

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **032753**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2019.07.31

(51) Int. Cl. *F22B 1/02* (2006.01)
F28D 7/00 (2006.01)

(21) Номер заявки
201650102

(22) Дата подачи заявки
2015.12.09

(54) **ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ ПАРОГЕНЕРАТОР ДЛЯ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ВОДО-ВОДЯНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕАКТОРОМ И РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА С УКАЗАННЫМ ПАРОГЕНЕРАТОРОМ**

(31) 2014150427

(72) Изобретатель:

(32) 2014.12.12

Лахов Дмитрий Александрович,

(33) RU

Сафронов Алексей Владимирович

(43) 2017.09.29

(RU)

(86) PCT/RU2015/000785

(74) Представитель:

(87) WO 2016/093736 2016.06.16

Черных И.В. (RU)

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

(56) RU-U1-143541

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

RU-C1-2106026

"ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО

RU-C1-2226722

ЗНАМЕНИ И ОРДЕНА ТРУДА ЧССР

RU-C2-2231144

ОПЫТНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ

БЮРО "ГИДРОПРЕСС" (RU)

(57) Изобретение относится к электроэнергетике, в частности к горизонтальным парогенераторам для атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) и к реакторной установке с ВВЭР и горизонтальным парогенератором. Реакторная установка с ВВЭР с горизонтальным парогенератором включает в себя ядерный реактор с четырьмя циркуляционными петлями, каждая из которых содержит парогенератор с горизонтальным пучком теплообменных труб, разделенных на пакеты межтрубными коридорами и соединенных с коллекторами теплоносителя первого контура внутри цилиндрического корпуса с эллиптическими днищами, главный циркуляционный насос, а также главный циркуляционный трубопровод теплоносителя первого контура. Внутренний диаметр корпуса $D_{корп}$, расстояние S между осями коллекторов теплоносителя первого контура в поперечном направлении и длина парогенератора L_k по внутренним поверхностям эллиптических днищ выбраны соответственно из соотношений:

$$0,148 \cdot D + 0,637 \cdot \sqrt{0,054 \cdot D^2 + 3,142 \cdot \frac{N_{тр} \cdot S \cdot S_k}{k}} \leq D_{корп} \leq 1,827 \cdot H; \quad 0,4 \leq \frac{S}{D_{корп}} \leq 0,6,$$

$$L_k = D_{кол} + 2 \cdot \left[\left(ctg \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \right) \cdot \left(\frac{B_1}{2} + B_2 + \left(\frac{\pi \cdot D_{кол}}{4 \cdot S_{кол}} - 1 \right) \cdot S_r \right) + \left(\frac{\pi \cdot D_{кол}}{4 \cdot S_{кол}} - 1 \right) \cdot S_r \cdot \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} + \Delta \right] + \frac{H_{итг} \cdot 10^6}{\pi \cdot d \cdot N_{итг}}$$

где D - номинальная паропроизводительность парогенератора, т/ч; $N_{тр}$ - количество теплообменных труб в корпусе парогенератора, шт.; S_b и S_r - шаг между теплообменными трубами соответственно в вертикальном и горизонтальном ряду теплообменного пучка, мм; k - признак компоновки теплообменного пучка в пакетах; H - высота наполнения корпуса парогенератора трубами, мм; $D_{кол}$ - наружный диаметр коллектора первого контура в зоне сверления, мм; α - центральный угол изгиба теплообменных труб, °; B_1 и B_2 - ширина центрального коридора пучка теплообменных труб и ширина коридора пучка теплообменных труб, расположенного напротив коллектора теплоносителя, соответственно, мм; $S_{кол}$ - окружной шаг теплообменных труб по наружной поверхности коллектора теплоносителя, мм; $H_{итг}$ - площадь теплообменной поверхности парогенератора, м²; d - наружный диаметр теплообменных труб, мм; Δ - расстояние от внешней трубы теплообменного пучка до внутренней поверхности днища парогенератора по продольной оси парогенератора, мм; при этом угол α изгиба теплообменных труб и расстояние Δ выбраны из следующих диапазонов: $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ и $300 \text{ мм} \leq \Delta \leq 1000 \text{ мм}$.

B1**032753****032753****B1**

Изобретение относится к электроэнергетике, в частности к горизонтальным парогенераторам для атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) и к реакторной установке с ВВЭР и горизонтальным парогенератором.

В атомных электростанциях (АЭС) с реакторами типа ВВЭР важнейшим элементом первого контура реакторной установки (РУ) является парогенератор. В нем за счет тепла, получаемого в реакторе, вырабатывается пар, который затем используется как рабочее тело турбины для производства электроэнергии. Кроме выработки пара, парогенераторы должны надежно и постоянно во всех режимах работы АЭС обеспечивать охлаждение активной зоны реактора.

При работе парогенератора через него прокачивается высокорadioактивный теплоноситель первого контура. По этой причине парогенераторы АЭС располагаются внутри защитной гермооболочки (контейнмента) реакторного здания, и габариты парогенераторов существенно влияют размеры защитной гермооболочки.

Со времени создания реакторных установок для атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) сложились два различных подхода к конструкции парогенераторов - парогенераторы вертикального типа и парогенераторы горизонтального типа. В первом случае парогенератор имеет вертикально расположенный корпус и вертикально ориентированные U-образные теплообменные трубы, заделанные в горизонтальную трубную доску. Во втором случае парогенератор имеет горизонтально расположенный корпус и горизонтально ориентированные теплообменные трубы, заделанные в вертикально установленные входной и выходной коллекторы теплоносителя первого контура. В настоящее время обе конструктивные концепции оформились в устойчивые, но отличающиеся друг от друга направления развития техники. Причем изобретение относится к концепции горизонтальных парогенераторов и к их использованию в составе реакторных установок в совокупности с реакторами типа ВВЭР.

Из уровня техники известны различные варианты конструкции горизонтальных парогенераторов, различающиеся между собой надежностью, габаритами, мощностью, плотностью компоновки пучка теплообменных труб, расположением внутрикорпусных устройств, металлоемкостью и др. характеристиками.

Парогенератор, раскрытый в международной заявке WO 93/20386, опубликованной 14.10.1993; МПК F22B 1/02, имеет горизонтально ориентированный корпус и расположенный в нем горизонтально пучок теплообменных труб, заделанных в вертикально установленные входной и выходной коллекторы теплоносителя первого контура. При этом устройство раздачи питательной воды расположено в середине пучка теплообменных труб, что приводит к значительному горизонтальному разрыву в наполнении корпуса парогенератора теплообменной поверхностью. Следствием недостаточного наполнения корпуса парогенератора теплообменными трубами является низкая мощность, повышенная металлоемкость и меньшая долговечность парогенератора реакторной установки вследствие меньшего количества теплообменных труб.

Известен горизонтальный парогенератор, описанный в патенте РФ на полезную модель № 100590, опубликованном 20.12.2010, МПК F22B 37/00. Горизонтальный парогенератор содержит корпус, к каждому торцу которого приварено эллиптическое днище, содержащее патрубок ревизии с плоской крышкой в котором, согласно предлагаемой полезной модели, отношение средней высоты патрубка ревизии к внутреннему диаметру патрубка ревизии составляет не более 0,9 и не менее 0,1. Данное техническое решение направлено на уменьшение габаритов парогенератора для упрощения его доставки от завода-изготовителя к месту монтажа и увеличения свободного пространства в боксе парогенератора. Уменьшение продольных габаритов достигается путем выполнения более коротким патрубка ревизии, а не за счет изменения длины корпуса парогенератора, т.е. снижение металлоемкости в данном устройстве не достигается.

Зарубежными аналогами производимых в России реакторов ВВЭР являются реакторы типа PWR (реактор с водой под давлением, англ.: pressurized water reactor). Реакторные установки с реакторами типа PWR обычно оснащаются вертикальными парогенераторами.

В отличие от упомянутых парогенераторов с вертикально расположенным корпусом горизонтальные парогенераторы обладают следующими известными особенностями, вытекающими из их конструкции:

умеренная паровая нагрузка допускает использование простой схемы сепарации при надежном обеспечении требуемой влажности пара;

умеренная скорость среды во втором контуре исключает опасность вибрации теплообменных труб и других элементов парогенератора;

вертикальные цилиндрические входной и выходной коллекторы первого контура позволяют избежать накопления шламовых отложений на их поверхности и за счет этого снизить опасность коррозионного повреждения теплообменных труб в районе мест заделки их в указанные коллекторы;

повышенный запас воды во втором контуре способствует более надежному расхолаживанию реактора через парогенератор в случае использования аварийного водопитания, а большая аккумулирующая способность такого парогенератора смягчает переходные режимы эксплуатации реакторной установки;

горизонтальное расположение поверхности теплообмена обеспечивает надежную естественную

циркуляцию среды по первому контуру даже при снижении уровня воды ниже верхних рядов теплообменных труб;

обеспечиваются благоприятные условия для естественной циркуляции теплоносителя первого контура в аварийных режимах;

обеспечивается удобный доступ к пучку теплообменных труб для обслуживания и контроля как со стороны первого контура, так и второго контура. В нижних точках корпуса парогенератора, где возможно оседание и накопление шлама, нет теплообменных труб, поэтому в случае скопления коррозионно-активных примесей в нижней части корпуса парогенератора возможен смыв шлама через систему продувки и штуцеры.

Из уровня техники известны разработки, относящиеся к атомной промышленности, включающие в себя создание горизонтальных парогенераторов на базе использования опыта конструирования вертикальных парогенераторов. Например, из патента США US № 5331677, опубликованного 19.07.1994, МПК F22B 37/00, известна реакторная установка, оснащенная реактором с водой под давлением, которая включает в себя реактор, насос для перекачивания охлаждающей жидкости, имеющий входное отверстие, соединенное с выпускным отверстием корпуса реактора, парогенератор, имеющий входное отверстие, соединенное с высокотемпературным трубопроводом на выходе упомянутого насоса, и выход низкотемпературного трубопровода, подсоединенный к входному отверстию корпуса реактора. Парогенератор имеет горизонтально ориентированный корпус, внутри которого размещен горизонтально U-образный пучок теплообменных труб. Теплообменные трубы заделаны в вертикально расположенную трубную доску. Использование трубной доски в конструкции горизонтального парогенератора имеет недостатки, связанные с большой металлоемкостью, сложностью изготовления, сложностью обеспечения герметичности соединения теплообменных труб с трубной доской. Использование трубной доски не позволяет разместить большое количество труб в парогенераторе, как следствие - они имеют значительную длину. Конструкция упомянутого парогенератора приблизительно соответствует конструкции парогенераторов вертикального типа, который в составе данной реакторной установки размещен горизонтально. Особенностью реакторной установки является небольшое количество труб в ее парогенераторах, вследствие того, что в раздающей камере установлена одна трубная доска, т.е. вся теплообменная поверхность обеспечивается одной петлей U-образных труб. Как следствие, теплообменные трубы имеют большую длину и небольшую толщину боковой стенки. Это приводит к снижению эксплуатационной надежности реакторной установки, так как ее парогенераторы имеют меньший запас на глушение теплообменных труб и большее гидравлическое сопротивление теплообменных труб со стороны первого контура, что негативно сказывается на протекании аварийных режимом.

Еще одним недостатком реакторной установки является радиальное расположение ее парогенераторов, приводящее к увеличению размеров реакторного здания. Это усложняет объем контейнмента и объем капитального строительства.

На действующих атомных электростанциях в России и за рубежом с точки зрения надежности и экономичности хорошо зарекомендовали себя реакторные установки типа ВВЭР-1000. Естественно, что в процессе длительной эксплуатации периодически выявляются узлы и детали реакторной установки, требующие усовершенствования.

Так, в патенте РФ на полезную модель № 143541, опубликованном 27.07.2014, МПК G21C 1/03, описана реакторная установка (РУ) типа ВВЭР-1000, которая имеет четыре петли циркуляции теплоносителя первого контура, в каждой из которых установлен парогенератор типа ПГВ-1000 и главный циркуляционный насос (ГЦН). Петля циркуляции теплоносителя первого контура РУ состоит из двух частей. Первая часть - это горячий циркуляционный трубопровод, соединяющий РУ с парогенератором, и вторая часть - это холодный циркуляционный трубопровод, по которому из парогенератора теплоноситель первого контура откачивается при помощи ГЦН в реактор. Функцией каждой петли циркуляции РУ является беспрепятственная транспортировка теплоносителя первого контура из реактора через парогенератор и ГЦН обратно в реактор. Основной функцией парогенератора является выработка сухого насыщенного пара за счет тепла, переносимого в парогенератор из активной зоны ядерного реактора теплоносителем первого контура. РУ, парогенератор и ГЦН соединяются между собой сварным трубопроводом, имеющим внутренний диаметр 850 мм. Причем РУ соединяется с парогенератором ГЦТ, имеющим вертикальный гиб трубы радиусом 1340 мм. Под напором горячей воды первого контура происходят тепловое расширение и вибрация всех систем первого контура. На изгибы трубопроводов и сварные соединения петли циркуляции первого контура оказывается воздействие теплоносителем при высоком давлении и температуре, что может привести к их повреждениям вплоть до образования трещин. Полезная модель, в частности, направлена на решение задачи предотвращения повреждений сварного шва № 111 на циркуляционном трубопроводе.

Для решения указанной проблемы предлагается горячий коллектор парогенератора соединить с горячим циркуляционным трубопроводом через малый коллектор, так чтобы длина горячего циркуляционного трубопровода от нижнего края малого коллектора до изгиба горячего циркуляционного трубопровода не превышала 0,25 м, а длина холодного циркуляционного трубопровода была бы выполнена соответственно длине горячего циркуляционного трубопровода.

Недостатком данной полезной модели является усложнение конструкции и технологии изготовления парогенератора. Дополнительный малый коллектор предложено приваривать к основному выходному коллектору через дополнительное сварное соединение, невозможность проведения ремонта которого снижает эксплуатационную надежность парогенератора и реакторной установки.

Задачей заявленного изобретения является улучшение эксплуатационных показателей реакторной установки за счет увеличения количества теплообменных труб в корпусе парогенератора без существенного увеличения его габаритов с возможностью размещения его в боксах здания реакторной установки без увеличения объемов капитального строительства.

Кроме того, показатель количества теплообменных труб в парогенераторе важен для повышения мощности парогенератора, для улучшения параметров пара, в частности давления, что, в свою очередь, позволяет повысить КПД реакторной установки. Увеличение количества теплообменных труб в корпусе парогенератора также повышает показатели долговечности его эксплуатации, поскольку при наличии запасного количества теплообменных труб, при выходе из строя одной или нескольких труб, они могут быть заглушены с продолжением эксплуатации устройства. При увеличении количества теплообменных труб в корпусе парогенератора, работающего в составе реакторной установки, реактор лучше расхолаживается, т.е. повышается коэффициент запаса до кризиса теплопередачи в активной зоне реактора. Увеличение количества теплообменных труб в корпусе парогенератора также снижает показатель металлоемкости корпуса, поскольку повышение мощности устройства достигается в корпусе меньшего размера.

Технический результат от использования заявленного изобретения заключается в повышении интенсивности теплопередачи, надежности и долговечности парогенератора за счет повышения количества теплообменных труб, размещенных в его корпусе, при одновременном обеспечении условий ремонтно-пригодности и технологичности изготовления U-образных труб, а также снижении металлоемкости корпуса парогенератора.

Технический результат от использования заявленного изобретения также заключается в повышении надежности, долговечности и эффективности работы реакторной установки, а также в снижении металлоемкости парогенераторов реакторной установки при обеспечении технологичности их изготовления.

Для решения поставленной задачи заявлен горизонтальный парогенератор для реакторной установки с водо-водяным энергетическим реактором, содержащий цилиндрический корпус, снабженный, по меньшей мере, патрубком подвода питательной воды и патрубком отвода пара, а также двумя эллиптическими днищами, внутрикорпусными устройствами, входным и выходным коллекторами теплоносителя первого контура, соединенными с пучком теплообменных труб, образующим теплообменную поверхность парогенератора, причем пучок теплообменных труб разделен на пакеты межтрубными коридорами, отличающийся тем, что

расстояние S между осями коллекторов теплоносителя первого контура в поперечном направлении корпуса парогенератора выбрано из соотношения

$$0,4 \leq \frac{S}{D_{\text{корп}}} \leq 0,6,$$

где $D_{\text{корп}}$ - внутренний диаметр корпуса парогенератора,

а длина парогенератора L_k по внутренним поверхностям эллиптических днищ выбрана из соотношения

$$L_k = D_{\text{кол}} + 2 \cdot \left[\left(ctg \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \right) \cdot \left(\frac{B_1}{2} + B_2 + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_r \right) + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_r \cdot \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} + \Delta \right] + \frac{H_{\text{пто}} \cdot 10^6}{\pi \cdot d \cdot N_{\text{тр}}},$$

где $D_{\text{кол}}$ - наружный диаметр коллектора теплоносителя в сверленной части, мм;

α - центральный угол изгиба теплообменных труб, град.;

B_1 - ширина центрального межтрубного коридора пучка теплообменных труб, мм;

B_2 - ширина межтрубного коридора пучка теплообменных труб, расположенного напротив коллектора теплоносителя, мм;

$S_{\text{кол}}$ - окружной шаг теплообменных труб по наружной поверхности коллектора теплоносителя, мм;

S_r - шаг между теплообменными трубами в горизонтальном ряду теплообменного пучка, мм;

$H_{\text{пто}}$ - площадь теплообменной поверхности парогенератора, м²;

$N_{\text{тр}}$ - количество теплообменных труб в парогенераторе, шт.;

d - наружный диаметр теплообменных труб, мм;

Δ - расстояние от внешней трубы теплообменного пучка до внутренней поверхности днища парогенератора по продольной оси парогенератора,

при этом центральный угол α изгиба теплообменных труб и расстояние Δ выбраны из следующих диапазонов: $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ и $300 \leq \Delta \leq 1000$ мм.

От выбора расстояние S между осями коллекторов теплоносителя первого контура в поперечном направлении корпуса парогенератора из указанного выше эмпирического соотношения зависит возможность размещения в парогенераторе наибольшего количества теплообменных труб при обеспечении условий ремонтнопригодности, надежности и эффективности теплопередачи.

От выбора длины L_k корпуса парогенератора зависит компоновка реакторной установки в реакторном здании, поскольку четыре крупногабаритных парогенератора сложно вписать в ограниченные размеры контейнента. При этом длина L_k корпуса парогенератора, выбранная в соответствии с заявленным изобретением, гарантирует технологичность изготовления U-образных труб теплообменного пучка, формирующих теплопередающую поверхность парогенератора, что важно для обеспечения их цельности и надежности работы реакторной установки.

В соответствии с заявленным изобретением теплообменный пучок парогенератора заполнен теплообменными трубами равномерно снизу доверху с зазорами между соседними трубами по вертикали, не превышающими вертикальный шаг труб в пучке. Пучок разделен на пакеты межтрубными коридорами. Ширина вертикальных межтрубных коридоров составляет 100-250 мм. Горизонтально расположенные теплообменные трубы заведены в отверстия вертикально установленных коллекторов теплоносителя первого контура. Изгиб теплообменных труб при соединении с коллектором теплоносителя выполнен радиусом не менее 60 мм, предпочтительно не менее 100 мм. Для соблюдения требований прочности боковых стенок коллектора теплоносителя площадь зоны его сверления на наружной поверхности не менее чем на 20% должна превышать площадь отверстий, выполненных в нем, для присоединения теплообменных труб.

Кроме того, парогенератор в качестве внутрикорпусных устройств может содержать, по меньшей мере, следующие устройства: устройство подвода и раздачи питательной воды, расположенное над пучком теплообменных труб; устройство подвода и раздачи питательной воды в аварийных режимах, расположенное в паровом пространстве; устройство подачи химических реагентов при промывке парогенератора, погруженный дырчатый лист и потолочный дырчатый лист.

Вторым объектом заявленного изобретения является реакторная установка с водо-водяным энергетическим реактором и горизонтальным парогенератором, включающая ядерный реактор с четырьмя циркуляционными петлями, каждая из которых содержит парогенератор с горизонтальным пучком теплообменных труб, разделенных на пакеты межтрубными коридорами и соединенных с коллекторами теплоносителя первого контура внутри цилиндрического корпуса с эллиптическими днищами, главный циркуляционный насос, а также главный циркуляционный трубопровод теплоносителя первого контура, причем внутренний диаметр корпуса $D_{\text{корп}}$, расстояние S между осями коллекторов теплоносителя первого контура в поперечном направлении и длина парогенератора L_k по внутренним поверхностям эллиптических днищ выбраны соответственно из соотношений:

$$0,148 \cdot D + 0,637 \cdot \sqrt{0,054 \cdot D^2 + 3,142 \cdot \frac{N_{\text{тр}} \cdot S_{\text{г}} \cdot S_{\text{в}}}{k}} \leq D_{\text{корп}} \leq 1,827 \cdot H,$$

$$0,4 \leq \frac{S}{D_{\text{корп}}} \leq 0,6,$$

$$L_k = D_{\text{кол}} + 2 \cdot \left[\left(\text{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \right) \cdot \left(\frac{B_1}{2} + B_2 + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_{\text{г}} \right) + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_{\text{г}} \cdot \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} + \Delta \right] + \frac{H_{\text{пто}} \cdot 10^6}{\pi \cdot d \cdot N_{\text{тр}}},$$

где: D - номинальная паропроизводительность парогенератора, т/ч;

$N_{\text{тр}}$ - количество теплообменных труб в корпусе парогенератора, шт.;

$S_{\text{в}}$ и $S_{\text{г}}$ - шаг между теплообменными трубами соответственно в вертикальном и горизонтальном рядах теплообменного пучка, мм;

k - признак компоновки теплообменного пучка в пакетах ($k=1$ для коридорной компоновки, $k=2$ для шахматной компоновки);

H - высота наполнения корпуса парогенератора трубами, мм;

$D_{\text{кол}}$ - наружный диаметр коллектора первого контура в зоне сверления, мм;

α - центральный угол изгиба теплообменных труб, град.;

B_1 - ширина центрального коридора пучка теплообменных труб, мм;

B_2 - ширина коридора пучка теплообменных труб, расположенного напротив коллектора теплоносителя, мм;

$S_{\text{кол}}$ - окружной шаг теплообменных труб по наружной поверхности коллектора теплоносителя, мм;

$H_{\text{пто}}$ - площадь теплообменной поверхности парогенератора, м²;

d - наружный диаметр теплообменных труб, мм;

Δ - расстояние от внешней трубы теплообменного пучка до внутренней поверхности днища парогенератора по продольной оси парогенератора,

при этом угол α изгиба теплообменных труб и расстояние Δ выбраны из следующих диапазонов: $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ и $300 \leq \Delta \leq 1000$ мм.

Для улучшения сейсмической устойчивости парогенератор и главный циркуляционный насос реакторной установки могут быть прикреплены к стенкам реакторного здания с помощью гидроамортизаторов.

Для повышения кавитационного запаса за счет снижения температуры в рабочей камере главный циркуляционный насос реакторной установки может быть размещен после парогенератора по ходу движения теплоносителя первого контура по циркуляционной петле.

Для повышения эксплуатационной надежности реакторной установки на каждой петле может быть установлено по два главных циркуляционных насоса. То есть, главный циркуляционный насос может быть размещен в циркуляционной петле, как на горячей, так и на холодной нитке главного циркуляционного трубопровода. При этом повышение надежности достигается за счет возможности резервирования одного из насосов.

В другом варианте компоновки реакторной установки два главных циркуляционных насоса пониженной мощности могут быть установленных параллельно на холодной нитке главного циркуляционного трубопровода. Это позволит уменьшить габариты насосов, повысить запас надежности и технико-экономические показатели работы реакторной установки.

Кроме того, в составе реакторной установки может быть предусмотрено размещение задвижек на нитках главного циркуляционного трубопровода. Это позволяет повысить эксплуатационную надежность реакторной установки за счет возможности отсечения парогенератора от реактора и проведения ремонтных работ без вывода из эксплуатации реакторной установки.

Изобретение иллюстрируется следующими фигурами.

На фиг. 1 представлен горизонтальный разрез гермооболочки с размещенной в ней реакторной установкой.

На фиг. 2 представлен горизонтальный разрез корпуса парогенератора.

На фиг. 3 показан фрагмент горизонтального разреза корпуса парогенератора в области соединения теплообменных труб с коллектором теплоносителя первого контура.

На фиг. 4 показано поперечное сечение парогенератора, выполненное по оси входного коллектора теплоносителя первого контура.

На фиг. 5 показана шахматная компоновка теплообменных труб.

На фиг. 6 показана коридорная компоновка теплообменных труб.

На фиг. 7 показана петля циркуляции теплоносителя первого контура реакторной установки (РУ) с расположением главного циркуляционного насоса (ГЦН) на холодной нитке главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ).

На фиг. 8 показана петля циркуляции теплоносителя первого контура РУ с расположением ГЦН на холодной и горячей нитках ГЦТ.

На фиг. 9 показана петля циркуляции теплоносителя первого контура РУ с расположением двух ГЦН на холодной нитке ГЦТ.

На фиг. 10 показана петля циркуляции теплоносителя первого контура РУ с размещением задвижек на холодной и горячей нитках ГЦТ.

Оборудование реакторной установки, включая парогенераторы, а также ее системы безопасности размещаются в реакторном отделении АЭС. Реакторное отделение состоит из герметичной и негерметичной частей. В герметичной части, называемой обычно гермооболочкой или контайнментом, располагается оборудование первого контура и реактор.

На фиг. 1 представлен горизонтальный разрез гермооболочки 1 с размещенной в ней реакторной установкой. Гермооболочка выполнена в виде цилиндра из предварительно напряженного железобетона, толщина которой, например, для проекта ВВЭР-1000 составляет 1,2 м при внутреннем диаметре 45 м и высоте 52 м.

В центральной части гермооболочки 1 размещен реактор 2, соединенный при помощи главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) 3 с парогенераторами 4. Для перекачки ГЦТ теплоносителя первого контура (воды под давлением) из парогенераторов 4 в реактор 2 и обратно служат главные циркуляционные насосы (ГЦН) 5. Для поддержания стабильности давления и компенсации изменений объема теплоносителя при его разогреве или расхолаживании в составе реакторной установки дополнительно используются компенсаторы давления 6. Как показано на фиг. 1, парогенераторы 4 занимают в контайнменте площадь больше, чем любое другое оборудование реакторной установки. Однако потребности развития общества требуют увеличения выработки электроэнергии, а от АЭС - повышения мощности реакторных установок, следовательно, увеличения теплообменной поверхности и габаритов парогенераторов, которые в настоящее время уже с трудом вписываются в боксы реакторных зданий. Причем дальнейшее увеличение площади и размеров контайнментов экономически невыгодно по причине значительного роста объемов и стоимости капитального строительства при сооружении АЭС.

Изобретение позволяет повысить интенсивность теплопередачи, надежность и долговечность парогенератора за счет повышения количества теплообменных труб, размещенных в его корпусе, что позволяет улучшить эксплуатационные показатели реакторной установки без существенного увеличения габаритов с возможностью размещения парогенераторов в боксах контайнмента заданных размеров.

Заявленный горизонтальный парогенератор 4 для реакторной установки с ВВЭР содержит цилиндрический корпус 7, снабженный, по меньшей мере, патрубком 8 подвода питательной воды и патрубком 9 отвода пара, а также двумя эллиптическими днищами 10, внутрикорпусными устройствами, входным

11 и выходным 12 коллекторами теплоносителя первого контура, соединенными с пучком 13 теплообменных труб, образующим теплообменную поверхность парогенератора, причем пучок теплообменных труб разделен на пакеты 14 и 15 межтрубными коридорами 16. Для решения поставленной задачи расстояние S (фиг. 2) между осями коллекторов 11 и 12 теплоносителя первого контура в поперечном направлении корпуса 7 парогенератора выбрано из соотношения

$$0,4 \leq \frac{S}{D_{\text{корп}}} \leq 0,6$$

где $D_{\text{корп}}$ - внутренний диаметр корпуса парогенератора,

а длина парогенератора L_k , измеренная по внутренним поверхностям эллиптических днищ, выбрана из соотношения

$$L_k = D_{\text{кол}} + 2 \cdot \left[\left(\text{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \right) \cdot \left(\frac{B_1}{2} + B_2 + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_{\Gamma} \right) + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_{\Gamma} \cdot \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} + \Delta \right] + \frac{H_{\text{итго}} \cdot 10^6}{\pi \cdot d \cdot N_{\text{тр}}},$$

где $D_{\text{кол}}$ - наружный диаметр коллектора теплоносителя в сверленной части, мм;

α - центральный угол изгиба теплообменных труб, град.;

B_1 - ширина центрального межтрубного коридора пучка теплообменных труб, мм;

B_2 - ширина межтрубного коридора пучка теплообменных труб, расположенного напротив коллектора теплоносителя, мм;

$S_{\text{кол}}$ - окружной шаг теплообменных труб по наружной поверхности коллектора теплоносителя, мм; указанный шаг измеряется как расстояние от центра одной теплообменной трубы до центра соседней теплообменной трубы в горизонтальном ряду по наружной поверхности коллектора теплоносителя;

S_{Γ} - шаг между теплообменными трубами в горизонтальном ряду теплообменного пучка, мм; указанный шаг измеряется как расстояние от центра одной теплообменной трубы до центра соседней теплообменной трубы в горизонтальном ряду, как показано на фиг. 5 и 6;

$H_{\text{итго}}$ - площадь теплообменной поверхности парогенератора, м²; площадь теплообменной поверхности парогенератора измеряется как сумма площади поверхности труб теплообменного пучка;

$N_{\text{тр}}$ - количество теплообменных труб в парогенераторе, шт.;

d - наружный диаметр теплообменных труб, мм;

Δ - расстояние от внешней трубы 17 теплообменного пучка до внутренней поверхности днища 10 парогенератора по продольной оси парогенератора, мм,

при этом центральный угол α изгиба теплообменных труб и расстояние Δ выбраны из следующих диапазонов: $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ и $300 \leq \Delta \leq 1000$ мм.

В соответствии с изобретением теплообменный пучок 13 парогенератора заполнен теплообменными трубами равномерно снизу доверху с зазорами b между соседними трубами по вертикали, не превышающими вертикальный шаг труб в пучке, как показано на фиг. 5 и 6. Горизонтально расположенные теплообменные трубы заведены в отверстия вертикально установленных коллекторов 11 и 12 теплоносителя первого контура. Изгиб теплообменных труб при соединении с коллектором теплоносителя, как показано на фиг. 3, выполнен радиусом R_{Γ} не менее 60 мм, предпочтительно не менее 100 мм.

Парогенератор в качестве внутрикорпусных устройств может содержать, по меньшей мере, следующие устройства: устройство 18 подвода и раздачи питательной воды, расположенное над пучком 13 теплообменных труб; устройство 19 подвода и раздачи питательной воды в аварийных режимах, расположенное в паровом пространстве; устройство 20 подачи химических реагентов при промывке парогенератора, погруженный дырчатый лист 21 и потолочный дырчатый лист 22.

При работе парогенератора 4 теплоноситель первого контура из реактора 2 подается во входной коллектор 11 парогенератора, раздается по трубам теплообменного пучка 13 и движется по ним к собирающему выходному коллектору 12, передавая свою теплоту котловой воде, т.е. теплоносителю второго контура (рабочему телу), через стенку теплообменной поверхности. Питательная вода через патрубок 8 и соединенное с ним устройство 18 подвода и раздачи питательной воды подается в объем парогенератора и пополняет уровень котловой воды в парогенераторе, прогревается за счет смешения с имеющейся там пароводяной смесью. Прогретая до насыщения вода вовлекается в контур циркуляции парогенератора (второй контур). На теплообменной поверхности парогенератора теплоноситель второго контура вскипает и поднимается вверх в подъемных участках контура циркуляции. Для отделения влаги от пара в парогенераторе используется одноступенчатая гравитационно-осадительная сепарация. Отвод пара из парогенератора осуществляется через паровые патрубки 9 в верхней части корпуса 7.

Компенсация массы пара, покидающей теплообменный пучок 13, осуществляется за счет опускного движения воды в межтрубных коридорах 16, 23 по всей высоте пакета труб и в зазоре между корпусом парогенератора и трубным пучком.

Эмпирическое соотношение, которое предложено для определения длины парогенератора L_k , учитывает технологические требования к изгибу труб теплообменной поверхности возле днищ парогенератора. U-образную форму трубам теплообменного пучка придают в три изгиба. При этом угол, соответствующий центральному изгибу, составляет от 90 до 150°, а расстояние от внешней трубы теплообменного

пучка до внутренней поверхности дна составляет от 300 до 1000 мм, что важно по технологическим и технико-экономическим соображениям. Предпочтительной является величина центрального угла изгиба теплообменных труб, составляющая 120°.

Выражение $0,4 \leq S/D_{\text{корп}} \leq 0,6$ характеризует конструкцию парогенератора, в котором пакеты теплообменных труб имеют примерно одинаковую ширину. При равной ширине пакетов теплообменных труб, когда $S/D_{\text{корп}} = 0,5$, в парогенератор помещается наибольшее количество теплообменных труб при прочих равных условиях, что снижает металлоемкость корпуса парогенератора.

Собрать парогенератор, расстояние между коллекторами которого в поперечном направлении не попадает в указанный диапазон, возможно, но количество труб в таком парогенераторе будет меньше необходимого для обеспечения показателей эффективности его работы, вследствие того, что внутреннее пространство корпуса использовано не эффективно. А именно, при расстоянии S между осями коллекторов теплоносителя в поперечном направлении $S \leq 0,4 \cdot D_{\text{корп}}$, значительное пространство в центральной части парогенератора, прилегающее к продольной плоскости сечения в зоне расположения теплообменного пучка, останется незаполненным теплообменными трубами по следующей причине. Для заведения теплообменных труб в отверстия коллектора теплоносителя они должны иметь заданный радиус изгиба R_r (фиг. 3), а на конце - прямолинейный участок, превышающий по длине глубину отверстия в стенке коллектора, в которое их заделывают. При этом радиусы изгиба теплообменных труб для введения их в отверстия коллектора выполняются размером не менее 60 мм, предпочтительно не менее 100 мм.

При расстоянии S между осями коллекторов теплоносителя в поперечном направлении $S \geq 0,6 \cdot D_{\text{корп}}$ значительное пространство в периферийной части парогенератора, прилегающее к боковым стенкам корпуса в зоне расположения теплообменного пучка, останется незаполненным теплообменными трубами по указанной выше причине, поскольку для заведения теплообменных труб в отверстия коллектора теплоносителя они должны иметь заданный радиус изгиба, а на конце - прямолинейный участок, превышающий по длине глубину отверстия, в которое их заделывают.

Изготовление парогенератора при выборе внутреннего диаметра его корпуса $D_{\text{корп}}$, расстояния S между осями коллекторов теплоносителя в поперечном направлении и длины парогенератора L_k (по внутренним поверхностям эллиптических днищ) позволяет разместить в корпусе парогенератора выбранного размера наибольшее количество теплообменных труб, обеспечив их надежное крепление, а также получение требуемой влажности пара в корпусе минимального диаметра, и удовлетворить требованиям технологичности изготовления U-образных теплообменных труб. При этом размеры парогенератора $D_{\text{корп}}$ и L_k выбраны с учетом его размещения в составе реакторной установки в боксах контайнмента.

Реакторная установка, содержащая заявленный парогенератор, показана на фиг. 1. Она содержит ядерный реактор 2 с четырьмя циркуляционными петлями, каждая из которых содержит парогенератор 4 с горизонтальным пучком 13 теплообменных труб, разделенных на пакеты 14 и 15 межтрубными коридорами 16 и соединенных с коллекторами 11 и 12 теплоносителя первого контура внутри цилиндрического корпуса 7 с эллиптическими днищами 10, главный циркуляционный насос 5, а также главный циркуляционный трубопровод 3 теплоносителя первого контура. При этом внутренний диаметр корпуса $D_{\text{корп}}$, расстояние S между осями коллекторов 11 и 12 теплоносителя первого контура в поперечном направлении и длина парогенератора L_k по внутренним поверхностям эллиптических днищ 10 выбраны соответственно из соотношений:

$$0,148 \cdot D + 0,637 \cdot \sqrt{0,054 \cdot D^2 + 3,142 \cdot \frac{N_{\text{тр}} \cdot S_r \cdot S_b}{k}} \leq D_{\text{корп}} \leq 1,827 \cdot H,$$

$$0,4 \leq \frac{S}{D_{\text{корп}}} \leq 0,6,$$

$$L_k = D_{\text{кол}} + 2 \cdot \left[\left(\operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \right) \cdot \left(\frac{B_1}{2} + B_2 + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_r \right) + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_r \cdot \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} + \Delta \right] + \frac{H_{\text{пто}} \cdot 10^6}{\pi \cdot d \cdot N_{\text{тр}}},$$

где D - номинальная паропроизводительность парогенератора, т/ч;

$N_{\text{тр}}$ - количество теплообменных труб в корпусе парогенератора, шт.;

S_b и S_r - шаг между теплообменными трубами соответственно в вертикальном и в горизонтальном рядах теплообменного пучка, мм, как показано на фиг. 5 и 6;

k - признак компоновки теплообменного пучка в пакетах ($k=1$ для коридорной компоновки, $k=2$ для шахматной компоновки);

H - высота наполнения корпуса парогенератора трубами, мм, как показано на фиг. 4;

$D_{\text{кол}}$ - наружный диаметр коллектора первого контура в зоне сверления, мм;

α - центральный угол изгиба теплообменных труб, град.;

B_1 - ширина центрального коридора пучка теплообменных труб, мм;

B_2 - ширина коридора пучка теплообменных труб, расположенного напротив коллектора теплоносителя, мм;

$S_{\text{кол}}$ - окружной шаг теплообменных труб по наружной поверхности коллектора теплоносителя, мм;
 $H_{\text{пто}}$ - площадь теплообменной поверхности парогенератора, м²;
 d - наружный диаметр теплообменных труб, мм;

Δ - расстояние от внешней трубы теплообменного пучка до внутренней поверхности днища парогенератора по продольной оси парогенератора,

при этом угол α изгиба теплообменных труб и расстояние Δ выбраны из следующих диапазонов: $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ и $300 \leq \Delta \leq 1000$ мм.

Для улучшения сейсмической устойчивости парогенератор и главный циркуляционный насос реакторной установки могут быть прикреплены к стенкам реакторного здания с помощью гидроамортизаторов 24.

На фиг. 7-9 показаны варианты компоновки предложенной реакторной установки на примере одной из четырех циркуляционных петель, в которой холодная нитка ГЦТ обозначена позицией 25, а горячая нитка - 26.

Для повышения кавитационного запаса за счет снижения температуры теплоносителя в рабочей камере, как показано на фиг. 7, главный циркуляционный насос 5 реакторной установки 2 может быть размещен после парогенератора 4 по ходу движения теплоносителя первого контура по циркуляционной петле на холодной нитке 25 ГЦТ 3.

В другом варианте, показанном на фиг. 8, для повышения эксплуатационной надежности реакторной установки на каждой циркуляционной петле может быть установлено по два главных циркуляционных насоса 5. То есть, главный циркуляционный насос 5 может быть размещен в циркуляционной петле как на горячей нитке 26, так и на холодной нитке 25 главного циркуляционного трубопровода. При этом повышение надежности достигается за счет возможности резервирования одного из насосов.

В следующем варианте компоновки реакторной установки два главных циркуляционных насоса 5 пониженной мощности могут быть установлены параллельно на холодной нитке 25 главного циркуляционного трубопровода, как показано на фиг. 9. Это позволит уменьшить габариты насосов, повысить запас надежности и технико-экономические показатели работы реакторной установки.

Кроме того, в составе реакторной установки может быть предусмотрено размещение задвижек 27 на нитках 25 и 26 главного циркуляционного трубопровода, как показано на фиг. 10. Это позволяет повысить эксплуатационную надежность реакторной установки за счет возможности отсечения парогенератора от реактора и проведения ремонтных работ без вывода из эксплуатации реакторной установки.

Реакторная установка работает следующим образом.

Технологическая схема реакторной установки двухконтурная. Первый контур является радиоактивным и размещен в контейнменте 1, в него входит водо-водяной энергетический реактор 2 типа ВВЭР и четыре циркуляционные петли ГЦТ 3, по которым через активную зону реактора 2 с помощью главных циркуляционных насосов 5 прокачивается теплоноситель первого контура - вода под давлением (160 кгс/см²). Температура воды на входе в реактор примерно 289°C, на выходе - 322°C. Нагретая в реакторе 2 вода направляется по четырём трубопроводам ГЦТ 3 в парогенераторы 4. Давление и уровень теплоносителя первого контура поддерживаются при помощи парового компенсатора давления 6.

Второй контур - нерадиоактивный, состоит из испарительной и водопитательной установок, блочной обессоливающей установки и турбоагрегата (на схеме не показаны). Теплоноситель первого контура охлаждается в парогенераторах 4, отдавая при этом тепло воде второго контура. Насыщенный пар, производимый в парогенераторах 4, через патрубки 9 отвода пара и паровый коллектор направляется к турбоустановке, приводящей во вращение электрогенератор.

Пример

Осуществляется строительство реакторной установки АЭС с ВВЭР. По условиям надежного расхолаживания реактора парогенератор должен иметь следующие параметры:

площадь теплообменной поверхности парогенератора $H_{\text{пто}}=6000$ м².

Для реакторной установки изготовлен парогенератор, имеющий следующие параметры:

паропроизводительность одного парогенератора реакторной установки $D=1500$ т/ч;

наружный диаметр коллектора первого контура в сверленной части $D_{\text{кол}}=1200$ мм;

ширина центрального коридора пучка теплообменных труб $B_1=200$ мм;

ширина коридора пучка теплообменных труб, расположенного напротив коллектора теплоносителя $B_2=200$ мм;

наружный диаметр теплообменных труб $d=16$ мм;

шаг между теплообменными трубами в горизонтальном ряду теплообменного пучка $S_r=24$ мм;

шаг между теплообменными трубами в вертикальном ряду теплообменного пучка $S_b=22$ мм;

количество теплообменных труб в парогенераторе $N_{\text{тр}}=10000$ шт.;

признак компоновки теплообменного пучка $k=1$ для коридорной компоновки;

высота наполнения корпуса парогенератора трубами $H=2300$ мм.

В соответствии с заявленным изобретением внутренний диаметр корпуса парогенератора $D_{\text{корп}}$ выбирается из диапазона в соответствии со следующим соотношением:

$$0,148 \cdot D + 0,637 \cdot \sqrt{0,054 \cdot D^2 + 3,142 \cdot \frac{N_{тр} \cdot S_{г} \cdot S_{в}}{k}} \leq D_{корп} \leq 1,827 \cdot H,$$

тогда $2825 \text{ мм} \leq D_{корп} \leq 4202 \text{ мм}$.

Расстояние S между осями коллекторов теплоносителя в поперечном направлении выбирается из диапазона соответствии со следующим соотношением:

$$0,4 \leq \frac{S}{D_{корп}} \leq 0,6,$$

тогда $1130 \text{ мм} \leq S \leq 2521 \text{ мм}$.

Длина парогенератора L_k (по внутренним поверхностям эллиптических днищ) выбирается из диапазона соответствии со следующими соотношениями:

$$L_k = D_{кол} + 2 \cdot \left[\left(ctg \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \right) \cdot \left(\frac{B_1}{2} + B_2 + \left(\frac{\pi \cdot D_{кол}}{4 \cdot S_{кол}} - 1 \right) \cdot S_r \right) + \left(\frac{\pi \cdot D_{кол}}{4 \cdot S_{кол}} - 1 \right) \cdot S_r \cdot \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} + \Delta \right] + \frac{H_{пто} \cdot 10^6}{\pi \cdot d \cdot N_{тр}},$$

при $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ и $300 \text{ мм} \leq \Delta \leq 1000 \text{ мм}$, тогда $13790 \text{ мм} \leq L_k \leq 16807 \text{ мм}$.

Если внутренний диаметр корпуса парогенератора $D_{корп}$ будет меньше 2825 мм, то в таком парогенераторе будет невозможно обеспечить надежное крепление теплообменных труб дистанционирующими элементами, так как для них не останется места, следовательно, не будет выполнено требование надежности конструкции парогенератора. Корпус парогенератора с внутренним диаметром более 4202 мм не выгодно размещать в реакторной установке, так как он увеличивает ее металлоемкость, а влажность генерируемого пара и КПД установки не улучшаются, но увеличиваются размеры контейнента. В парогенераторе размещается та же величина теплообменной поверхности, поэтому теплоноситель в ГЦТ реакторной установки пребывает в том же диапазоне температур. Коэффициент запаса до кризиса теплопередачи в активной зоне реактора, как следствие, не растет.

Длина парогенератора L_k (по внутренним поверхностям эллиптических днищ) величиной менее 13790 мм не позволяет обеспечить технологичность гибки и крепежа теплообменных труб в U-образный пучок, так как угол изгиба трубы превышает 150° , а расстояние между наружными трубами пучка и днищем корпуса составляет менее 300 мм, что не позволяет разместить опору пучка.

Длина парогенератора L_k (по внутренним поверхностям эллиптических днищ) величиной более 16807 мм нецелесообразна, так как при увеличении длины корпуса парогенератора показатели качества пара, например осушки, не улучшаются и площадь теплообменной поверхности остается постоянной, равной 6000 м^2 , в связи с тем, что увеличение длины парогенератора происходит не за счет увеличения количества теплообменных труб и роста теплопередающей поверхности, а за счет изгиба труб под более острым углом и избыточных зазоров между пучком теплообменных труб и днищами парогенератора. Таким образом, происходит увеличение металлоемкости парогенератора реакторной установки без увеличения коэффициента запаса до кризиса теплопередачи в активной зоне реактора, без улучшения параметров пара по влажности и давлению в парогенераторе, а также происходит увеличение размеров контейнента без положительного технического эффекта в работе реакторной установки.

Если расстояние S между осями коллекторов теплоносителя в поперечном направлении выбрано менее 1130 мм, то центральная часть теплообменного пучка парогенератора не будет заполнена трубами. Для закрепления теплообменной трубы в отверстии боковой стенки коллектора теплоносителя первого контура ее конец должен иметь прямолинейную форму на отрезке длиной более глубины указанного отверстия. Если указанное условие не выполняется, то теплообменная труба не может быть размещена и закреплена в отверстии боковой стенки коллектора теплоносителя. Таким образом, если центральная часть теплообменного пучка парогенератора не будет заполнена трубами, это не позволит обеспечить заданное количество теплообменных труб в объеме парогенератора и обеспечить теплообменную поверхность парогенератора в заданных габаритах, что снижает эксплуатационные показатели реакторной установки.

Если расстояние S между осями коллекторов теплоносителя в поперечном направлении выбрано более 2521 мм, то будет невозможно разместить пучок теплообменных труб возле боковой стенки корпуса парогенератора, что также не позволит обеспечить теплообменную поверхность заданной площади и эксплуатационные показатели реакторной установки.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Горизонтальный парогенератор для реакторной установки с водо-водяным энергетическим реактором, содержащий цилиндрический корпус, снабженный, по меньшей мере, патрубком подвода питательной воды и патрубком отвода пара, а также двумя эллиптическими днищами, внутрикорпусными устройствами, входным и выходным коллекторами теплоносителя первого контура, соединенными с пучком теплообменных труб, образующим теплообменную поверхность парогенератора, причем пучок теплообменных труб разделен на пакеты межтрубными коридорами, отличающийся тем, что расстояние S между осями коллекторов теплоносителя первого контура в поперечном направлении парогенератора выбрано из соотношения

$$0,4 \leq \frac{S}{D_{\text{корп}}} \leq 0,6,$$

где $D_{\text{корп}}$ - внутренний диаметр корпуса парогенератора;

а длина парогенератора L_K по внутренним поверхностям эллиптических днищ выбрана из соотношения

$$L_K = D_{\text{кол}} + 2 \cdot \left[\left(\operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \right) \cdot \left(\frac{B_1}{2} + B_2 + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_r \right) + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_r \cdot \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} + \Delta \right] + \frac{H_{\text{пто}} \cdot 10^6}{\pi \cdot d \cdot N_{\text{тр}}},$$

где $D_{\text{кол}}$ - наружный диаметр коллектора теплоносителя в сверленной части, мм;

α - центральный угол изгиба теплообменных труб, град.;

B_1 - ширина центрального межтрубного коридора пучка теплообменных труб, мм;

B_2 - ширина межтрубного коридора пучка теплообменных труб, расположенного напротив коллектора теплоносителя, мм;

$S_{\text{кол}}$ - окружной шаг теплообменных труб по наружной поверхности коллектора теплоносителя, мм;

S_r - шаг между теплообменными трубами в горизонтальном ряду теплообменного пучка, мм;

$H_{\text{пто}}$ - площадь теплообменной поверхности парогенератора, м²;

$N_{\text{тр}}$ - количество теплообменных труб в парогенераторе, шт.;

d - наружный диаметр теплообменных труб, мм;

Δ - расстояние от внешней трубы теплообменного пучка до внутренней поверхности днища парогенератора по продольной оси парогенератора, мм,

при этом центральный угол α изгиба теплообменных труб и расстояние Δ выбраны из следующих диапазонов: $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ и $300 \leq \Delta \leq 1000$ мм.

2. Парогенератор по п.1, отличающийся тем, что теплообменный пучок заполнен теплообменными трубами равномерно снизу доверху с зазорами между соседними трубами по вертикали, не превышающими вертикальный шаг труб в пучке.

3. Парогенератор по п.1, отличающийся тем, что ширина вертикальных межтрубных коридоров составляет 100-250 мм.

4. Парогенератор по п.1, отличающийся тем, что изгиб теплообменных труб при соединении их с коллектором теплоносителя выполнен радиусом не менее 60 мм, предпочтительно не менее 100 мм.

5. Парогенератор по п.1, отличающийся тем, что площадь зоны сверления коллектора теплоносителя не менее чем на 20% превышает площадь отверстий для соединения с ним теплообменных труб.

6. Реакторная установка с водо-водяным энергетическим реактором и горизонтальным парогенератором, включающая ядерный реактор с четырьмя циркуляционными петлями, каждая из которых содержит парогенератор с горизонтальным пучком теплообменных труб, разделенных на пакеты межтрубными коридорами и соединенных с коллекторами теплоносителя первого контура внутри цилиндрического корпуса с эллиптическими днищами; главный циркуляционный насос; а также главный циркуляционный трубопровод теплоносителя первого контура, отличающаяся тем, что внутренний диаметр корпуса $D_{\text{корп}}$, расстояние S между осями коллекторов теплоносителя первого контура в поперечном направлении и длина парогенератора L_K по внутренним поверхностям эллиптических днищ выбраны соответственно из соотношений:

$$0,148 \cdot D + 0,637 \cdot \sqrt{0,054 \cdot D^2 + 3,142 \cdot \frac{N_{\text{тр}} \cdot S_r \cdot S_B}{k}} \leq D_{\text{корп}} \leq 1,827 \cdot H,$$

$$0,4 \leq \frac{S}{D_{\text{корп}}} \leq 0,6,$$

$$L_K = D_{\text{кол}} + 2 \cdot \left[\left(\operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} \right) \cdot \left(\frac{B_1}{2} + B_2 + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_r \right) + \left(\frac{\pi \cdot D_{\text{кол}}}{4 \cdot S_{\text{кол}}} - 1 \right) \cdot S_r \cdot \frac{1}{\sin \left(\frac{\alpha}{2} \right)} + \Delta \right] + \frac{H_{\text{пто}} \cdot 10^6}{\pi \cdot d \cdot N_{\text{тр}}},$$

где D - номинальная паропроизводительность парогенератора, т/ч;

$N_{\text{тр}}$ - количество теплообменных труб в корпусе парогенератора, шт.;

S_B и S_r - шаг между теплообменными трубами соответственно в вертикальном и в горизонтальном рядах теплообменного пучка, мм;

k - признак компоновки теплообменного пучка в пакетах ($k=1$ для коридорной компоновки, $k=2$ для шахматной компоновки);

H - высота наполнения корпуса парогенератора трубами, мм;

$D_{\text{кол}}$ - наружный диаметр коллектора первого контура в зоне сверления, мм;

α - центральный угол изгиба теплообменных труб, град.;

V_1 - ширина центрального коридора пучка теплообменных труб, мм;

V_2 - ширина коридора пучка теплообменных труб, расположенного напротив коллектора теплоносителя, мм;

$S_{\text{кол}}$ - окружной шаг теплообменных труб по наружной поверхности коллектора теплоносителя, мм;

$H_{\text{пто}}$ - площадь теплообменной поверхности парогенератора, м^2 ;

d - наружный диаметр теплообменных труб, мм;

Δ - расстояние от внешней трубы теплообменного пучка до внутренней поверхности днища парогенератора по продольной оси парогенератора, мм,

при этом угол α изгиба теплообменных труб и расстояние Δ выбраны из следующих диапазонов: $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ и $300 \text{ мм} \leq \Delta \leq 1000 \text{ мм}$.

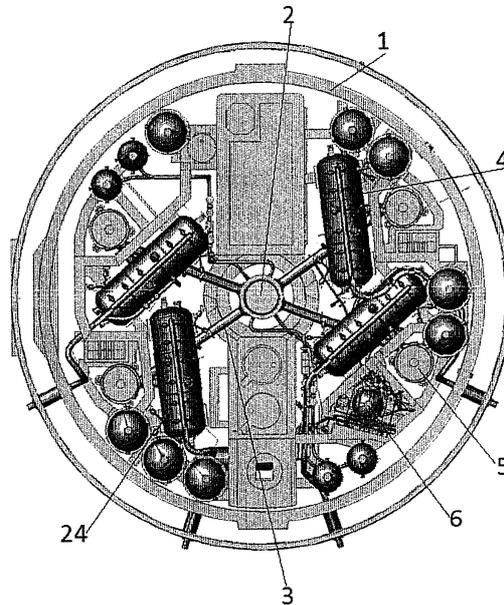
7. Реакторная установка по п.б, отличающаяся тем, что парогенератор и главный циркуляционный насос соединены со стенками реакторного здания с помощью гидроамортизаторов.

8. Реакторная установка по п.б, отличающаяся тем, что главный циркуляционный насос размещен после парогенератора по ходу движения теплоносителя первого контура по циркуляционной петле.

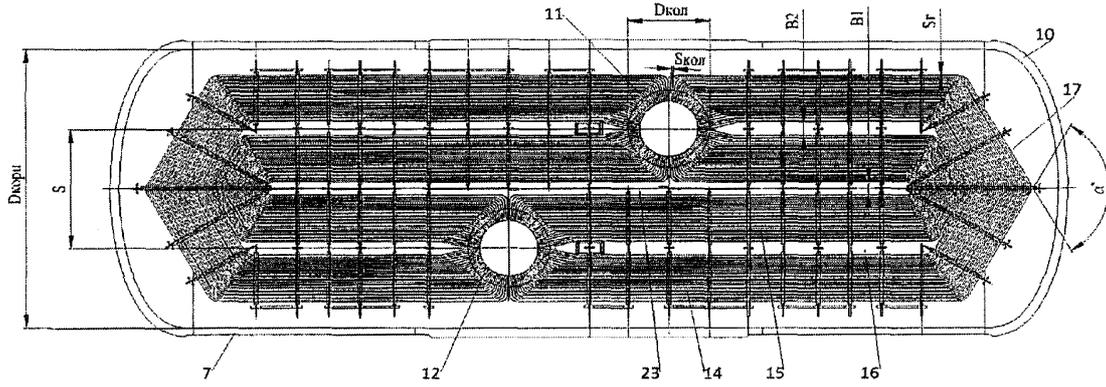
9. Реакторная установка по п.б, отличающаяся тем, что в циркуляционной петле как на горячей, так и на холодной нитках главного циркуляционного трубопровода размещен главный циркуляционный насос.

10. Реакторная установка по п.б, отличающаяся тем, что на холодной нитке главного циркуляционного трубопровода размещены два главных циркуляционных насоса, установленных параллельно.

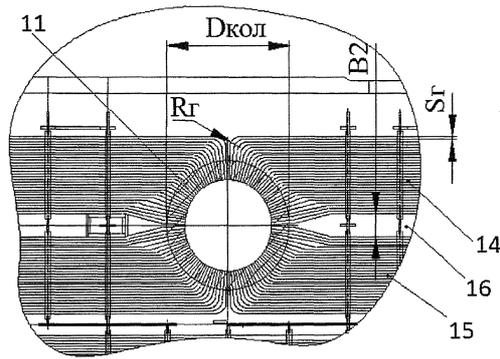
11. Реакторная установка по п.б, отличающаяся тем, что на нитках главного циркуляционного трубопровода установлены задвижки.



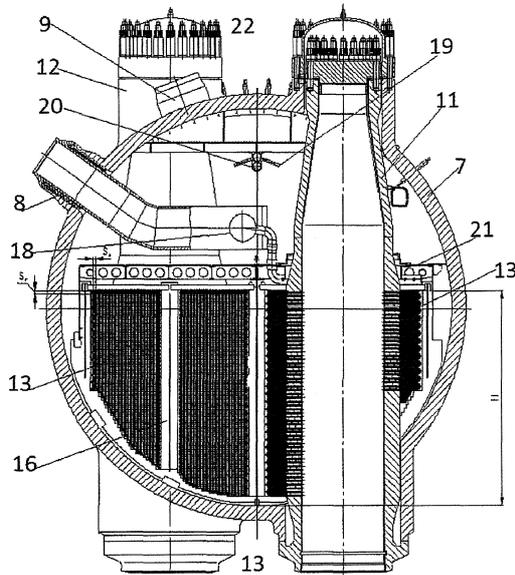
Фиг. 1



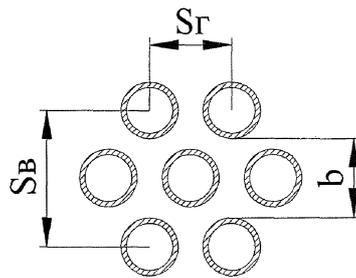
Фиг. 2



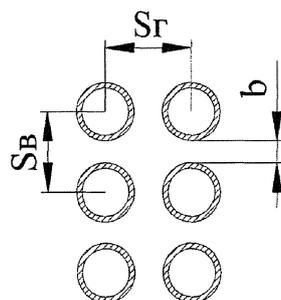
Фиг. 3



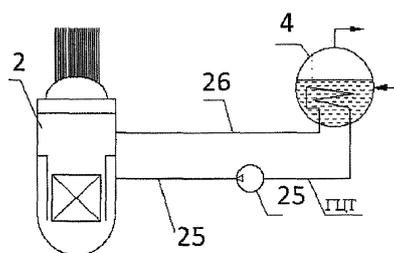
Фиг. 4



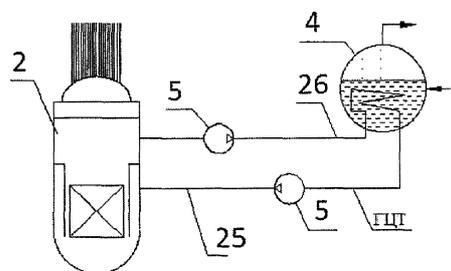
Фиг. 5



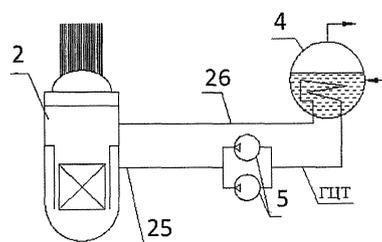
Фиг. 6



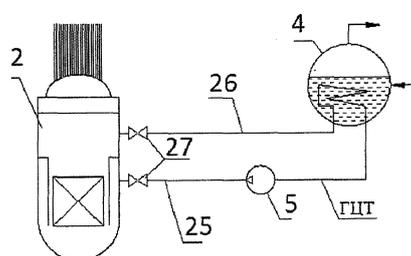
Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10