

План лекции

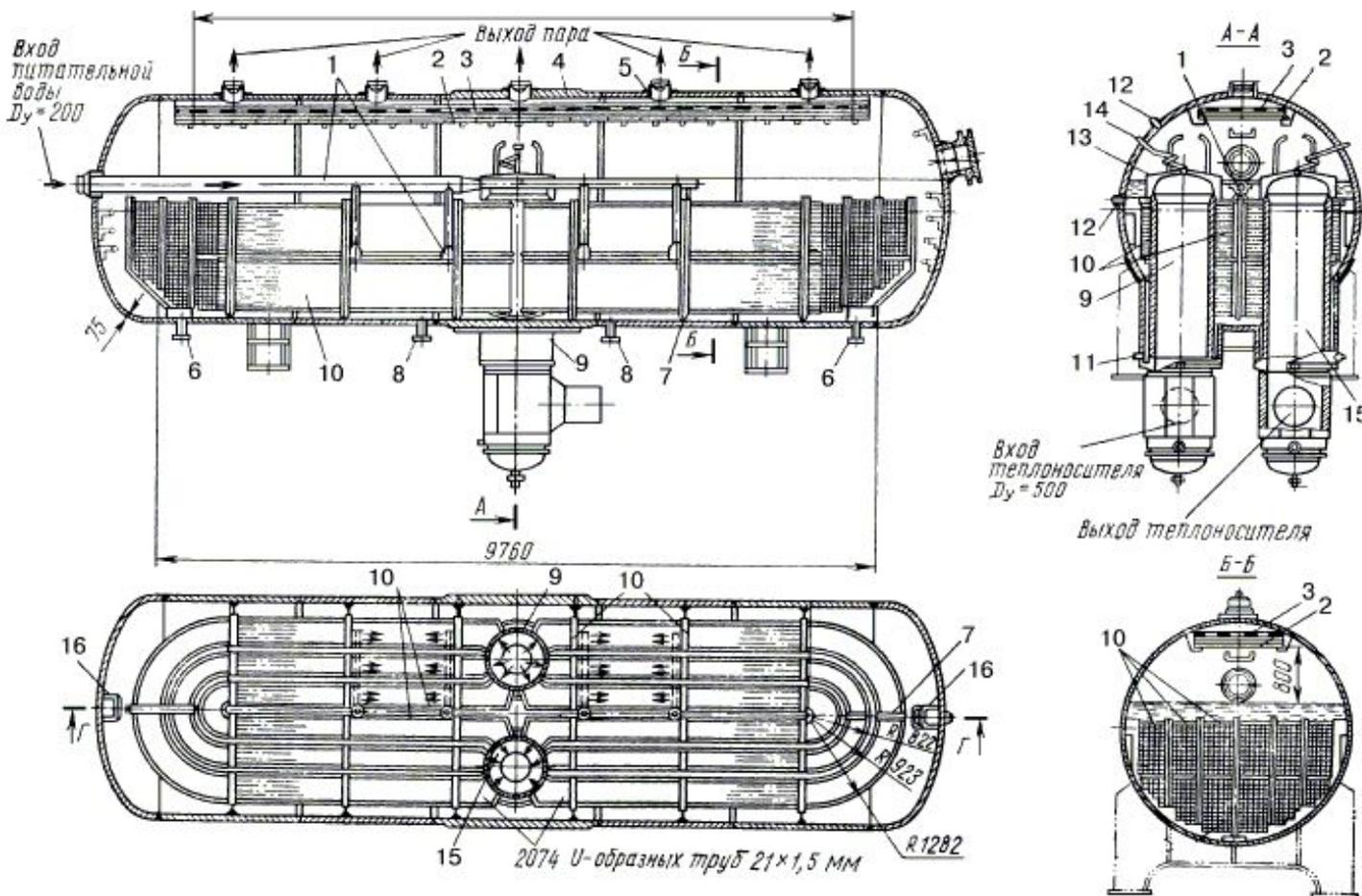
- Развитие конструкций ПГ для АЭС с ВВЭР
- ПГВ-4
- ПГВ-1000 (ПГВ-1000М)

Развитие конструкций ПГ для АЭС с ВВЭР

- Разработка 1 ВВЭР 1955 - 1964 гг.
- Существовали вертикальные ПГ с трубной доской 400-800 мм. Трудность в их изготовлении.
- Решение – вертикальные коллекторы с толщиной много меньшей: цилиндр вместо пластины – большая прочность, нет выпадения шлама на трубной доске, нет большого теплоперепада между частями трубной доски (вход, выход т/н).
- Основные схемные решения:
 - однокорпусной ПГ без ЭКО и ПП, со встроенной сепарацией;
 - горизонтальный корпус и вертикальные коллекторы;
 - горизонтальный трубный пучок из U-образных трубок из нержавеющей стали;
 - естественная циркуляция рабочего тела;
 - умеренные нагрузки зеркала испарения и наличие свободного уровня над трубным пучком;
 - сепарация пара в жалюзийном сепараторе в верхней части корпуса;
 - качество п/в – исходя из опыта эксплуатации паровых котлов.

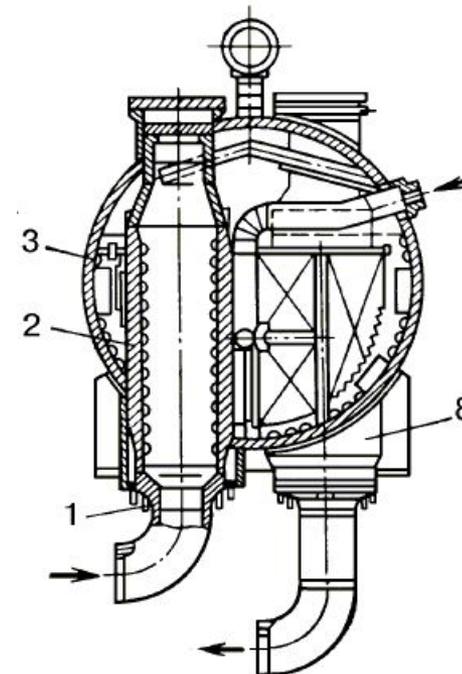
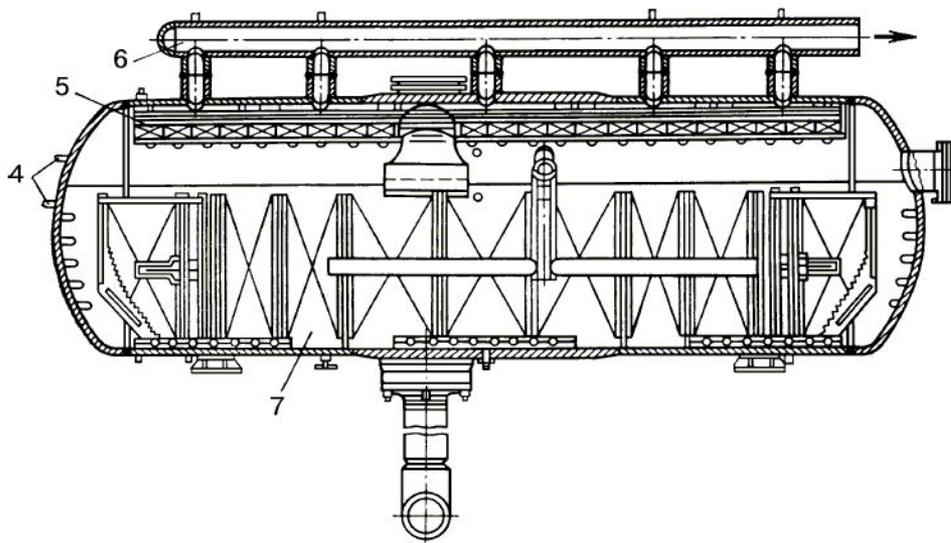
ПГ малой мощности

- 1964 г – 1 блок НВ АЭС с ВВЭР-210 – «ПГВ-1» $N_T = 127$ МВт (6 шт.),
- 1967 г. – 2 блок НВ АЭС с ВВЭР-365 – «ПГВ-3» $N_T = 179$ МВт (6 шт.),
- Параметры пара: $P = 3,2 / 3,3$ МПа, $t = 236/238^\circ\text{C}$,
- параметры теплоносителя: $P=10$ МПа, $t'/t'' = 270/252; 280/252$



ПГ для ВВЭР-440

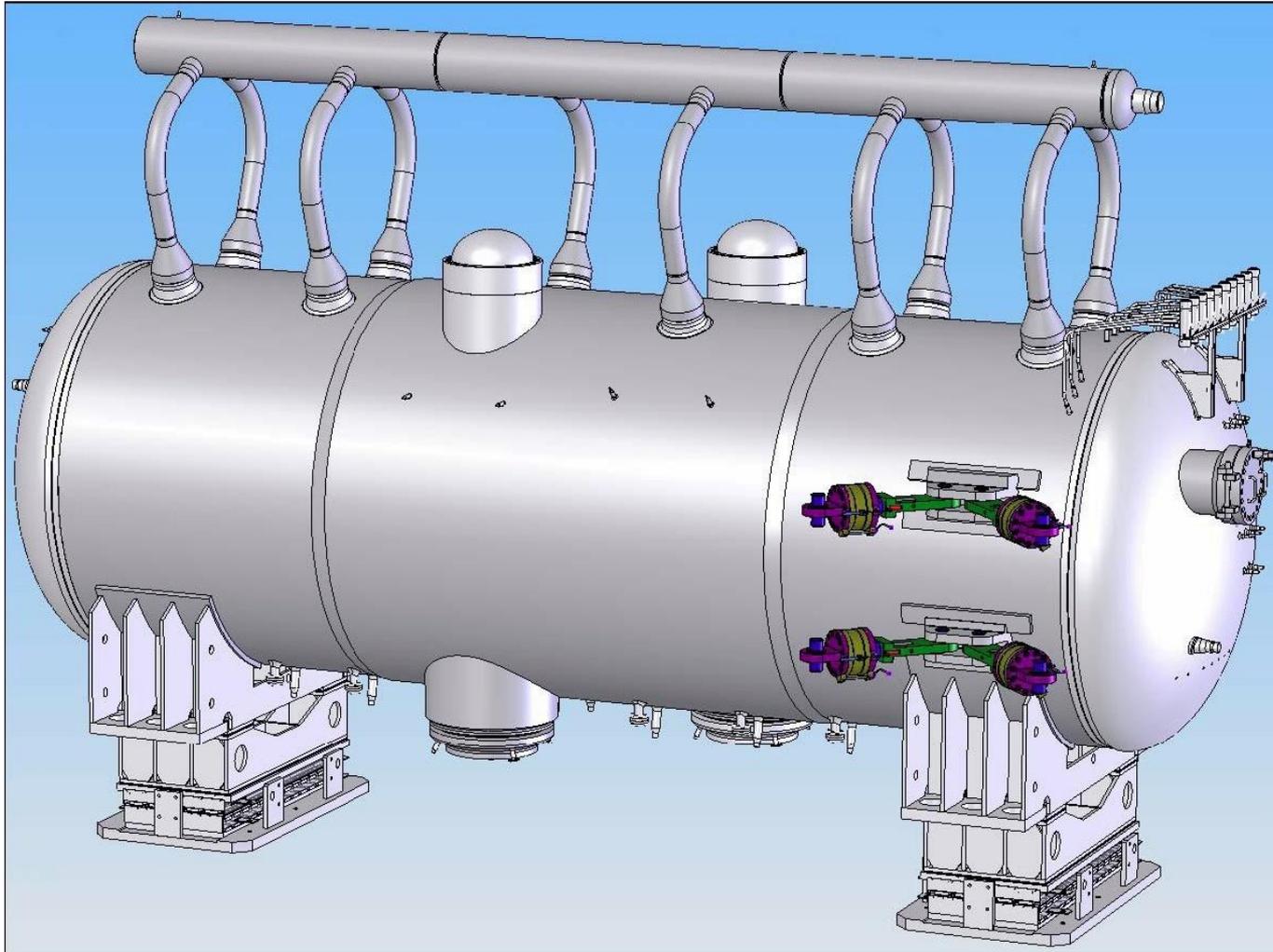
- 1971 г. – 3 блок НВ АЭС с ВВЭР-440 – «ПГВ-4» (ПГВ-440) $N_t = 230$ МВт (6 шт.);
- всего 35 блоков с 210 ПГ в России и Европе
 - параметры пара $P/t = 4,6$ МПа/259°C, теплоноситель: 13,7 МПа и 300/270°C
- основные отличия:
 - большая мощность и параметры,
 - проходные коллекторы через корпус, смещены относительно друг друга,
 - подвод п.в. сбоку
 - трубки 16/1,4 мм
- размеры корпуса $L=12,4$ м $D_{BH}=3,2$ м



Развитие конструкций ПГ для АЭС с ВВЭР: ПГВ-1000

- Первый блок ВВЭР-1000 – НВ АЭС в 1980 г.
- ПГВ-1000 – 4 ПГ на блок
- похож по схеме и конструктивному исполнению на ПГВ-4
- более напряжен по тепловым, паровым и механическим показателям
- мощность ПГ 750 МВт, - в 3,25 раза выше, а масса лишь в 1,7 раза
- с 1984 г. рекомендован к серии, название ПГВ-1000М
- в России, Украине, Болгарии, Чехии, Китае, Иране - 108 шт.
ПГВ-1000(М) + 8 (3 и 4 бл. ВАЭС)
- Параметры ПГ:
 - паропроизводительность: 408 кг/с (1470 т/ч),
 - давление / температура пара: 6,28 МПа/278,5°С
 - влажность пара: менее 0,2%
 - температура теплоносителя: 321/299°С
 - давление теплоносителя 16 МПа
 - расход теплоносителя 3980 кг/с (21500 м³/ч)

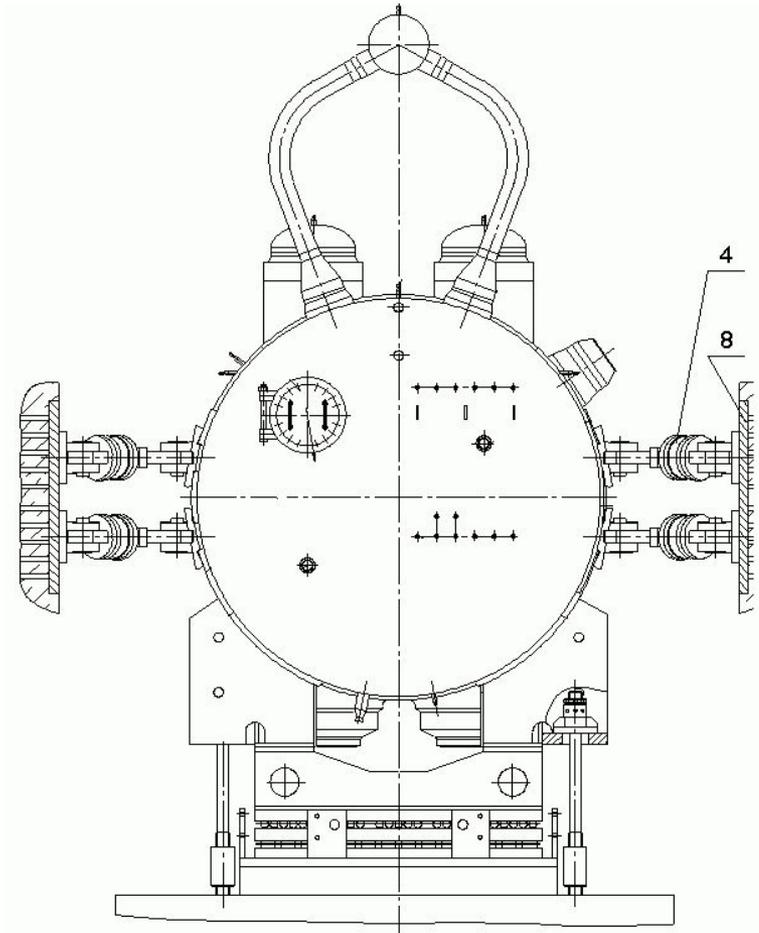
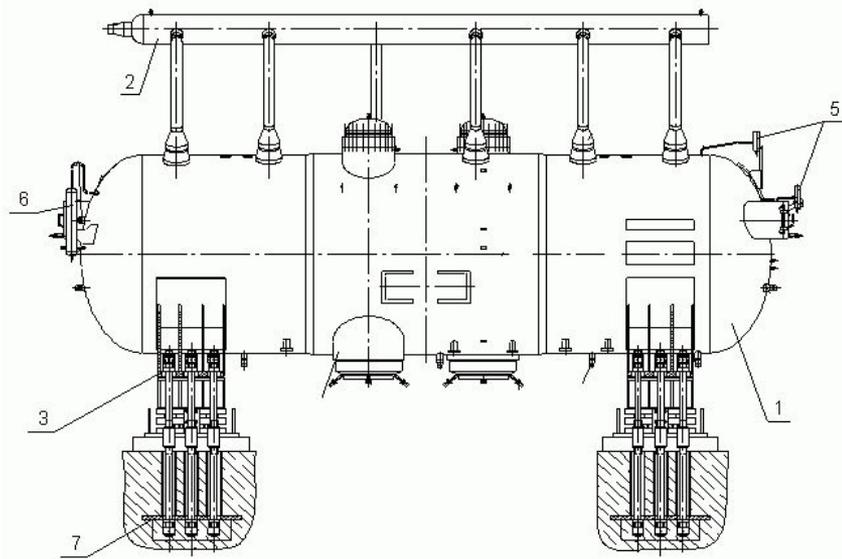
Конструкция ПГВ-1000 (1000М)



Конструктивно напоминает ПГВ-4М, но:

- большая нагрузка (в 3 раза),
- большие габариты (диаметр 4 м вместо 3,2 м)

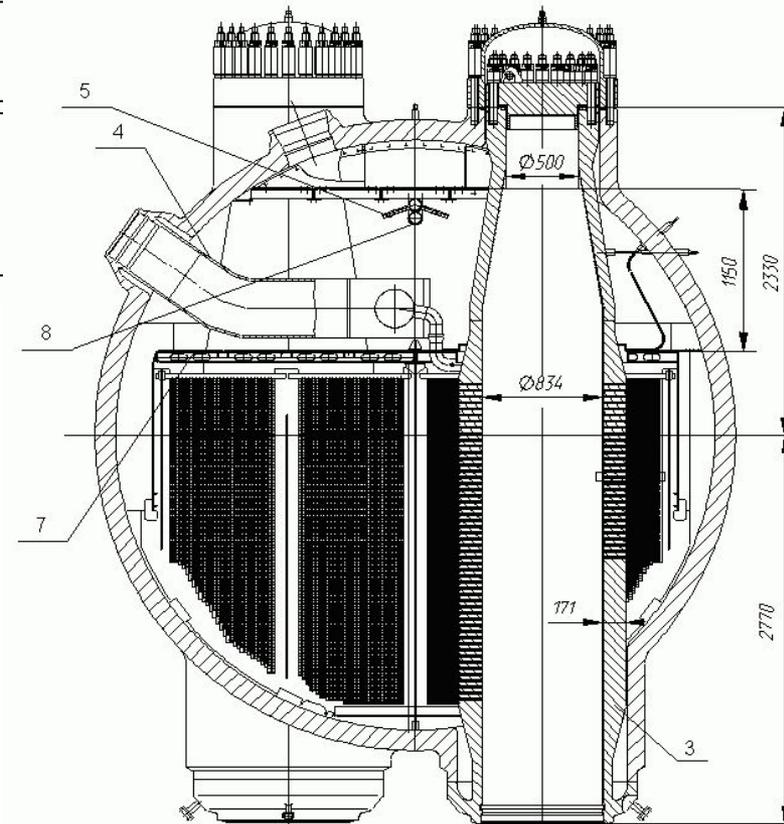
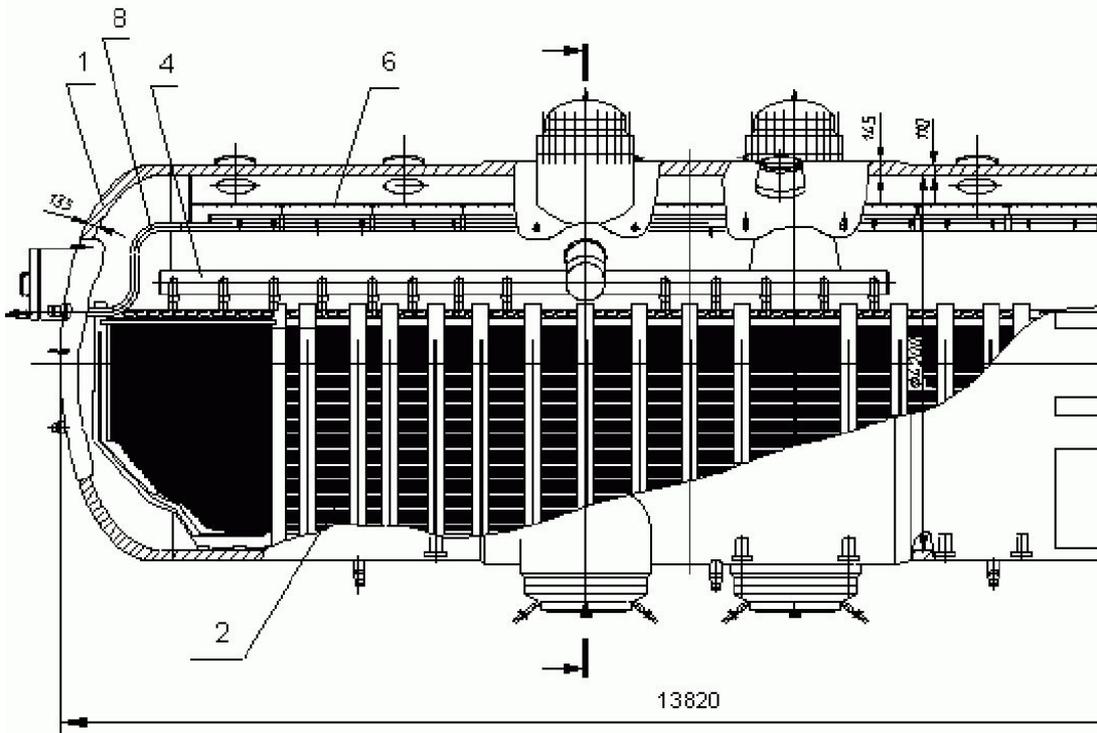
Основные элементы ПГВ-1000М



- 1 - парогенератор
- 2 – коллектор пара
- 3 – опоры (2 шт.)
- 4 – гидроамортизаторы (8 шт.)
- 5, 6 – уравнивательные сосуды
- 7, 8 – закладные детали

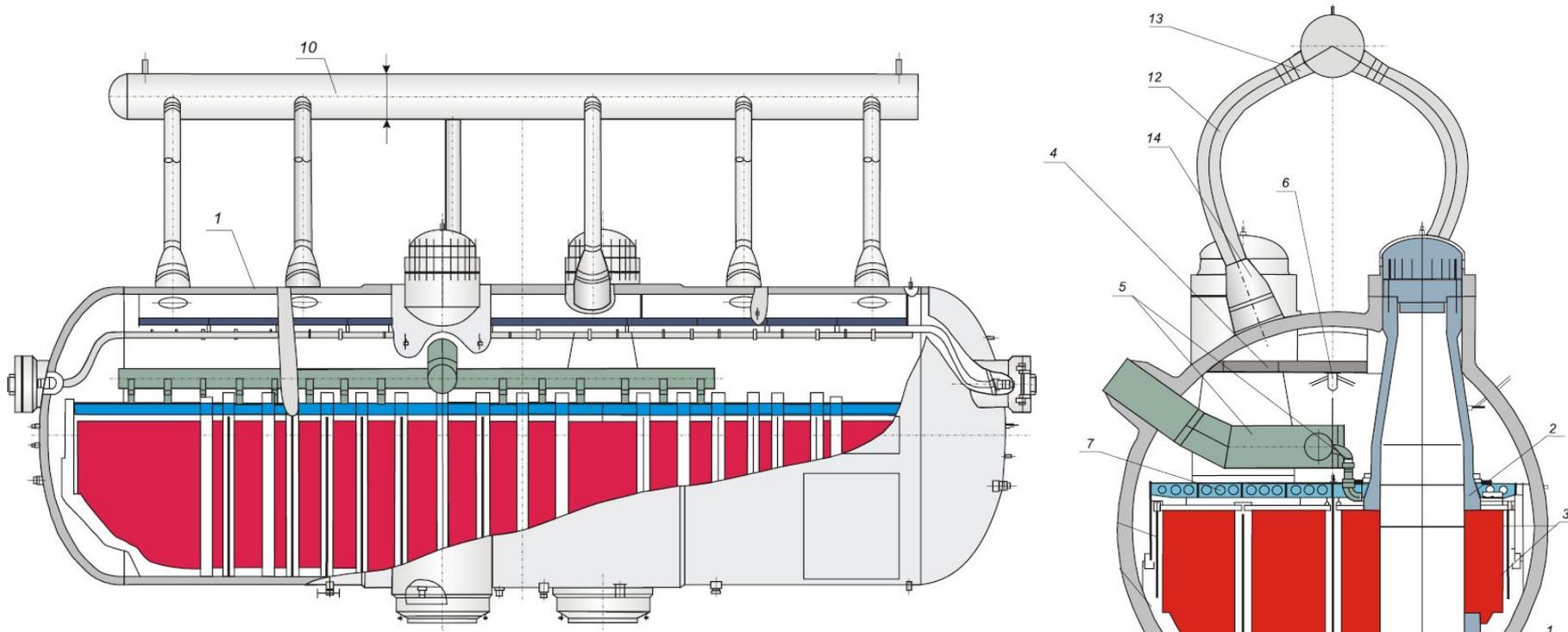
В этом составе ПГ комплектуется на АЭС

ратора



- 1 – корпус с патрубками и штуцерами
- 2 – теплообменная поверхность
- 3 – коллекторы теплоносителя
- 4 – устройство подвода и раздачи пит. воды
- 5 – устройство подвода авар. пит. воды
- 6 – потолочный дырчатый лист
- 7 – погруженный дырчатый лист
- 8 – устройство раздачи хим. реагентов

Основные элементы собственно парогенератора



Основные элементы и узлы ПГ:

- 1 - корпус,
- 2 - «горячий» и «холодный» коллекторы,
- 3 - поверхность теплообмена,
- 4 - потолочный дырчатый лист,
(сепарационные устройства жалюзийного типа),
- 5 - устройство раздачи основной питательной воды,
- 6 - устройство раздачи аварийной питательной воды,
- 7 - погруженный дырчатый лист,
устройство раздачи хим.реагентов,
система продувки и дренажа.

Конструкция ПГВ-1000М - корпус

Корпус – сварной цилиндрический сосуд

- предназначен для размещения внутрикорпусных устройств, трубного пучка с коллекторами первого контура
- три обечайки разной толщины и два штампованных днища,
- рассчитан на давление 2 контура
- длина 13840 мм, внутренний диаметр 4000 мм, толщина стенок корпуса - 145 мм и 105 мм, толщина стенок днищ - 120 мм.
- материал - перлитная сталь марки 10ГН2МФА
- патрубки коллекторов т/н, пара и п/в, люки 800 мм и 500 мм, штуцеры труб продувки, дренажа, воздушников, уравнильных сосудов уровнемеров

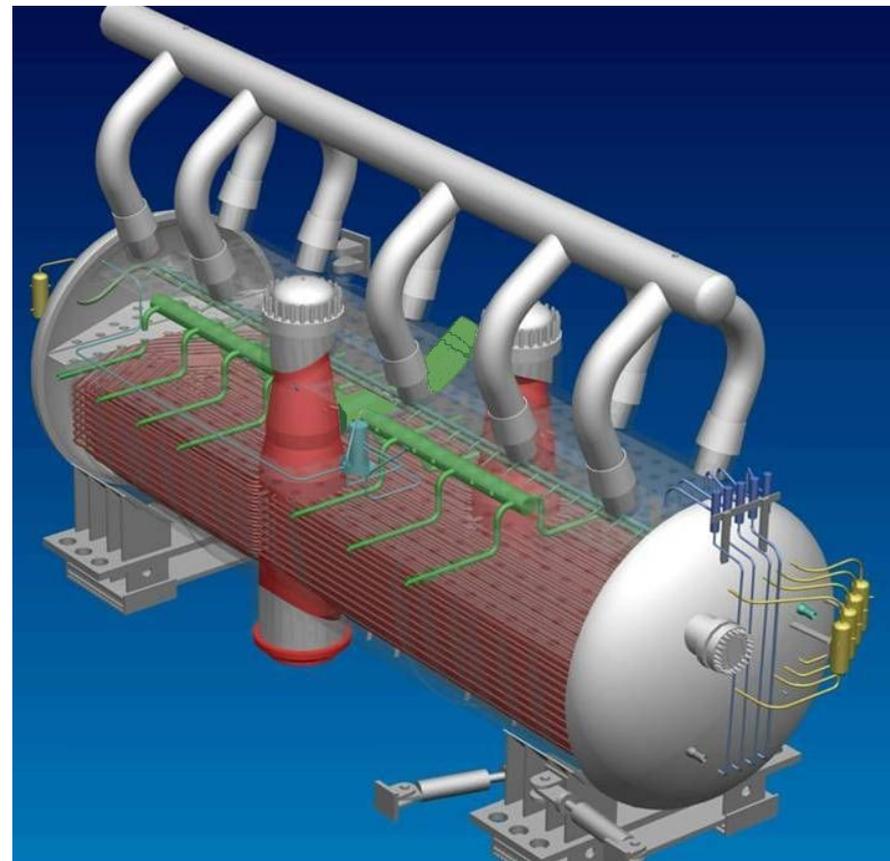


Конструкция ПГВ-1000М - корпус

Доступ для осмотра внутрикорпусных устройств со стороны второго контура – через 2 люка Ду500 на эллиптических днищах.

Люки с разъемными фланцевыми соединениями и плоскими крышками, которые закрепляются шпильками М48.

Для доступа к коллекторам первого контура - два люка второго контура Ду800 с разъемными фланцевыми соединениями и эллиптическими крышками. Эллиптические крышки закреплены с помощью шпилек М52.



Конструкция ПГВ-1000М - коллекторы

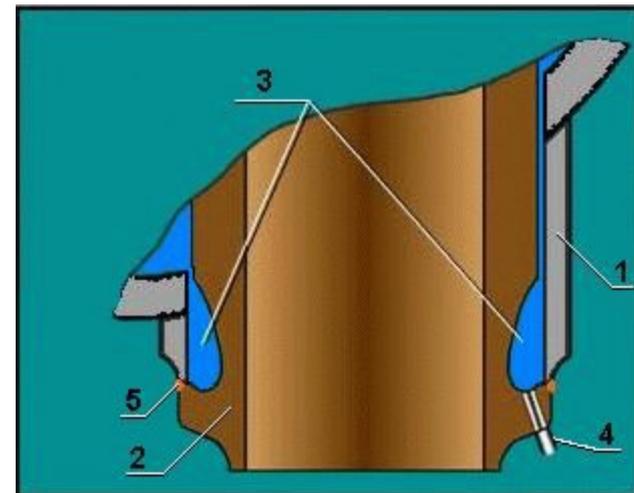
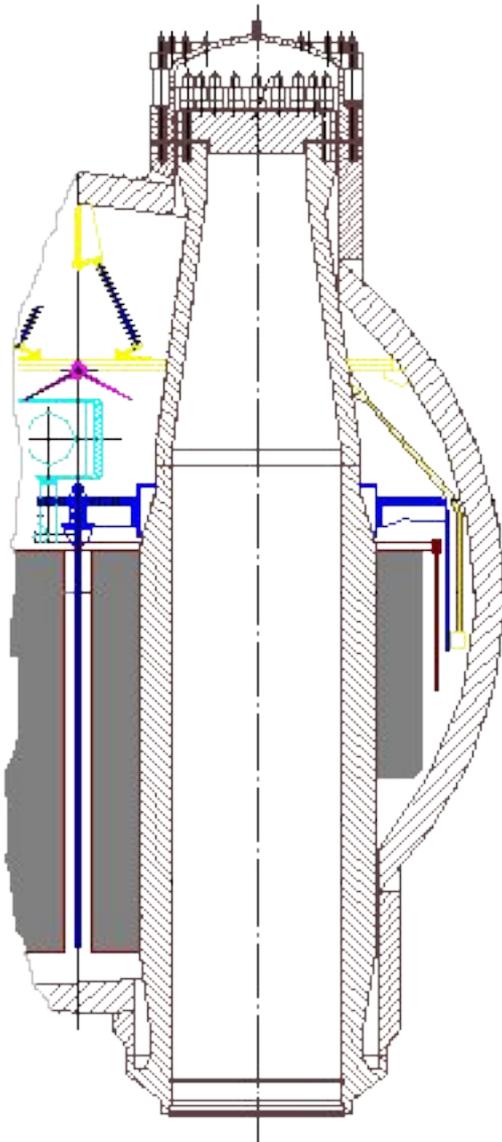
2 коллектора: горячий и холодный.
Отличие в рабочей температуре (320 и 290°C)
(холодный - Δt по периметру до 7°C)

Сосуд из двух поковок: цилиндр и конус
Толщина стенок 171 мм. Диаметр – 834 мм
Материал: сталь 10ГН2МФА
и плакировка изнутри (8 мм) – 08Х18Н10Т

Крышка 500 мм, сверху люк – 800 мм

Перфорация для трубок – 10978 отверстий 16,25мм
Расположение - шахматное с шагом (19 и 30,8 мм)

Между стенками коллекторов и патрубками -
водяная рубашка, ниже которой - карманы для
отвода парогенераторной воды



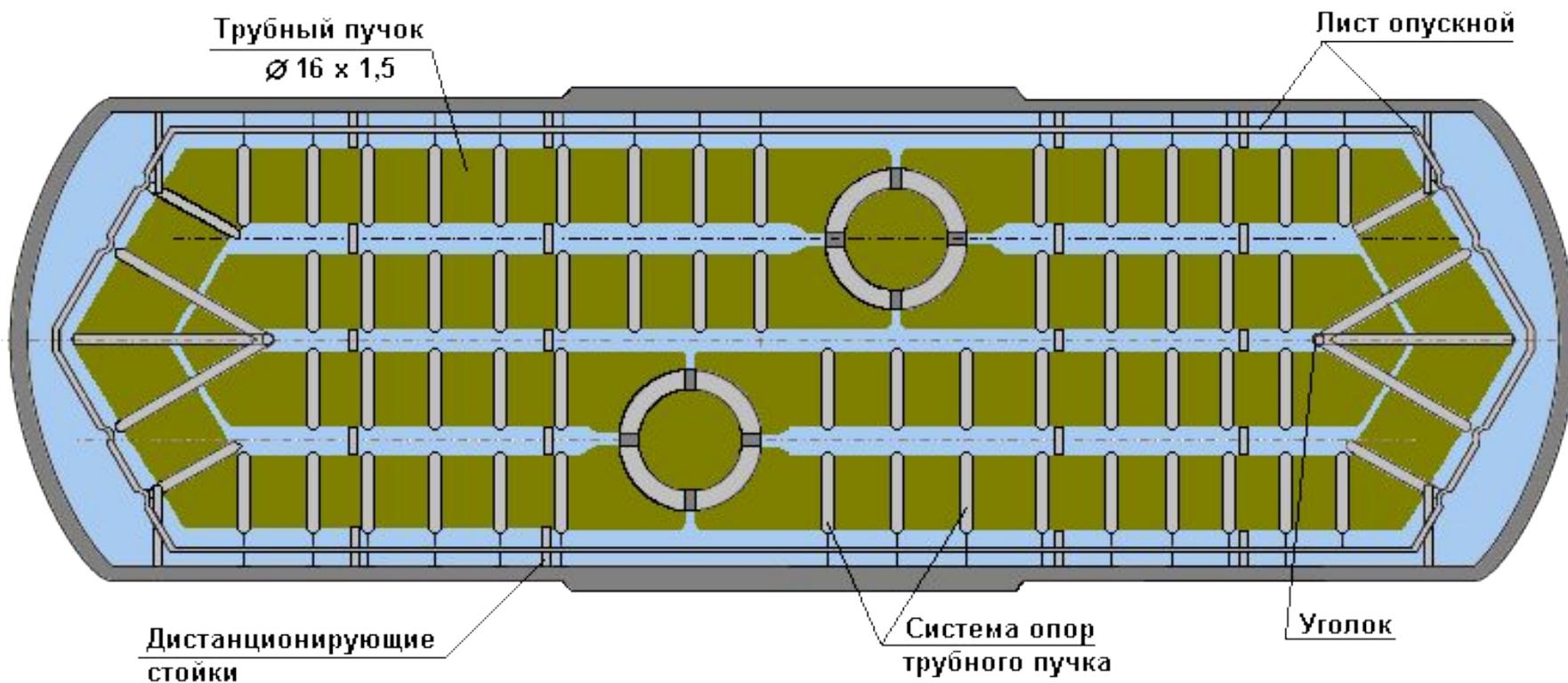
Конструкция ПГВ-1000М – теплообменная поверхность

11 тысяч U-образных трубок из стали 08Х18Н10Т диаметром 16x1,5 мм
Скомпонованы в 2 пучка. Разная длина трубок: от 9 до 14 м (средняя – 12 м).
Шахматное расположение с шагами 19 мм (по высоте) и 23 мм (по ширине).

Вертикальные и горизонтальные коридоры делят пучки труб на пакеты – для циркуляции рабочего тела.

Змеевики имеют уклон к коллекторам (20 мм на длине змеевика) для обеспечения возможности полного дренирования труб.

Верхний ряд труб – на 200 мм выше оси ПГ



Конструкция ПГВ-1000М – теплообменная поверхность

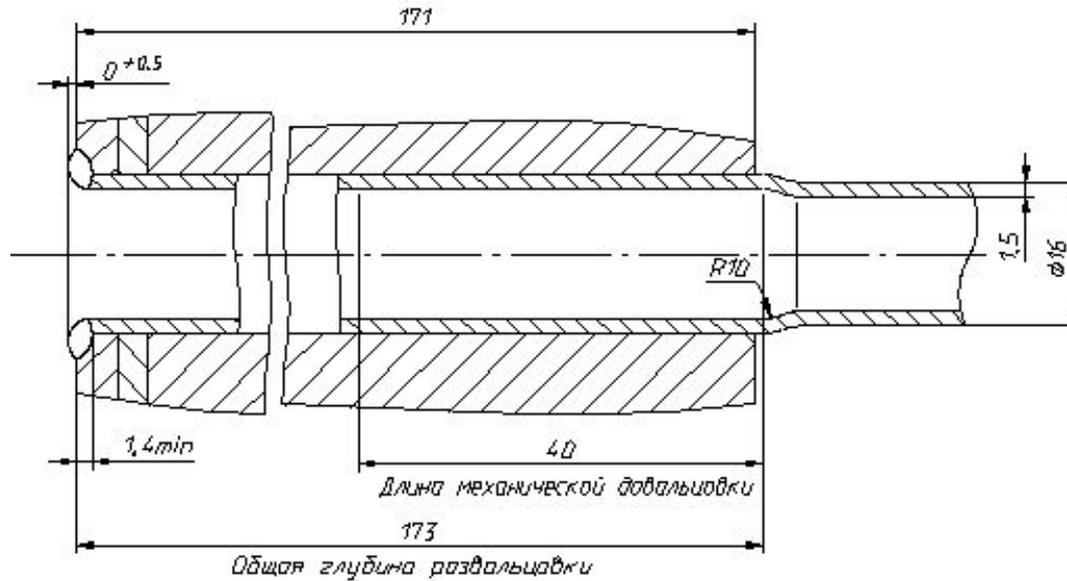


Трубы поставляются на завод-изготовитель ПГ длиной до 16 м, что позволяет изготавливать змеевики без сварных стыков.

U-образные змеевики изготавливаются путем холодной гибки труб из стали 08Х18Н10Т в холодном состоянии без последующей термической обработки.



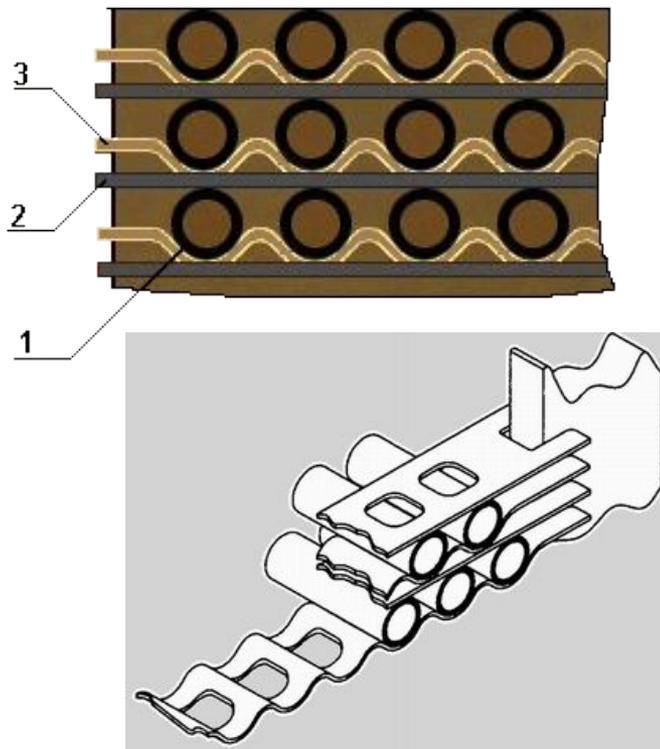
Конструкция ПГВ-1000М – теплообменная поверхность



Закрепление труб производится в три этапа:

- обварка конца теплообменной трубы;
- гидравлическая раздача – вальцовка (под действием высокого давления – до 3500 атм.);
- механическая довальцовка участка трубы на выходе из коллектора.

Конструкция ПГВ-1000М – теплообменная поверхность



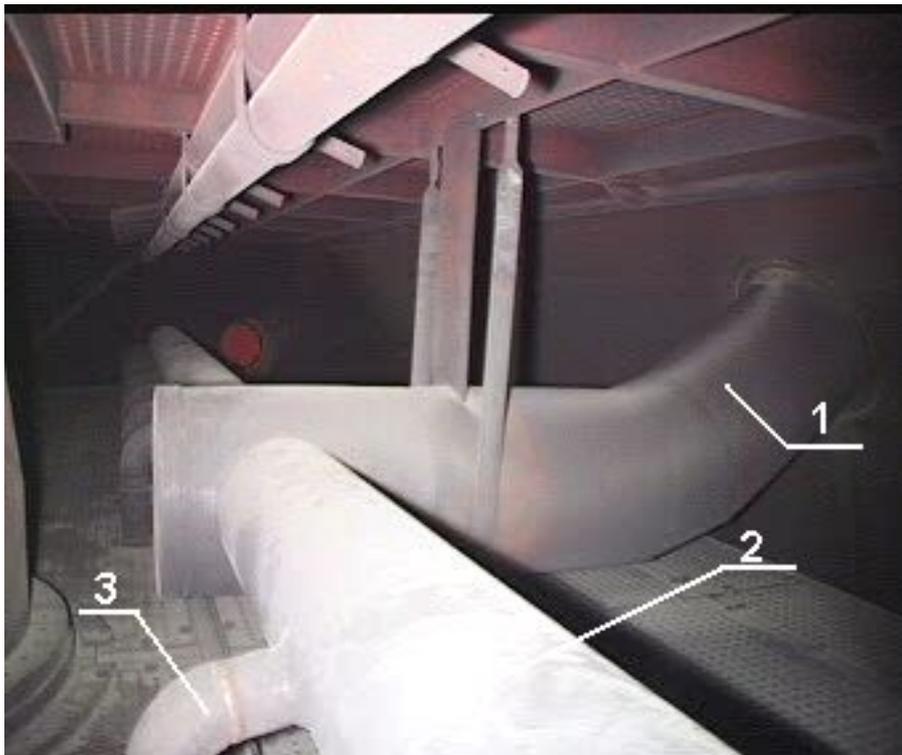
- Дистанционирующие элементы: волнообразные полосы (3) + промежуточные плоские планки (2).
- Плоские пластины обеспечивают жесткость дистанционирующей решетки. Пластины крепятся к вертикальным опорным стойкам и к ребрам, приваренным к стенке корпуса.
- Дистанционирующие элементы изготовлены из стали 08X18H10T.
- В пластинах есть прорезы - «вентилирующие» окна, предназначены для устранения застойной зоны в зазоре и скопления шлама под трубами

Конструкция ПГВ-1000М – подвод ПВ



- Устройство раздачи основной питательной воды состоит из трубопроводов, коллекторов и раздающих труб, имеющих по своей длине "лучи" для выхода питательной воды.
- К патрубку питательной воды присоединен коллектор Ду400, расположенный в паровом объеме парогенератора, разветвляющийся на две раздающие трубы Ду250, расположенные над погруженным дырчатым листом.
- Основной поток п/в подается на горячую сторону ПГ – выравнивает паровую нагрузку

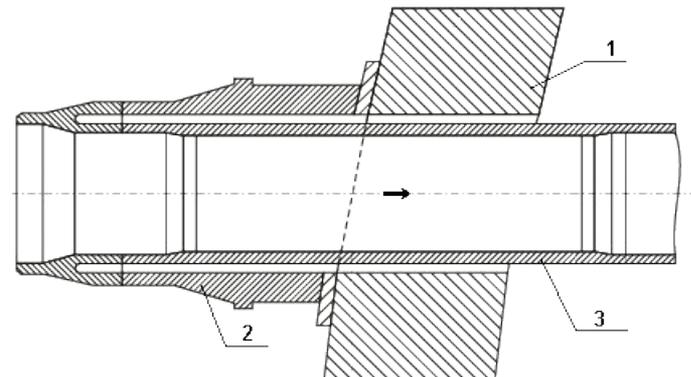
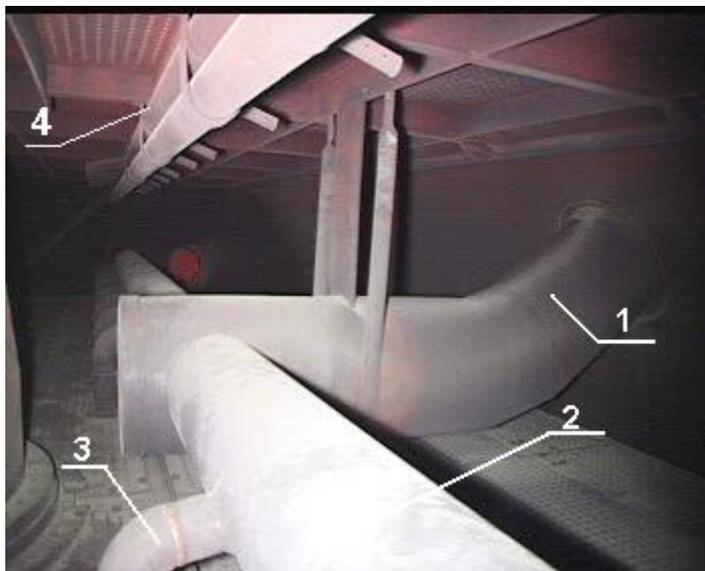
Конструкция ПГВ-1000М – подвод ПВ



- К коллектору Ду250 подсоединены раздающие коллекторы Ду80, имеющие по своей длине трубки Ду15 для выхода питательной воды.
- раздающие коллекторы расположены под ПДЛ и снабжены патрубками, направленными горизонтально над трубным пучком, навстречу друг другу.
- для раздающих коллекторов применяется нержавеющая сталь
- труба подвода питательной воды непосредственно не соприкасается с корпусом ПГ. Между трубой и корпусом ПГ имеется защитная паровая рубашка.

Конструкция ПГВ-1000М – подача аварийной ПВ

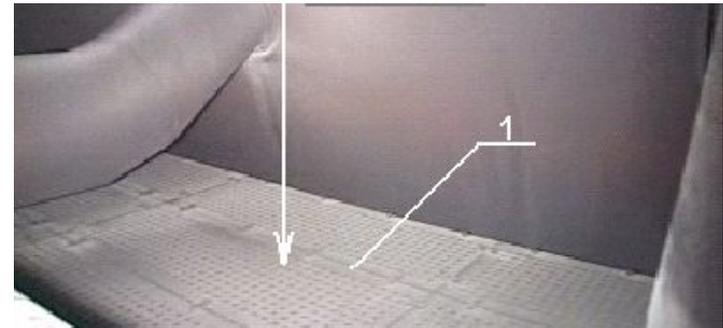
- подача аварийной п/в через патрубок 100 мм на холодном днище ПГ;
- раздающий коллектор 80 мм проходит через всю длину ПГ в паровом пространстве;
- 38 перфорированных трубок $d=25$ мм; материал устройства - сталь 08Х18Н10Т
- $t_{\text{апв}} = 5 - 45^{\circ}\text{C} \ll t_{2s}$ - тепловой удар, 5 - 8 циклов работы – только в режимах, связанных с нарушением нормальной эксплуатации и авариях
- конструкция патрубка - наличие защитной паровой рубашки - предотвратить контакт корпуса ПГ и трубы а/п/в



Конструкция ПГВ-1000М – погруженный дырчатый лист

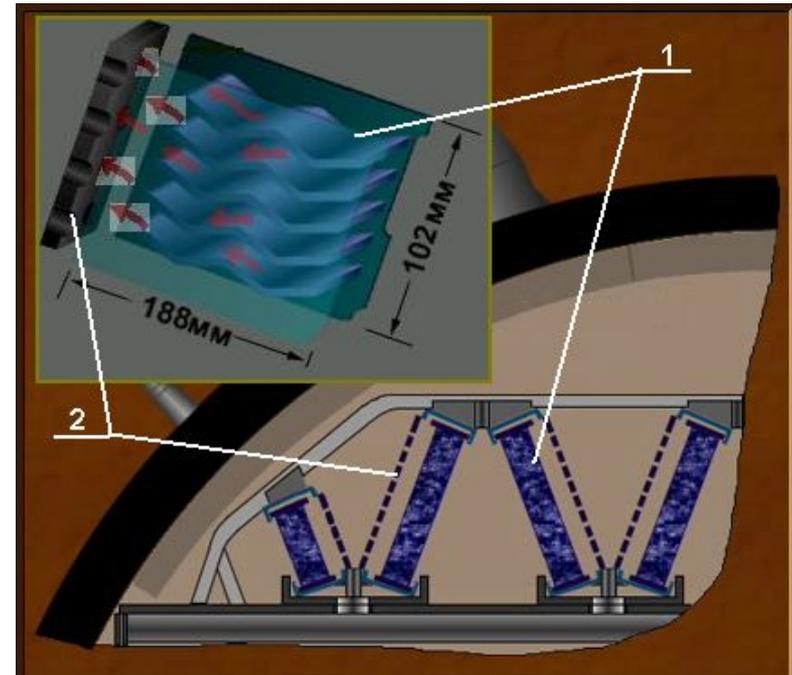
Погруженный дырчатый лист (ПДЛ)

- ПДЛ предназначен для выравнивания паровой нагрузки на зеркале испарения.
- ПДЛ состоит из каркаса (швеллер, двутавр) и съемных листов (> 70 шт) с отверстиями (диаметр 13 мм, степень перфорации 8%).
- Материал листов - нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Ширина листов меньше диаметра люков. Листы крепятся к каркасу
- ПДЛ расположен над трубным пучком (на 260 мм выше) в водяном объеме (ниже уровня воды на 100 мм).
- Между корпусом и ПДЛ – проходы (не менее 150 мм)
- По всему периметру ПГ на ПДЛ есть закраины – листы шириной 700 мм – для организации циркуляции воды в ПГ
- После модернизации - закраина ПДЛ со стороны горячего коллектора ликвидирована, проход закрыт листом



Конструкция ПГВ-1000 – сепарационные устройства

- В ПГВ-440 и ПГВ-1000 – двух-ступенчатая схема сепарации: гравитационная и принудительная
- Гравитационная сепарация пара - в паровом объеме (выше уровня воды ПГ)
- Жалюзийный сепаратор - пакеты жалюзи волнистой формы под углом 26° к вертикали на высоте 750 мм от ПДЛ
- жалюзи - пластины 0,6-0,8 мм из стали 12Х18Н10Т
- влажный пар движется по криволинейным каналам ЖС, влага - по стенкам в корыто и вниз по трубкам (под уровень воды)
- Паровой дырчатый лист (2 – на рисунке) предназначен для выравнивания поля скоростей пара

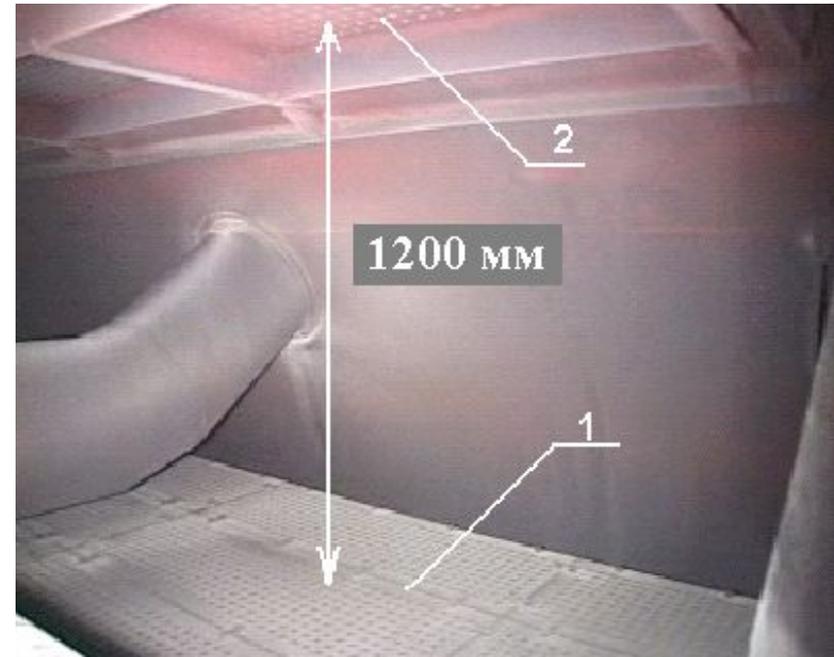


Конструкция ПГВ-1000М – сепарационные устройства

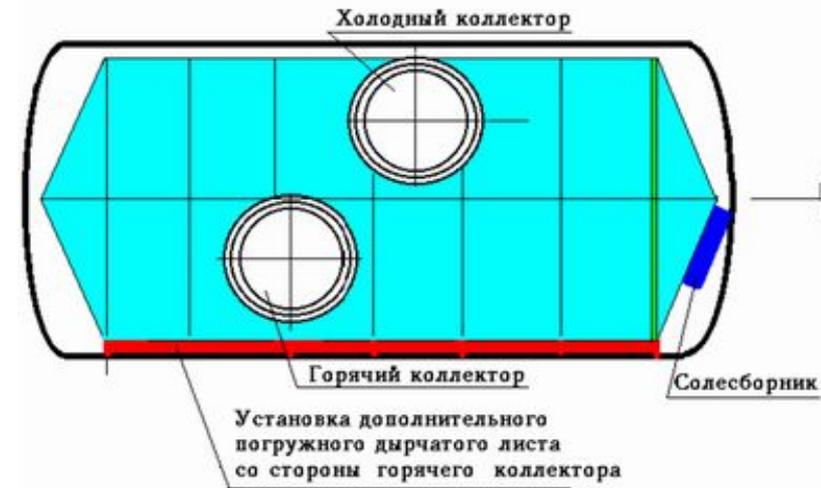
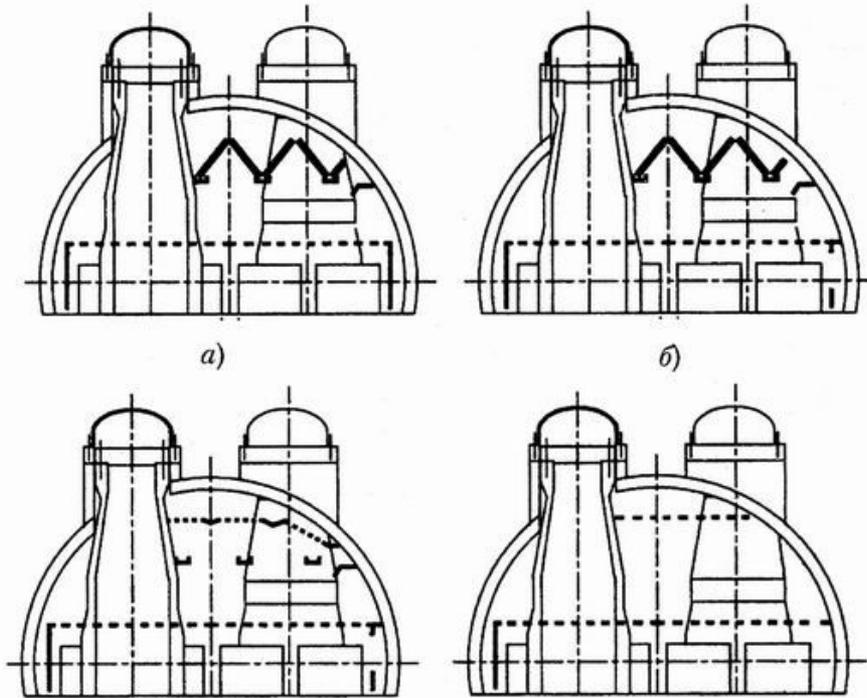
- В новых конструкциях ПГВ (с 1999 г.) ж. с. не применяется – увеличена высота парового пространства и установлен пароприемный дырчатый лист (ПпДЛ)
- ПпДЛ предназначен для выравнивания скоростей пара на выходе из парового пространства.
- ПпДЛ – набор листов с отверстиями 10 мм, расположен в паровом пространстве,
- Материал ПпДЛ – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Листы крепятся к каркасу

Отказ от ЖС позволяет:

- - увеличить запас по сепарационной характеристике в ПГ (обеспечение сухости пара при большем уровне в ПГ);
- - снизить металлоемкость, в том числе по применению коррозионно-стойких сталей аустенитного класса (до 4 тонн на 1 ПГ);
- - улучшить условия обслуживания и ремонта ПГ (свобода доступа)



Конструкция ПГВ-1000М – сепарационные устройства



Конструкция ПГВ-1000М – внутрикорпусные устройства

К внутрикорпусным устройствам относятся:

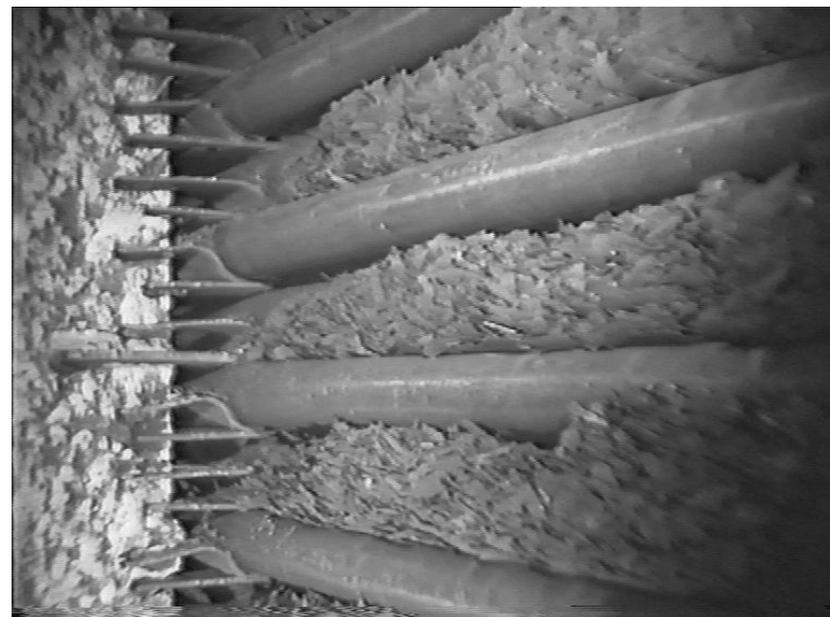
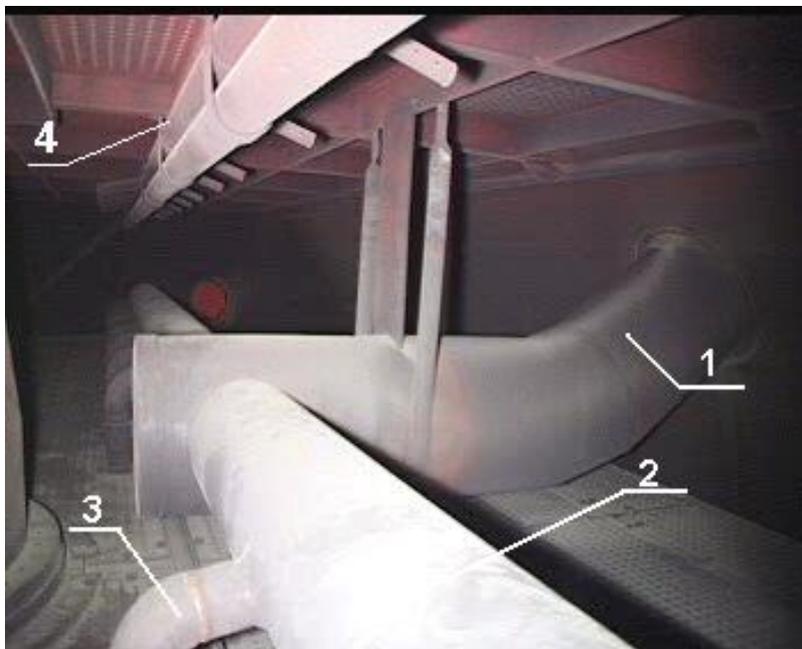
- ПДЛ и ПпДЛ,
- каркас пароприемного дырчатого листа;
- система опор трубного пучка;
- закраины погруженного дырчатого листа;
- защитное устройство на минусовом отборе однокамерного уровнемера;
- индикатор уровня - *расположен на погруженном дырчатом листе в центральной части ПГ, предназначен для проверки приборов измерения уровня;*
- датчик оперативного контроля уровнемеров - *расположен в районе «холодного» днища предназначен для проверки уровнемеров при работе ПГ на любом уровне мощности,*
- импульсные и пробо-отборные линии от индикатора уровня и датчика оперативного контроля уровнемеров,

Материал устройств – нержавеющая сталь 08X18H10T



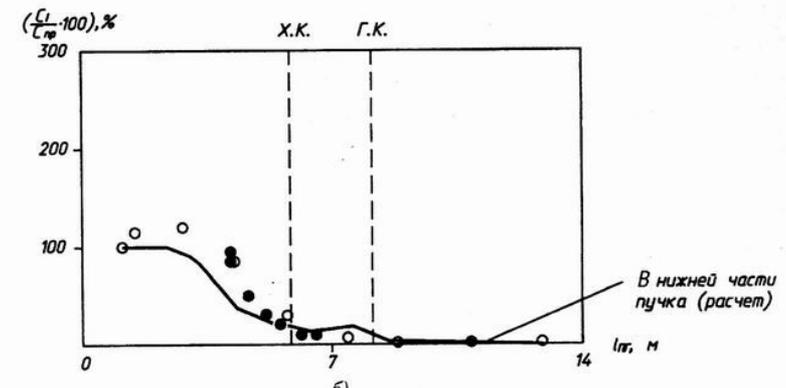
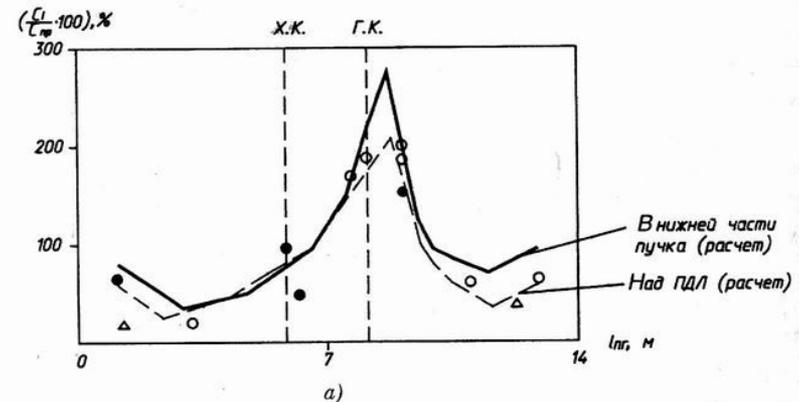
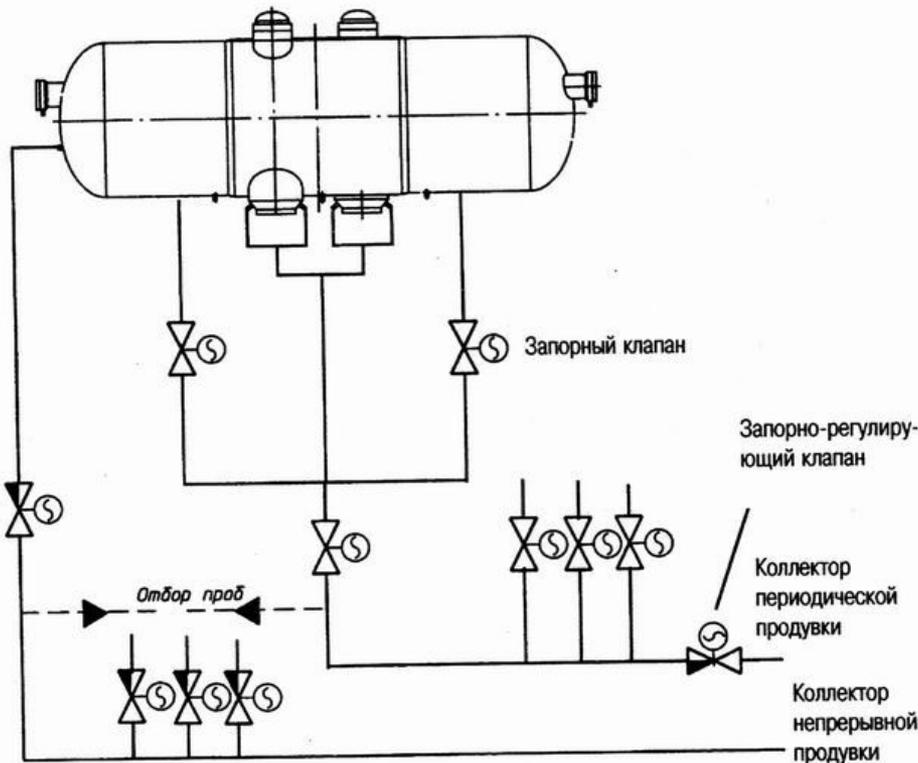
Конструкция ПГВ-1000М – устройство раздачи хим. реагентов

- Устройство раздачи химических реагентов расположено в паровом пространстве состоит из коллектора, имеющего по своей длине отверстия для выхода раствора химических реагентов. Материал - сталь 08Х18Н10Т (12Х18Н10Т)
- Используется при химической промывке ПГ (должна выполняться с периодичностью не реже одного раза в восемь лет).

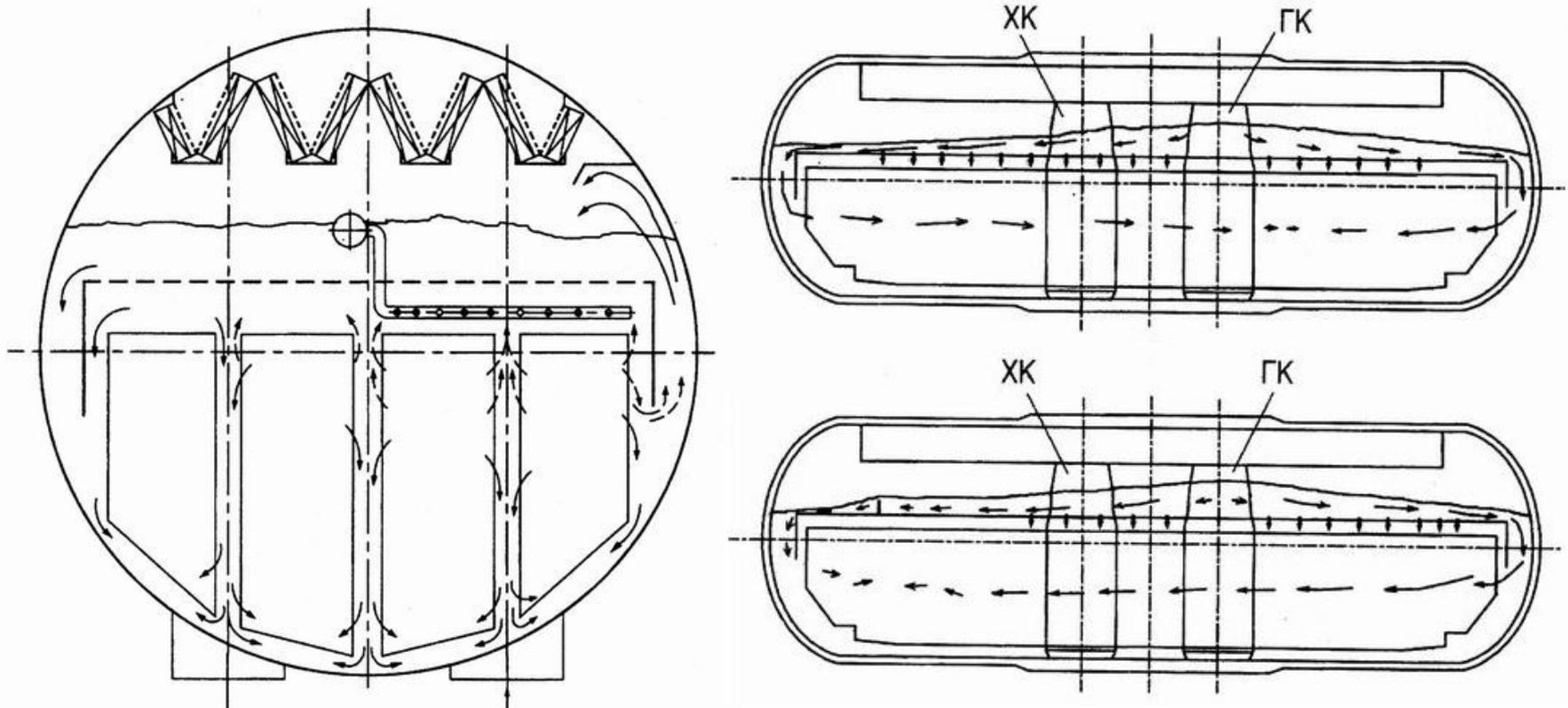


Конструкция ПГВ-1000М – система продувки

- продувка – отбор части п/г воды для удаления продуктов коррозии, солей и шлама для поддержания норм ВХР
- устройства для отвода воды в продувку включают: «солевой» отсек, 4 штуцера на нижней образующей корпуса ПГ и 4 штуцера из «карманов» коллекторов первого контура.
- постоянная продувка – из солевого отсека и периодическая (снизу ПГ и из карманов коллекторов)



Конструкция ПГВ-1000М



а) Схема циркуляции в средней части ПГ (до перекрытия зазора у ГК)

б) Циркуляция воды в продольном сечении ПГ до и после реконструкции системы раздачи п.в. и установки перегородки над ПДЛ

Конструкция ПГВ-1000М – опоры и гидроамортизаторы

Парогенератор в боксе устанавливается на две опорные конструкции.

Каждая из двух опор имеет ложемент опорный, основание, опору роликовую, соединительные тяги, закладные детали и крепежные элементы.

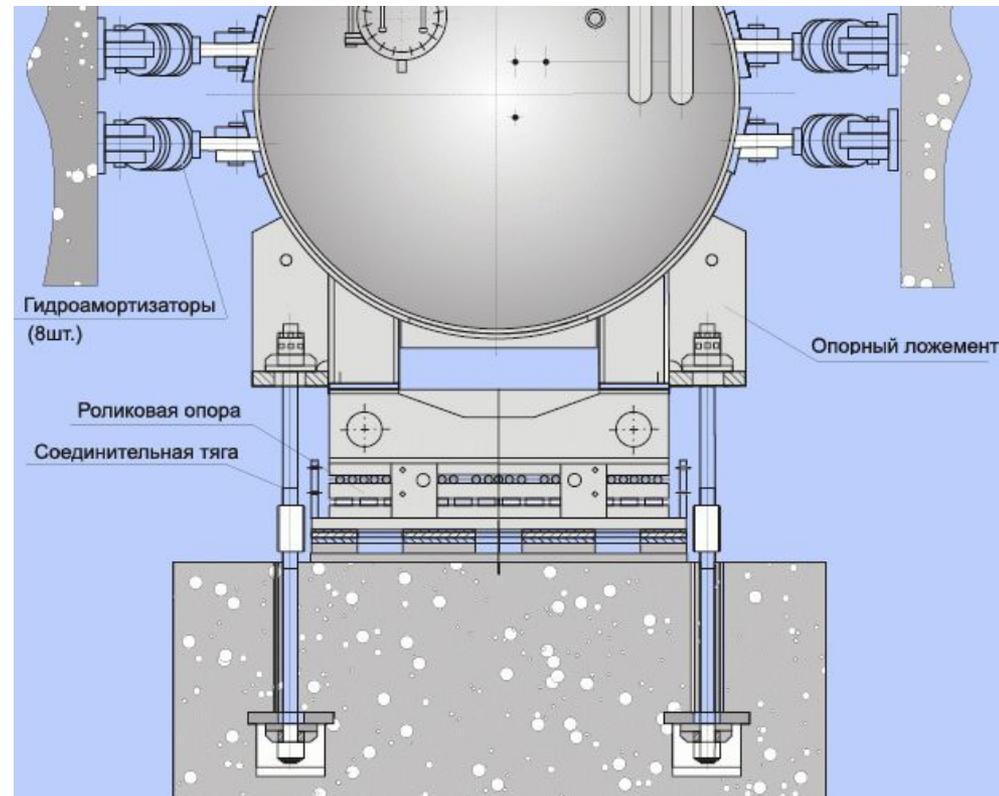
Ложементы привариваются к подкладным листам парогенератора.

Верхние плиты роликовых опор являются подвижными в направлении продольной и поперечной осей парогенератора, при этом перемещения могут быть ± 100 мм.

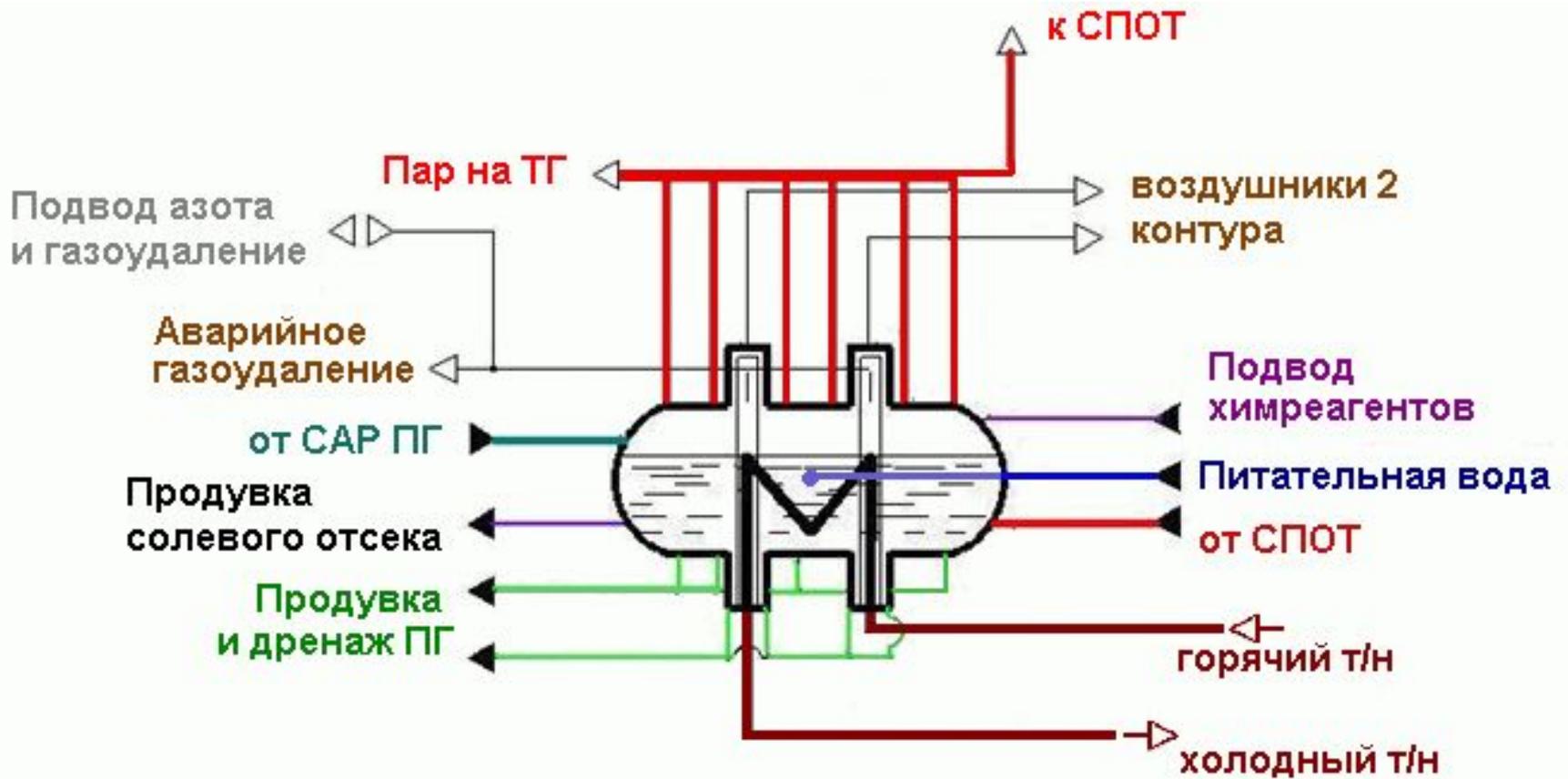
ПГ может свободно следовать за тепловыми перемещениями трубопроводов ГЦК.

Для восприятия сейсмических нагрузок на ПГ предусмотрена система гидроамортизаторов (8 шт. на ПГ).

Опорная конструкция ПГ рассчитана на восприятие одновременного действия сейсмической нагрузки максимального расчетного землетрясения и реактивного усилия, возникающего в аварийной ситуации при разрыве трубопровода ГЦК в горизонтальной плоскости (при разрыве со стороны реактора)



Входные и выходные потоки ПГВ-1000МКП



Конструкция ПГВ-1000МКП

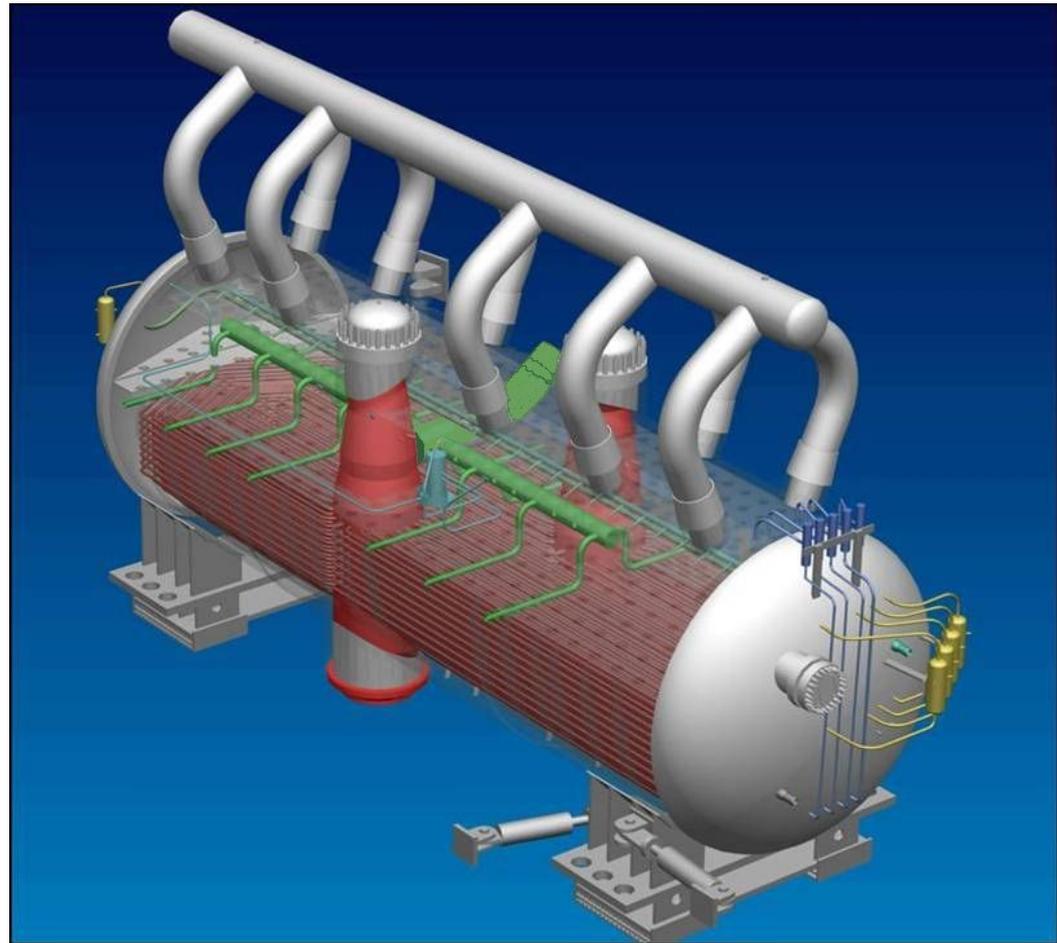
- Проект АЭС-2006 (ВВЭР-1200)
- Развитие конструкции ПГВ-1000М

ПГВ-1000МКП:

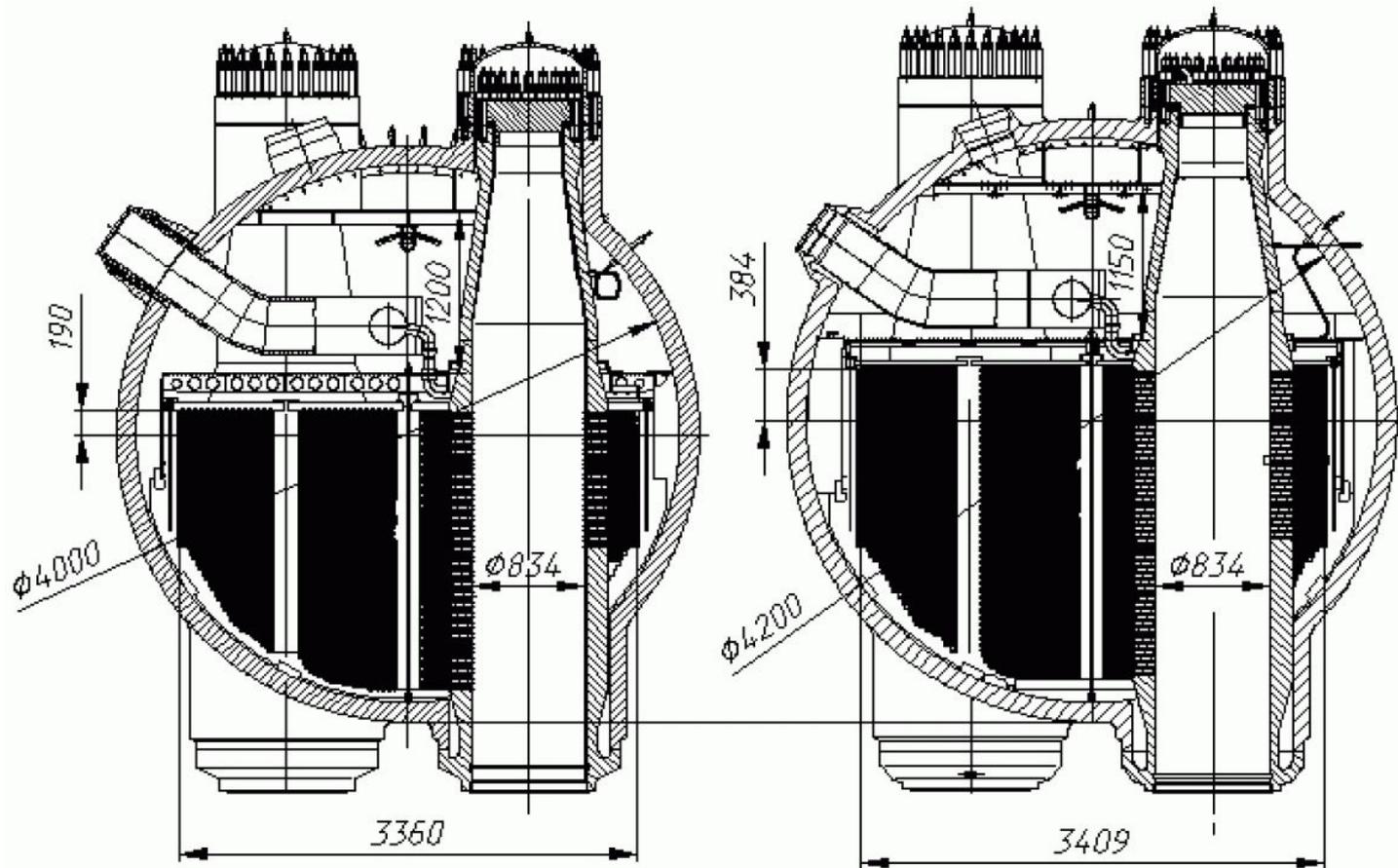
М – модернизированный по отношению к ПГВ-1000

К – с коридорным расположением труб в трубном пучке по отношению к ПГВ-1000 и ПГВ-1000М (шахматное расположение)

П – повышенной мощности (для блоков 1200 МВт)



Конструкция ПГВ-1000МКП



Увеличена тепловая мощность ПГ до 800 МВт.

Параметры пара: 7МПа, 285.8°C, параметры теплоносителя: 16.2 МПа, 330/299°C

Поверхность теплообмена не увеличена (6100 м²)

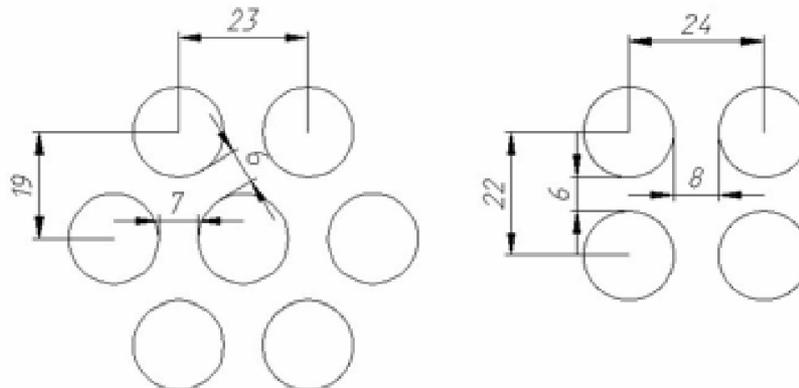
Применена коридорная компоновка, увеличен шаг

Проектный срок службы 60 лет

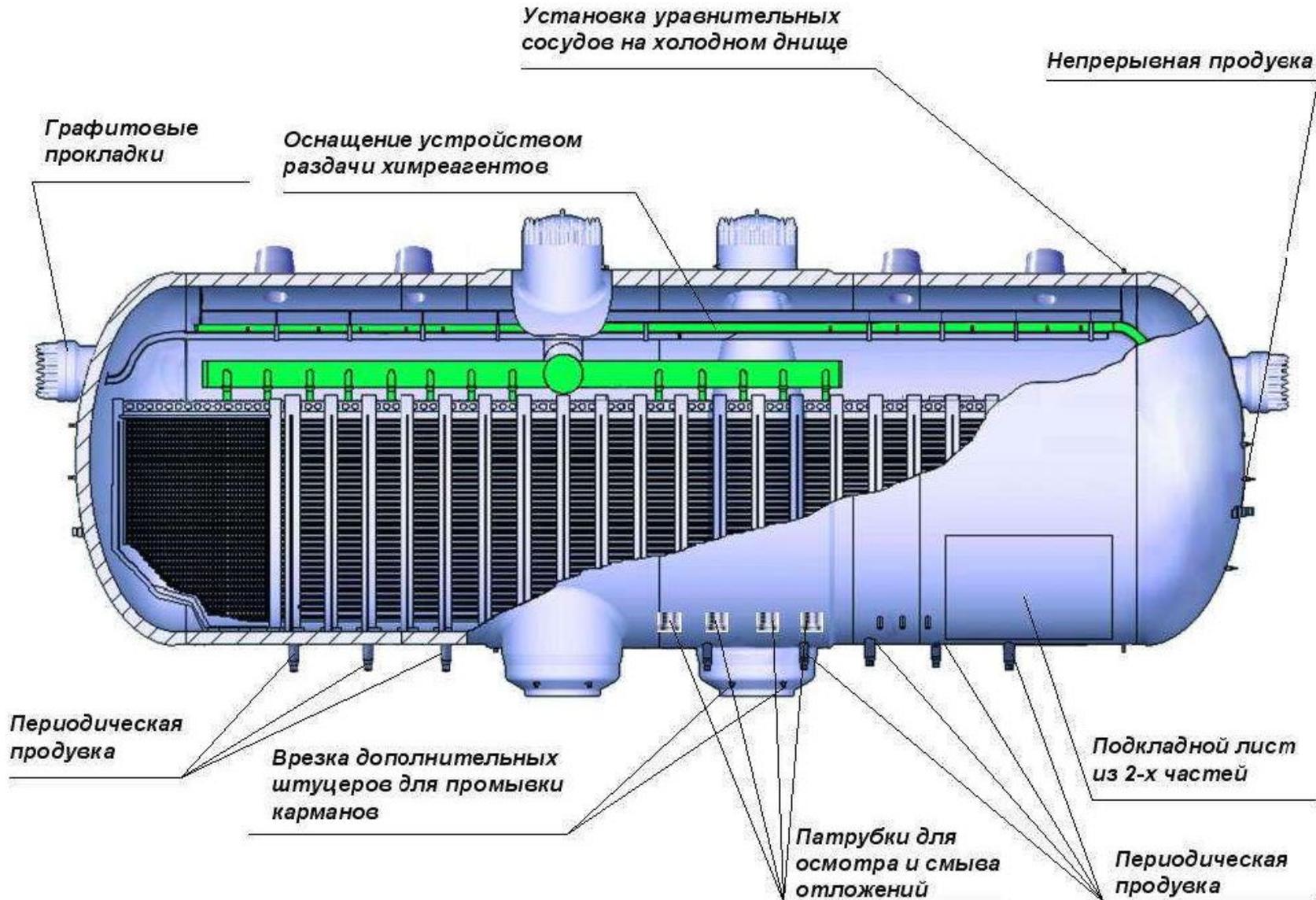
Конструкция ПГВ-1000МКП

Преимущества разреженной коридорной компоновки труб:

- увеличена скорость циркуляции в трубном пучке;
- снижена возможность забивания межтрубного пространства отслоившимся шламом;
- облегчен доступ в межтрубное пространство для инспекции;
- увеличен запас воды в парогенераторе;
- увеличено пространство под трубным пучком для облегчения удаления шлама;
- улучшено напряженное состояние коллектора теплоносителя первого контура.



Конструкция ПГВ-1000МКП



Тепло-гидравлические характеристики ПГВ в номинальном режиме эксплуатации

Наименование параметра	В-392М 1000МКП	В-320 1000М
Номинальная тепловая мощность, МВт	803	750
Паропроизводительность (номинальная), т/ч	1602	1470
Давление генерируемого пара на выходе из ПГ, МПа	7,0	6,27
Температура генерируемого пара, град. С → на выходе из коллектора пара ПГ → в корпусе ПГ	285,8 287	278,5
Влажность генерируемого пара на выходе из ПГ при номинальном уровне воды в ПГ, % не более	0,2	0,2
Номинальный расход теплоносителя 1 контура, куб. м/ч	21500	21200
Т теплоносителя 1 контура, град. С → на входе в ПГ → на выходе из ПГ	328,9 298,2	320 290
Потеря давления теплоносителя 1 контура в ПГ, МПа	0,13	0,12
Потеря давления в ПГ по паровому тракту, МПа, не более	0,12	0,10
Потеря давления по тракту устройства подачи и раздачи питательной воды, МПа, не более	0,064	0,049

Геометрические и весовые характеристики ПГ

Наименование параметра	В-392М 1000МКП	В-320 1000М
Длина ПГ, мм	13840	13840
высота коллектора с крышками, мм	5515	
Внутренний диаметр, мм	4200	4000
Полный объем теплоносителя по 1 контуру, м ³	21	20,5
Полный объем воды в ПГ по 2 контуру, м ³	150,2	125
Масса воды в ПГ по 2 контуру при номинальной мощности и номинальном уровне в ПГ, т	от 53 до 59,1	52
Масса, т → ПГ в сухом виде → коллектора пара → опоры	330 7,2 32	317
Масса ПГ (собственно парогенератор, коллектор пара, опоры, закладные детали, уравнительные сосуды, гидроамортизаторы)		436

Наименование	ПГВ-440	ПГВ-640	ПГВ-1000М	ПГВ-1000У	ПГВ-1000МКП	ПГВ-1600
Тепловая мощность, МВт	229	450	750	750	800	1087,5
Паропроизводительность, кг/с (т/ч)	125 (450)	254 (913)	408 (1470)	408 (1470)	445 (1600)	613,8 (2210)
Давление генерируемого пара, МПа	4,61	7,06	6,27	6,27	7,0	7,80
Температура пара, °С	258,9	286,5	278,5	278,5	287	293
Температура теплоносителя на входе/выходе, °С	297/270	322/295	320/289	322/292	329/298	330,2/298,6
Давление теплоносителя, МПа	12,26	15,7	15,7	15,7	16,14	16,2
Расход теплоносителя, м ³ /ч	7100	14000	21200	21500	21400	28440
Температура питательной воды, °С	164 - 223	164 - 230	164 - 220	164 - 220	225	164-230
Средняя приведенная скорость пара на зеркале испарения, м/с	0,21 ¹⁾	0,24	0,31 ²⁾	0,31 ²⁾	0,33 ²⁾	0,27 ²⁾
Удельная тепловая нагрузка поверхности нагрева, кВт/м ² ³⁾	90	106	123	146	131	118
Диаметр корпуса (внутренний), м	3,2	3,8	4,0	4,0	4,2	4,8
Материал корпуса	22К	10ГН2МФА	10ГН2МФА	10ГН2МФА	10ГН2МФА	10ГН2МФА
Материал перфорированной части коллектора	08Х18Н10Т	08Х18Н10Т-ВД	10ГН2МФА-III	08Х18Н10Т-ВД	10ГН2МФА-III	10ГН2МФА-III
Наличие экономайзера	нет	нет	нет	нет	нет	есть
Диаметр теплообменных труб, мм	16	16	16	16	16	16
Толщина теплообменных труб, мм	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5 1,4 ⁷⁾	1,3/1,2 ⁵⁾
Шаг (вертикальный/горизонтальный) в экономайзере, мм	-	-	-	-	-	20/19
Расположение труб в испарителе в экономайзере ⁶⁾	коридорное	коридорное	шахматное	шахматное	коридорное	коридорное шахматное
Поверхность теплообмена, м ²	2577	4223	6115	5127	6105	9212
Количество труб	5536	8320	11000	9157	10978	14750
Средняя длина труб, м	9,26	10,10	11,10	11,14	11,1	12,43
Наличие ПДЛ	нет ⁸⁾	локальный	есть	есть	есть	есть
Наличие жалюзийного сепаратора	есть	нет	нет ¹⁾	нет	нет	нет

Основные технические характеристики современных АЭС с легководными реакторами

Характеристики	ВВЭР-1000	АЭС-2006	ВВЭР-ТОИ	EPR-1600 (AREVA)	AP-1000 (Westingaus)	APWR+ (M+W)
Тепловая мощность реактора, МВт	3000	3200	3300	4500	3400	5000
Электрическая мощность блока, МВт	1000	1200	1238	1600	1117	1750
КПД	0,333	0,375	0,375	0,356	0,329	0,350
Температура теплоносителя, °С						
- на входе в реактор	289	298	297,2	295	278	291
- на выходе из реактора	320	329,7	328,8	327,2	321	327
Давление, МПа						
- в первом контуре	15,7	16,2	16,2	15,0	15,0	15,5
- генерируемого пара	6,27	7,0	7,0	7,5	5,5	6,9
Температура пара, °С	278,47	285,83	285,83	290,54	269,97	284,86
Средне-логарифмический температурный напор, °С	22,59	24,72	23,77	-	23,26	18,69
Минимальный температурный напор, °С	10,53	12,17	11,37	-	8,03	6,14
Теплообменная поверхность ПГ, м ²	6100x4	6100x4	6660x4	7960x4	11600x2	6500x4