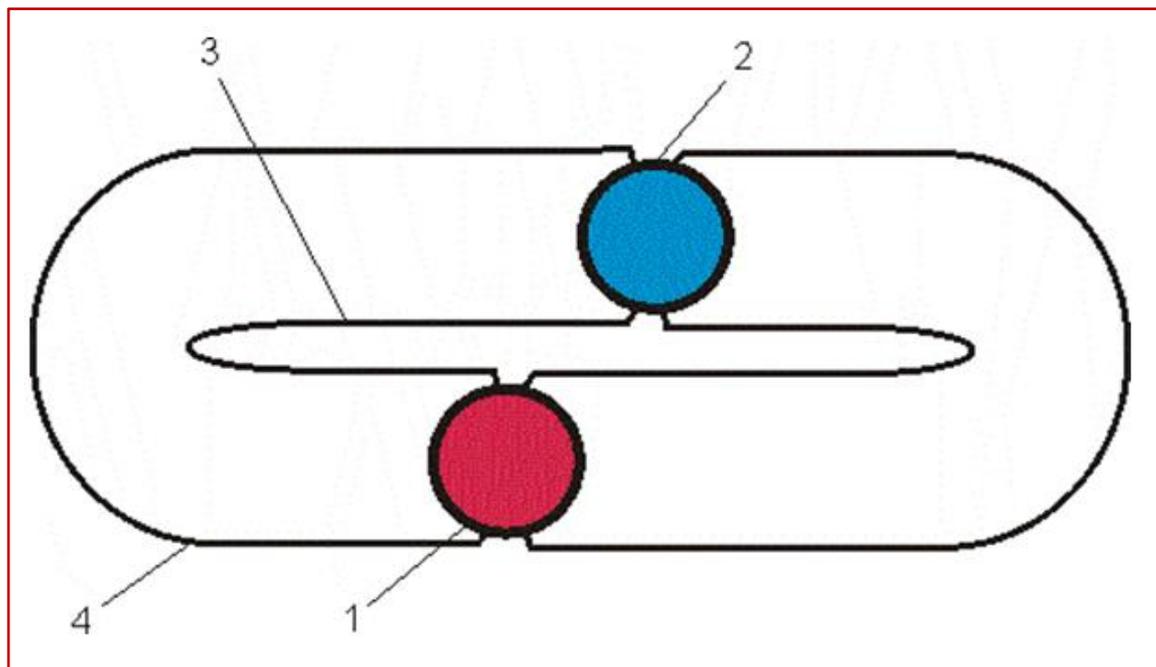
- достижение наибольшей компактности;
- уменьшение температурных напряжений.

Специальные решения по уменьшению температурных напряжений

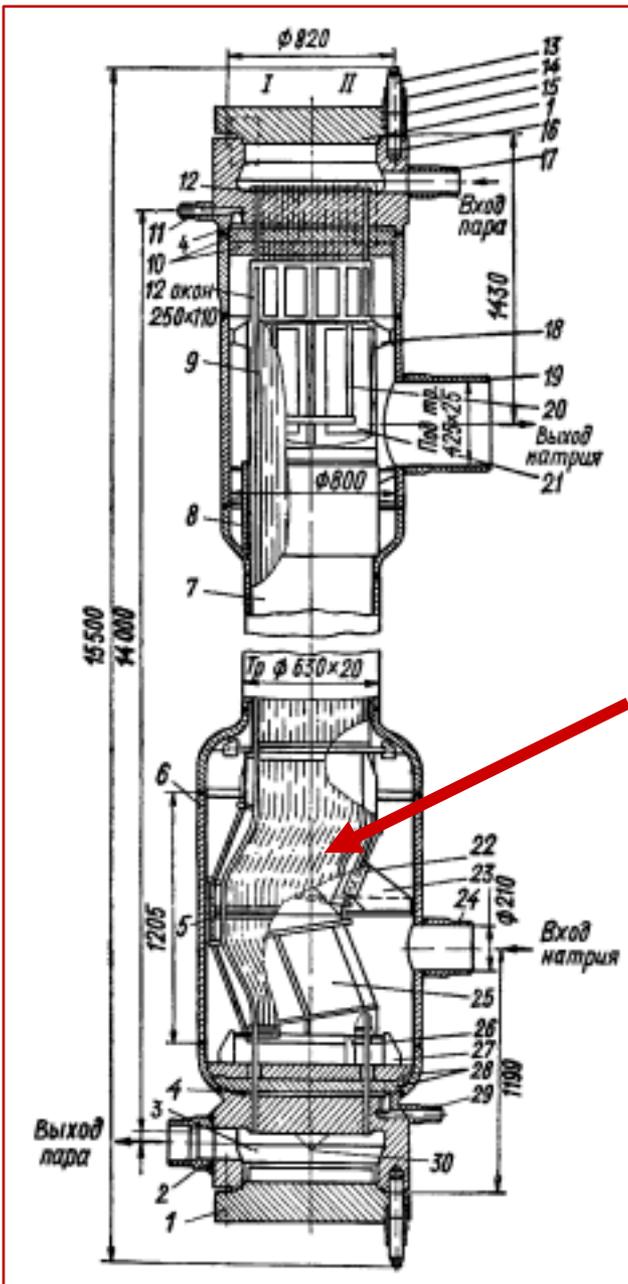
- самокомпенсация;
- специальные компенсаторы на корпусе

Самокомпенсация - за счет изгиба труб

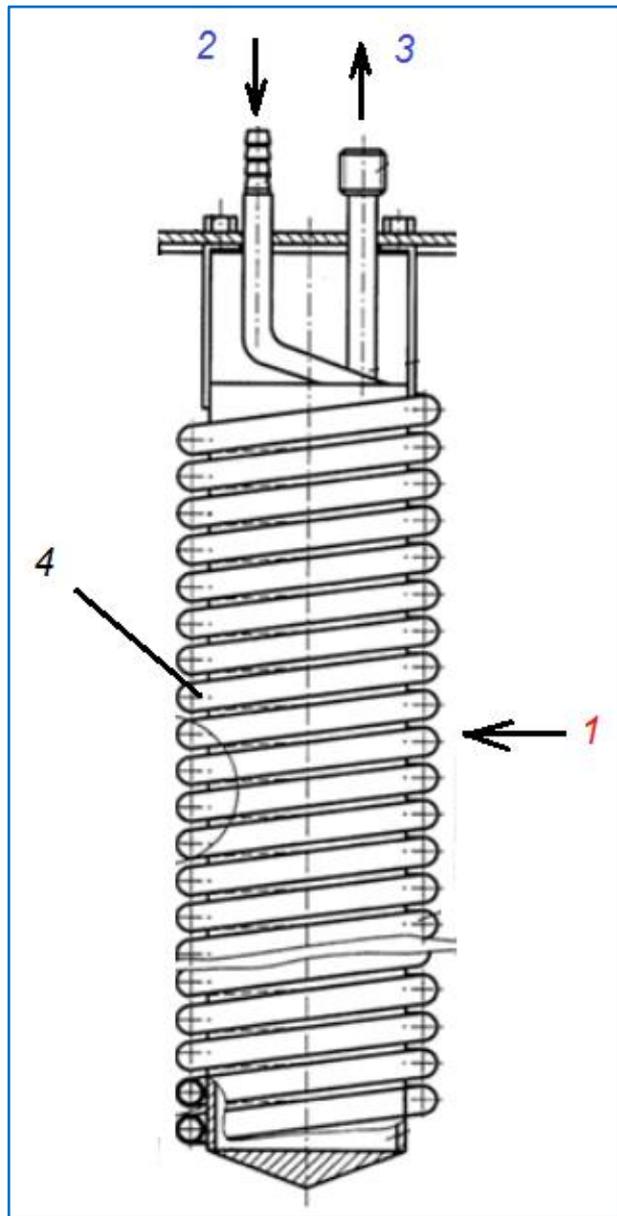
(U-образные трубы поверхности теплообмена горизонтальных ПГ ВВЭР-440, 1000 и др.)



1, 2 – «горячий» и «холодный» коллекторы теплоносителя; 3, 4 – теплообменные трубки



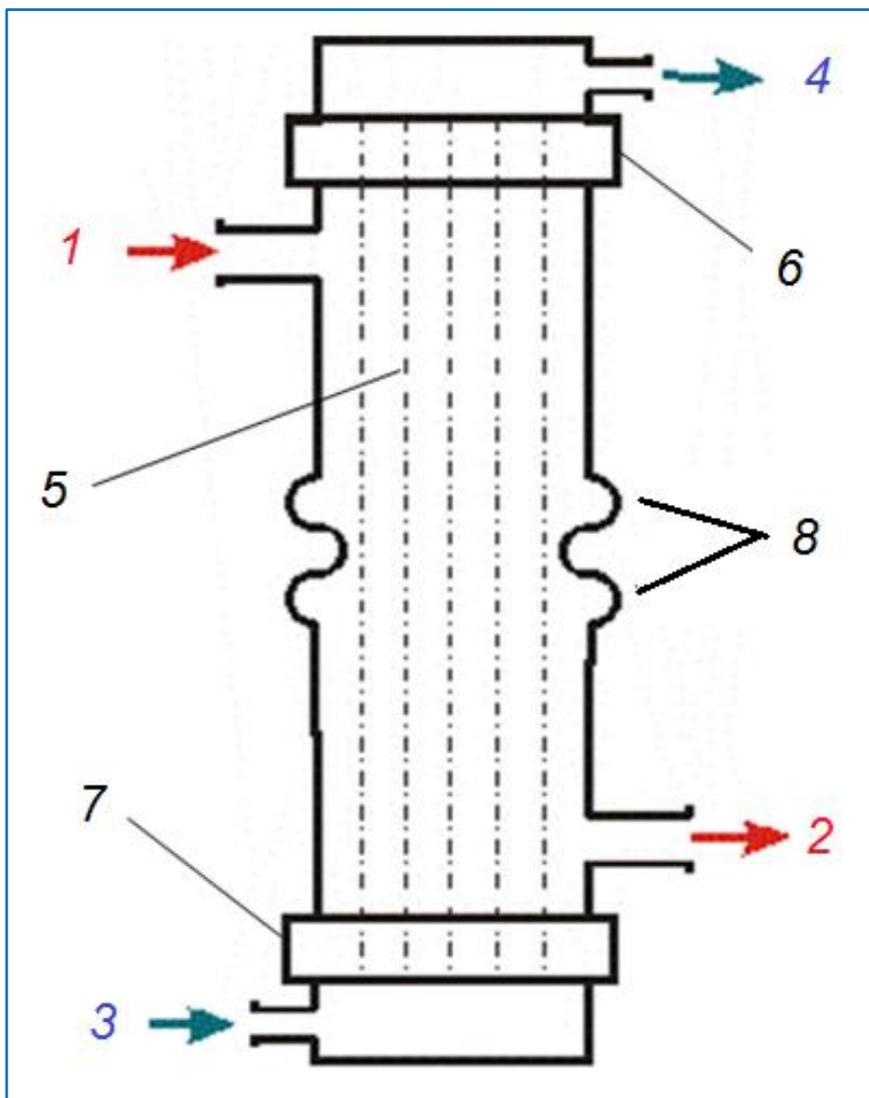
Самокомпенсация - за счет изгиба труб (прямые теплообменные трубы с **компенсационным гибом** в проекте ПГ БН-600)



Самокомпенсация за счет использования плоских и неплоских змеевиков (проекты ПГ с ЖМТ)

- 1 – направление движения теплоносителя;
- 2 – вход рабочего тела;
- 3 – выход рабочего тела;
- 4 – змеевик

Самокомпенсация - за счет специальных компенсаторов на корпусе (модули ПГ ЖМТ блока БН-600)



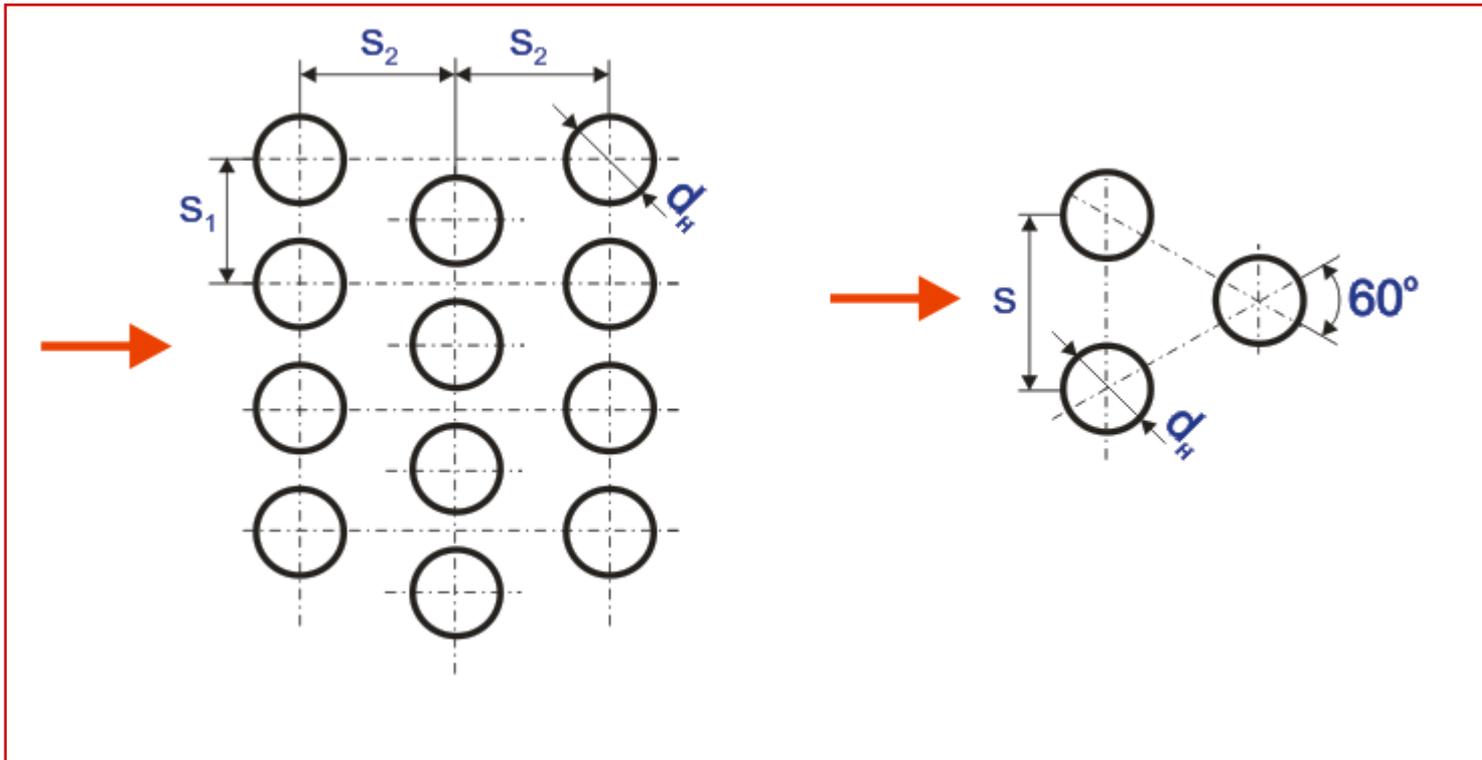
1 – вход теплоносителя;
2- выход теплоносителя;
3 - вход рабочего тела:
4 –выход рабочего тела;
5- теплообменные трубки;
6 – верхняя трубная доска;
7-нижняя трубная доска;
8 –**компенсационный гиб**
на корпусе

4.4. По типу расположения теплообменных труб в трубном пучке

Типы компоновок:

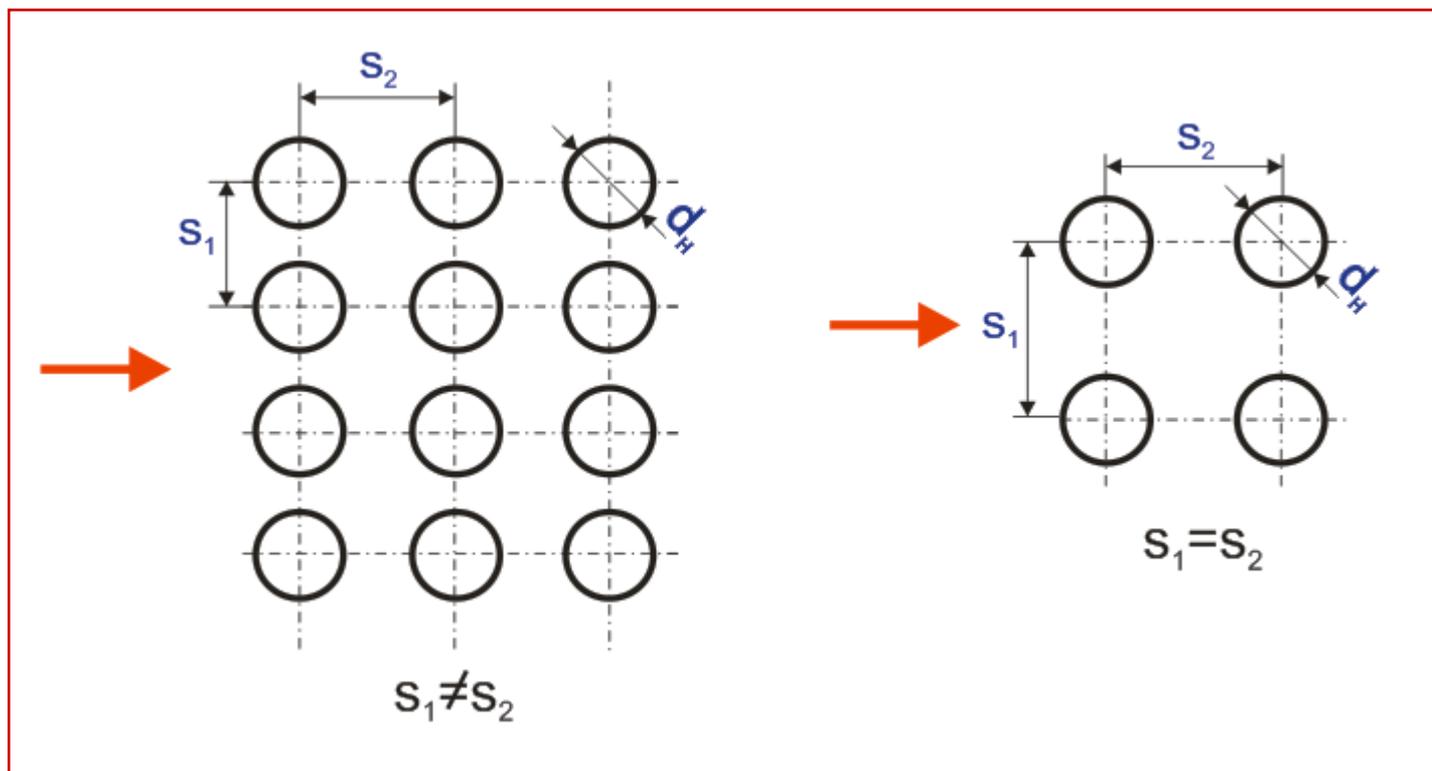
- шахматная;
- квадратная;
- по концентрическим окружностям

Шахматная, треугольная

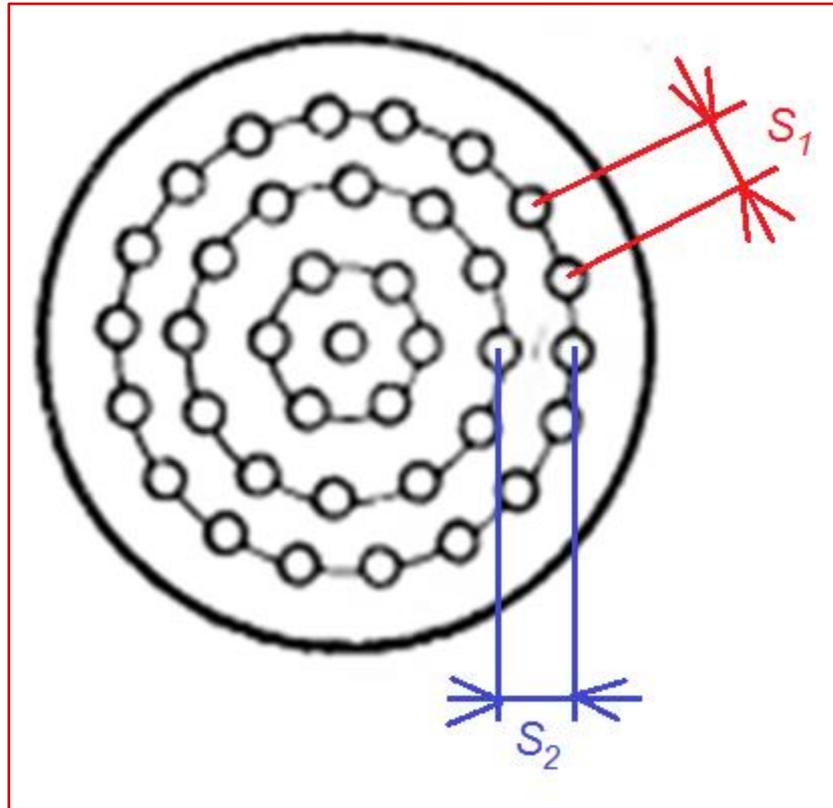


S, S_1, S_2 – шаги пучка

Коридорная, квадратная



По concentрическим окружностям



4.4. По форме трубок

Трубки по форме (поверхности) бывают:

- гладкие и негладкие;
- одностенные и двухстенные

Примеры негладких трубок

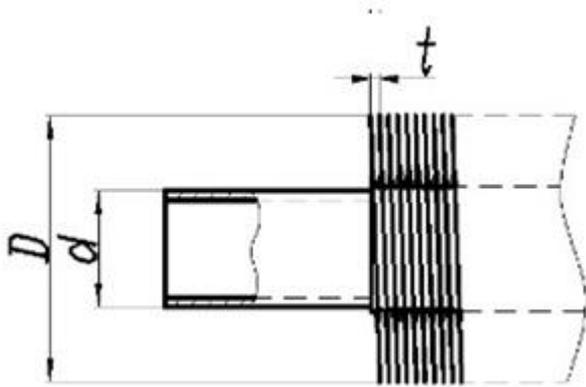


Рис. Трубки с радиальными ребрами

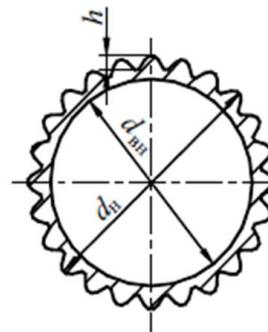


Рис. Трубки с продольными ребрами

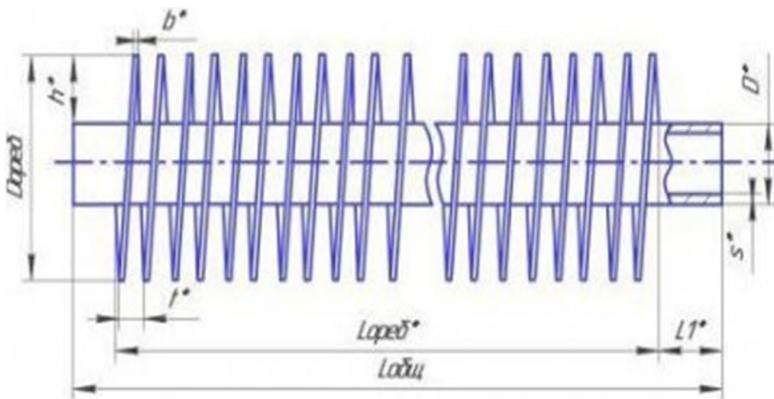


Рис. Трубки со спиральными ребрами

4.5. По способу крепления трубок

Существует два основных способа крепления трубок:

- в цилиндрических коллекторах (SG WWER);
- в плоских трубных досках (SG PWR)

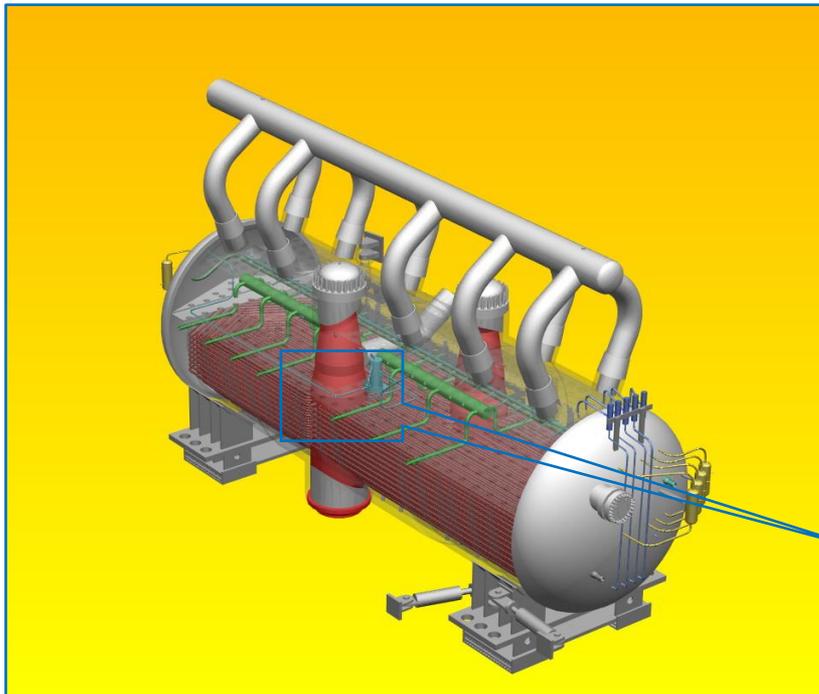


Рис. В вертикальных цилиндрических коллекторах

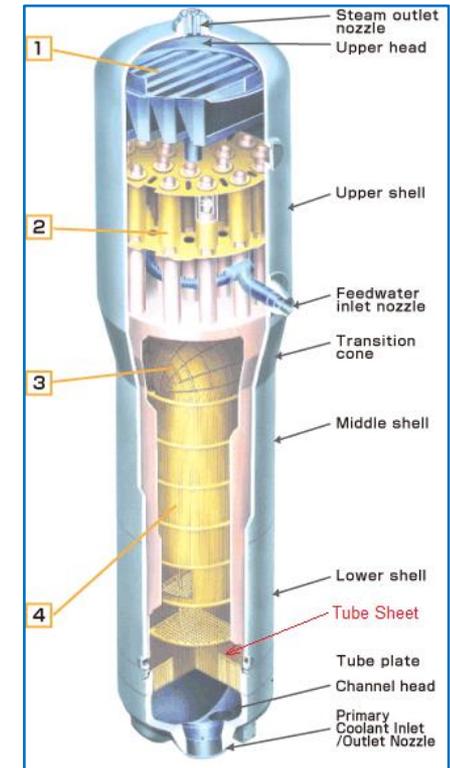


Рис. В горизонтальных плоских трубных досках

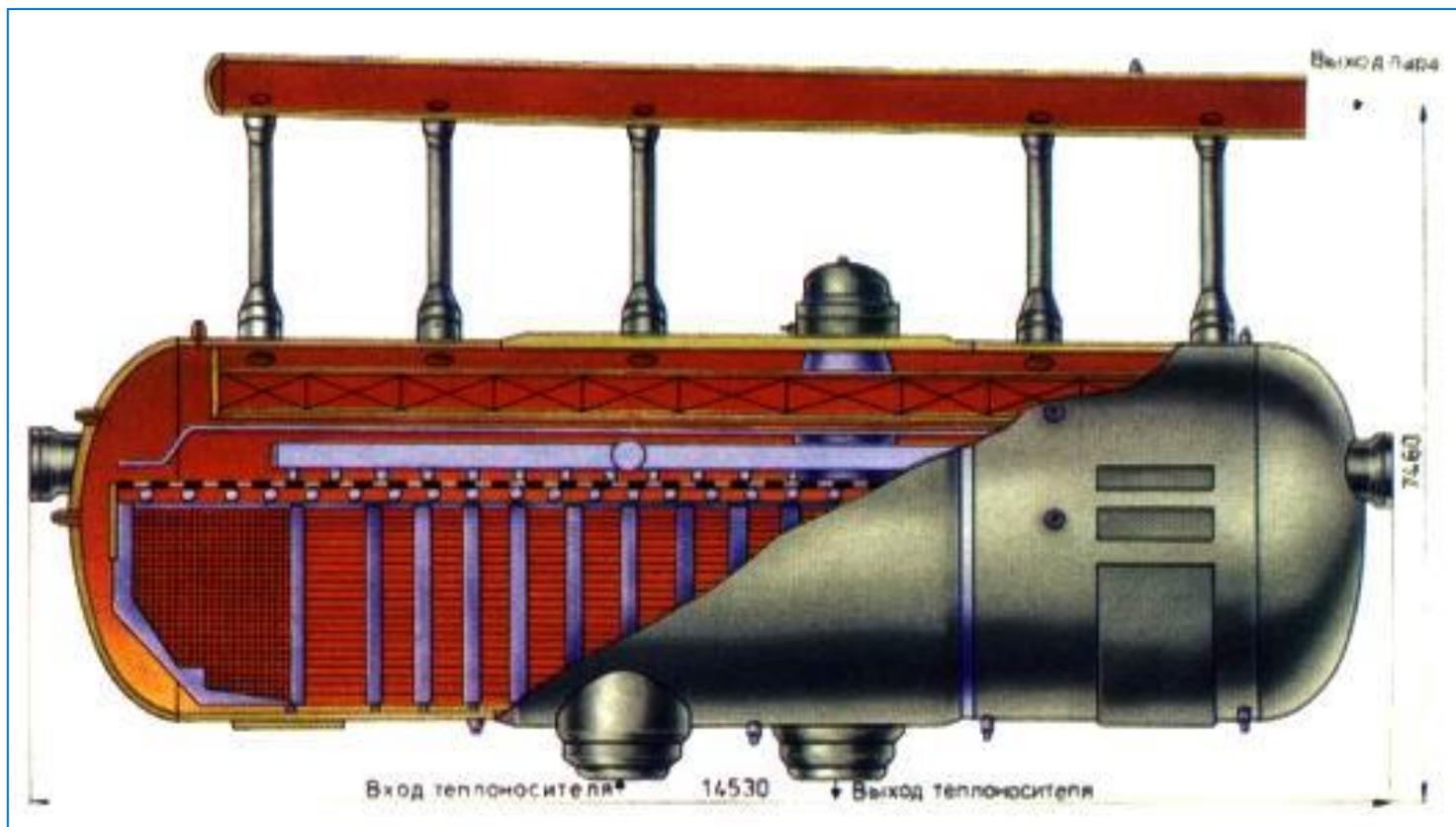
4.6. По пространственной ориентации корпуса (поверхности нагрева)

- вертикальные;
- горизонтальные.

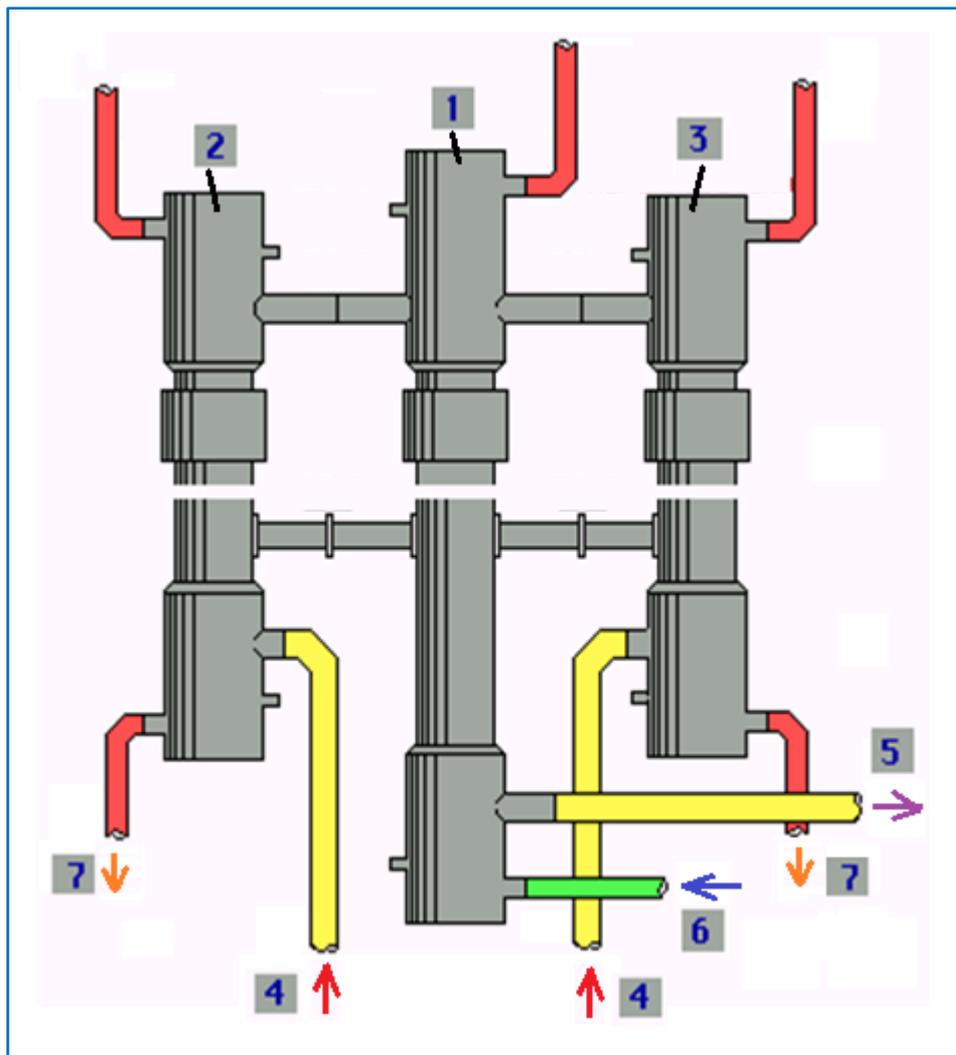
4.7. По компоновке отдельных элементов ПГ

- Интегральные (корпусные).
- Секционно-модульные.

Пример корпусного ПГ (*ВВЭР-1000*)

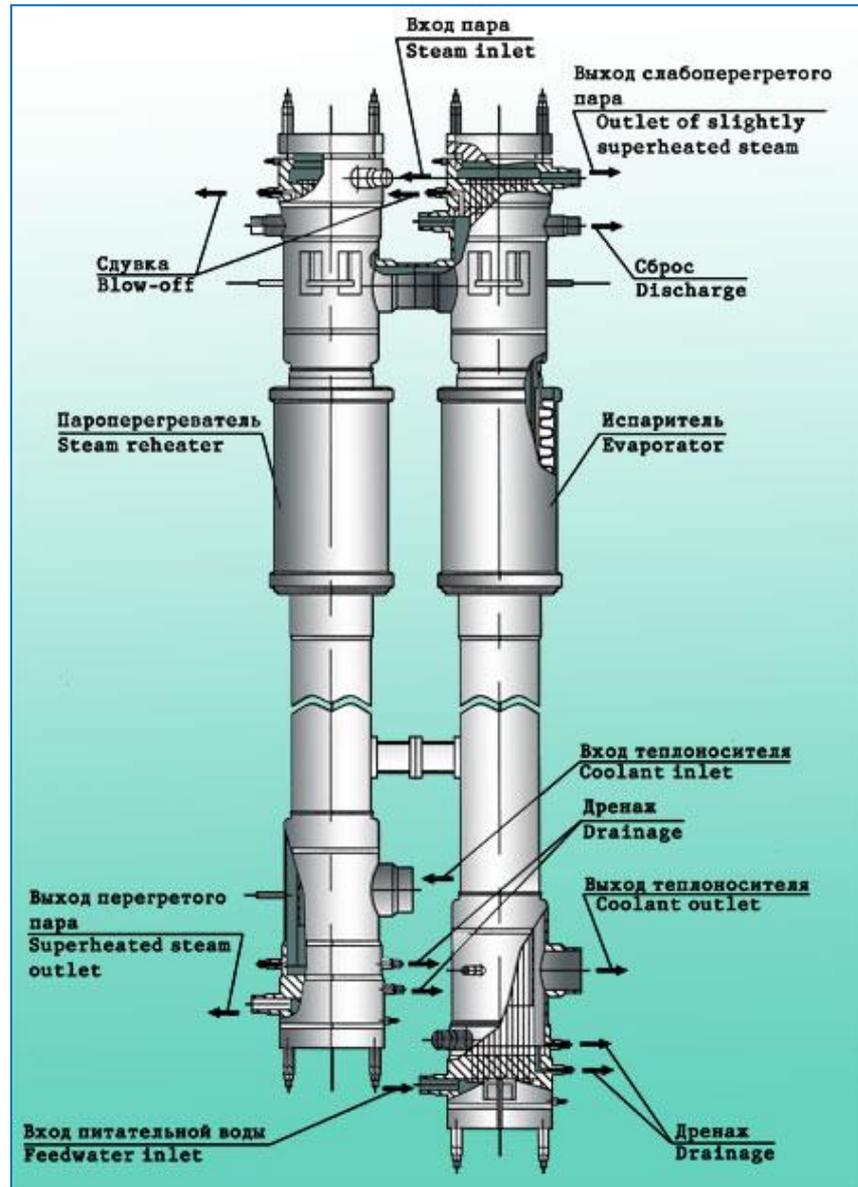


Внешний вид секции секционно-модульного ПГ (БН-600)

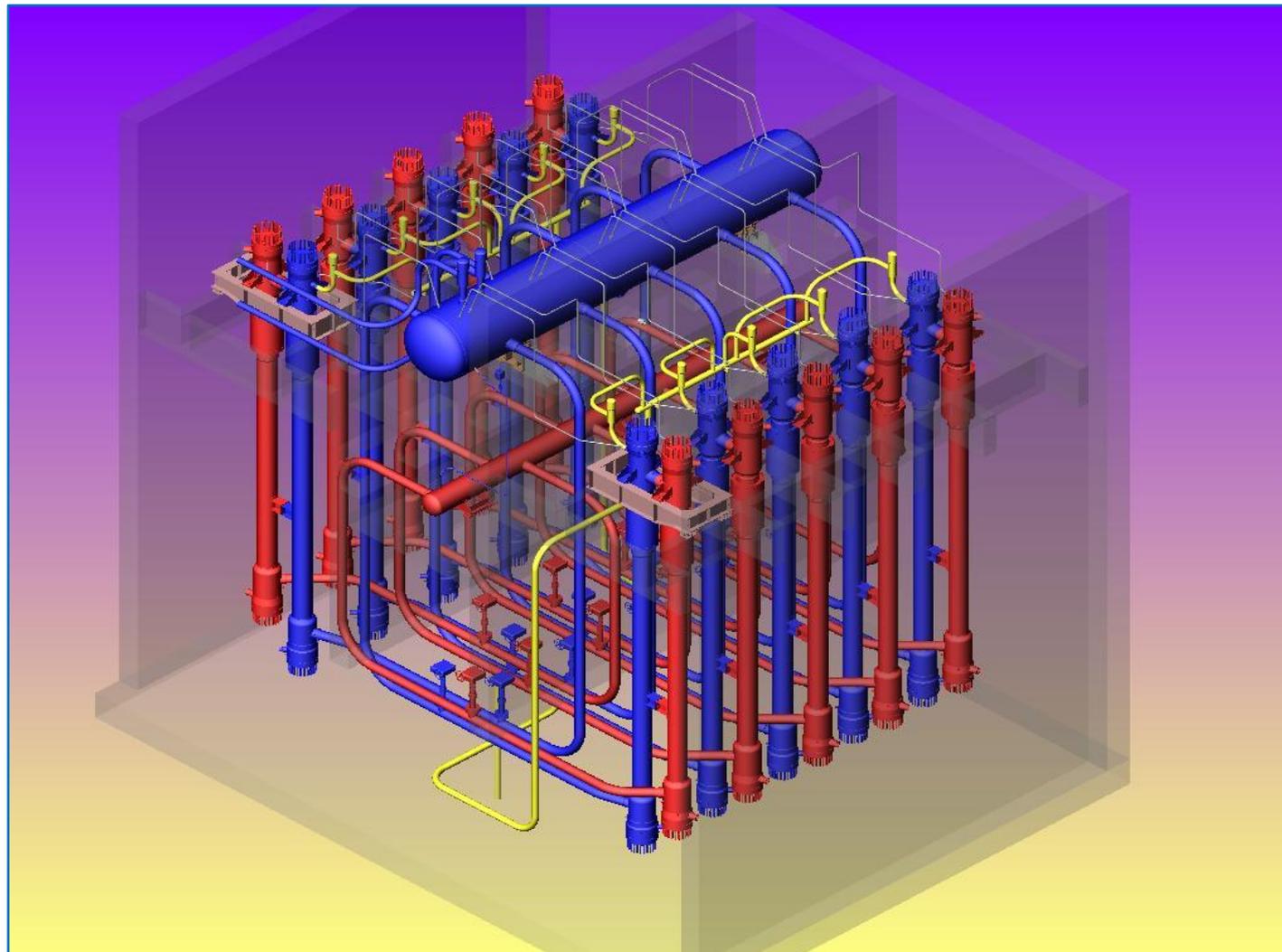


- 1 – модуль –испаритель;
- 2 – модуль
промперегреватель пара ;
- 3- модуль первичный
перегреватель;
- 4, 5 – ВХОД И ВЫХОД
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ;
- 6 - вход рабочего тела:
- 7 – выход рабочего тела

Внешний вид секции секционно-модульного ПГ (БН-800)



Компоновка секционно-модульного ПГ (БН-800)



Основы конструкторского расчета ПГ АЭС

Цель конструкторского расчета ПГ АЭС – определение геометрических размеров основных элементов парогенератора.

Основные стадии конструкторского расчета:

- Выбор конструктивной схемы парогенератора;
- Выбор материала основных элементов;
- Определение внутренних размеров основных элементов (диаметров);
- Определение толщины основных элементов;
- Тепловой расчет, расчет сепарации и пр.;
- Определение длины основных элементов.

Материалы ПГ АЭС

- Основным критерием выбора материала элементов парогенератора является его эксплуатационная температура:
- Для теплообменных поверхностей:
 - <350 °C – углеродистая сталь 10 и 20;
 - 350-420 °C – низколегированные материалы (12МХ);
 - 420-530 °C – высоколегированные материалы (12Х1МФ, 15Х1М1Ф, Инконель и пр.)
 - >600 °C – аустенитные сплавы (12Х18Н10Т, 10Х18Н10Т etc.)
- Для корпусов, трубных досок и коллекторов:
 - 15К, 20К, 22К (листовая сталь), высоко- и низколегированные стали.

Определение внутренних размеров элементов ПГ АЭС (диаметров)

- Ключевыми факторами, определяющими внутренние размеры элементов парогенераторов АЭС, являются величины допустимых скоростей из соображений оптимальных гидравлических потерь исходя из уравнений неразрывности:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot w}}$$

- В случае оценки числа теплообменных трубок, расчет ведется аналогично:

$$n = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho \cdot w}$$

- Дополнительными факторами, влияющими на внутренние размеры являются условия сепарации, транспортировки, изготовления и пр.
- Допустимые скорости:
 - Водяного теплоносителя: в коллекторе – 6-8 м/с, в трубках – 2-5 м/с;
 - Рабочего тела:
 - воды в коллекторе – до 6 м/с, в объеме – 0,5-1 м/с;
 - пара в коллекторе – до 100 м/с;
 - Жидкометаллического: до 1-3 м/с.

Основы определения толщины стенок элементов

- Толщина стенки цилиндрических элементов составляет:

$$\delta_d = \frac{p_d \cdot d_{in}}{(2 \cdot \varphi \cdot [\sigma_{0.2}] - p_d)} + C; \quad \delta_d = \frac{p_d \cdot d_{out}}{(2 \cdot \varphi \cdot [\sigma_{0.2}] + p_d)} + C$$

здесь p_d – расчетное давление в элементе (принимается равным 90 % от максимального давления в элементе, при котором сработают предохранительные клапаны – для большинства парогенераторов данная величина равна 125 % от рабочего давления), МПа;

- d_{in}/d_{out} – внутренний/внешний диаметр цилиндрического элемента, м;
- $[\sigma_{0.2}]$ – предел прочности материала, МПа;
- φ – коэффициент прочности элемента за счет отверстий;
- C – дополнительная толщина из-за производства, эксплуатации и технологических особенностей цилиндрического элемента, м.

Для усиленных отверстий коэффициент φ принять равным 0.

Расчет коэффициента ослабления

- Для определения коэффициента ослабления, рассчитываются три значения для ослабления в горизонтальном, вертикальном и диагональном направлении и выбирается наименьшее.

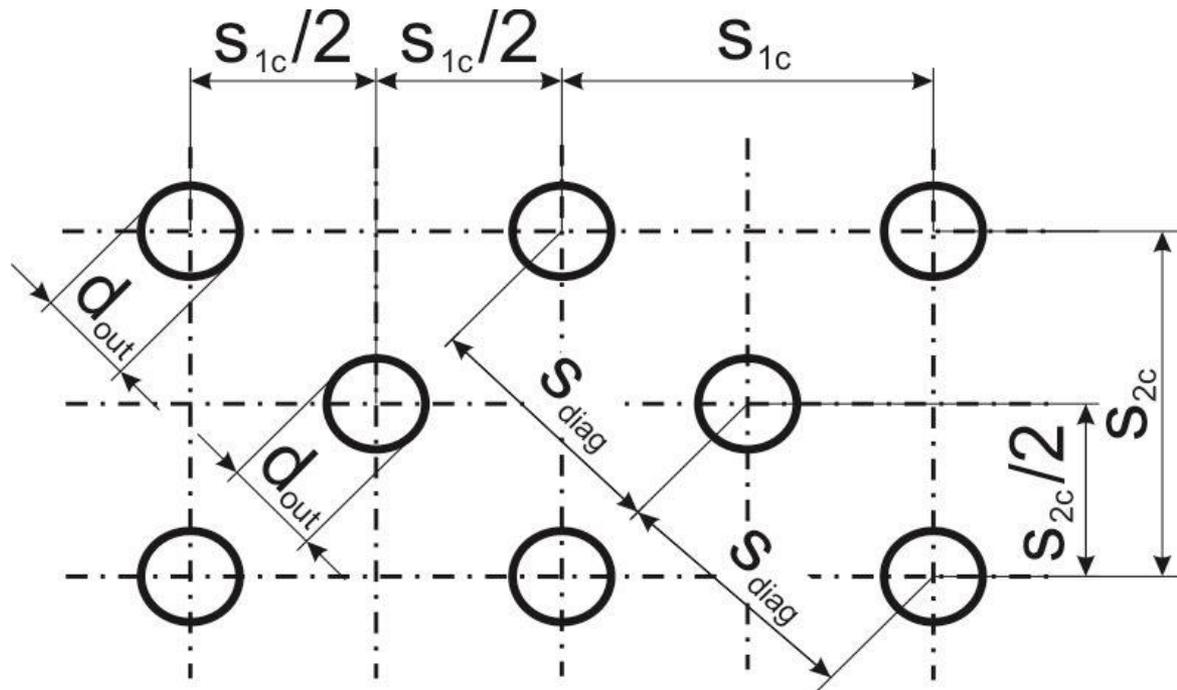
$$\varphi_1 = (s_{1c} - d_{out}) / s_{1c}$$

$$\varphi_2 = (s_{2c} - d_{out}) / s_{2c}$$

$$\varphi_3 = \left(1 - \frac{2 \cdot d_{out}}{s_{1c}} \frac{1}{\sqrt{1 + m^2}} \right)$$

$$\left[\sqrt{1 - 0,75 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right)^2} \right]$$

$$m = s_{2c} / s_{1c}$$



Расчет добавочной толщины элемента

- Значение дополнительной толщины C определяется 4 составляющими:

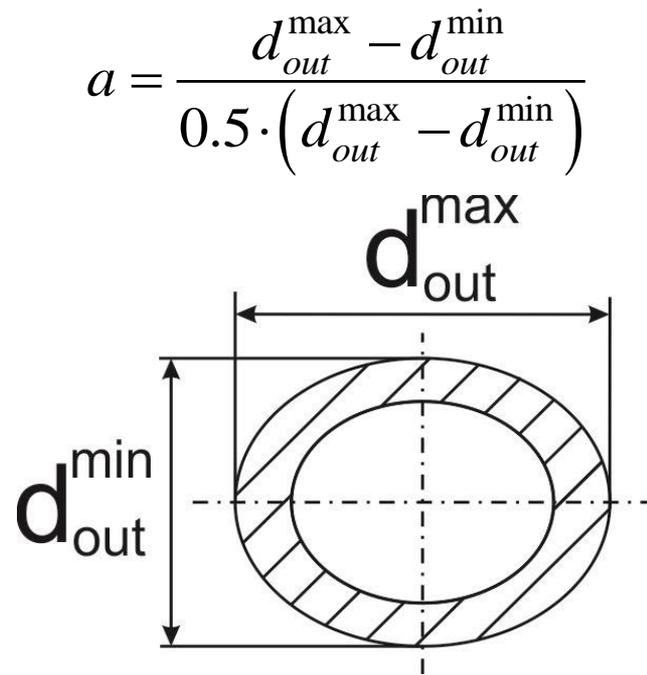
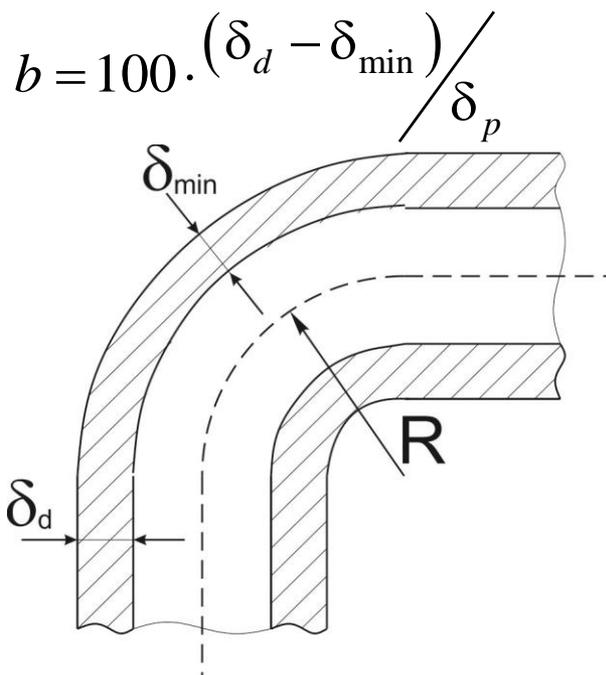
$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

1. Особенности производства (C_1) – принимается согласно документации завода-изготовителя, варьируется в диапазоне 12-15 % от толщины;
2. Снижение толщины (C_2) из-за коррозии в ходе эксплуатации (принимается согласно опыту эксплуатации, для ПГ ВВЭР принимается равным 0);
3. Добавка к толщине (C_3) из-за требований монтажа, например, при необходимости сварки, сверления, развальцовки и пр. (для ПГ ВВЭР принимается равным 0);
4. Добавка к толщине (C_4) из-за изгиба и эллиптичности труб.

Расчет C_4

$$C_4 = \delta_d \left[\frac{1.5 \cdot \left(\frac{a}{100} - \frac{\delta_p}{d_{out}} \right)}{1.5 \cdot \frac{a}{100} + \frac{\delta_p}{d_{out}}} \right]; \quad C_4 = \delta_d \left[1 - 2 \cdot \left(1 - \frac{b}{100} \right) \frac{2 \cdot \frac{R}{d_{out}} + 1}{4 \cdot \frac{R}{d_{out}} + 1} \right]$$

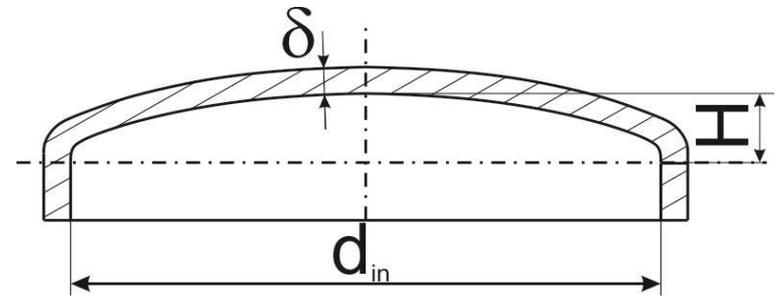
- здесь δ_p – толщина элемента, м; R – радиусгиба, обычно принимается $(2,5-3,5) \cdot d_{out}$, м; a/b – эллиптичность/утонение трубки в местегиба (принимается согласно стандартам).



Расчет толщины основных элементов

- Толщина эллиптического днища:

$$\delta_d = \frac{p_d \cdot d_{in}}{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma_{0.2}]} \cdot \frac{d_{in}}{2 \cdot H} + C$$



- Толщина трубной доски:

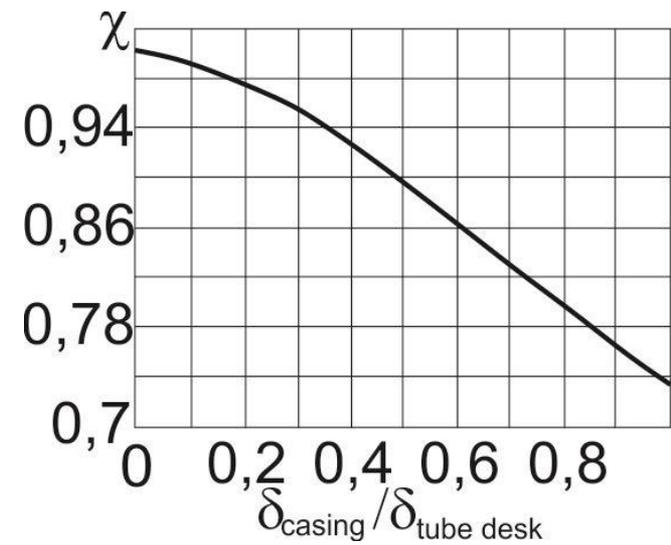
- Установленной между фланцами – $\delta = 0.393 \cdot d_{out} \sqrt{p_d / (\varphi \cdot [\sigma_{0.2}])}$

- Приваренного к корпусу – $\delta = 0.393 \cdot \chi \cdot d_{out} \sqrt{p_d / (\varphi \cdot [\sigma_{0.2}])}$

- Коэффициент ослабления при компоновке:

- Коридорной – $\varphi = 0.935 - 0.65 \cdot d_{out} / s_{1c}$

- Шахматной – $\varphi = 0.975 - 0.68 \cdot d_{out} / s_{diag}$



Расчет толщины основных элементов

- Толщина плоского днища:
$$\delta_{bottom} = \left(\frac{K}{K_0} \right) \cdot d_{out} \cdot \sqrt{p_d / [\sigma_{0.2}]}$$

- Для приваренных днищ:
$$K = 0.45 \left[1 - 0.23 \cdot \left(\delta_{bottom} / \delta_{elem} \right) \right]$$

здесь δ_{elem} – толщина элемента, к которому днище приварено. Значения K должны быть не меньше 0,35. Для крышек, закрепленных болтами, значения K должны быть принятыми равными 0,6, в то время как в уравнении для толщины вместо внешнего диаметра должен использоваться диаметр окружности отверстий.

- Для приваренных крышек и днищ без отверстий $K_0 = 1,0$.
- Для крышек и днищ с отверстиями с диаметром d_0 следующее уравнение должно быть использовано:

- При $d_0/d_{out} < 0,35$ –
$$K_0 = 1 - 0.43 \cdot \left(d_0 / d_{out} \right)$$

- При $0,35 < d_0/d_{out} < 0,25$ –
$$K_0 = 0.85$$

Усиление отверстий

Коэффициент ослабления разных элементов:

- Цилиндрических –
$$\varphi_0 = \frac{p_d \cdot [d_{in} + (\delta - C)]}{2 \cdot (\delta - C) \cdot [\sigma_{0.2}]}$$
- Эллиптических –
$$\varphi_0 = \frac{p_d \cdot d_{in}}{4 \cdot (\delta - C) \cdot [\sigma_{0.2}]}$$

Предельный диаметр отверстий, не требующий укрепления

при $\varphi_0 < 0,66$:
$$d_{hole\ max} = 2 \cdot \left(\frac{1}{\varphi_0} - 1 \right) \cdot \sqrt{d_{out} (\delta - C)}$$

при $0,66 < \varphi_0 < 1,00$:
$$d_{hole\ max} = \left(\frac{1.6}{\varphi_0} - 1.4 \right) \cdot \sqrt{d_{out} (\delta - C)}$$

при $\varphi_0 = 1,00$:
$$d_{hole\ max} = 0.2 \cdot \sqrt{d_{out} (\delta - C)}$$

Спасибо за внимание