

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **042239**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.01.26

(51) Int. Cl. **G21C 15/02 (2006.01)**

(21) Номер заявки
202291348

(22) Дата подачи заявки
2021.10.04

(54) **ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР С ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

(31) **2021106582**

(56) **RU-C1-2247435**

(32) **2021.03.15**

RU-C1-2545098

(33) **RU**

RU-C1-2473984

(43) **2022.11.14**

RU-C1-2313143

(86) **PCT/RU2021/000425**

US-B2-8817942

(87) **WO 2022/197206 2022.09.22**

EP-B1-3271923

DE-A1-4432705

US-A1-20080310575

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"АКМЭ-ИНЖИНИРИНГ" (RU)**

(72) Изобретатель:
**Дедуль Александр Владиславович,
Степанов Владимир Сергеевич,
Тошинский Георгий Ильич, Арсеньев
Юрий Александрович, Комлев
Олег Геннадьевич, Вахрушин
Михаил Петрович, Григорьев Сергей
Александрович, Самкотрясов Сергей
Владимирович (RU)**

(74) Представитель:
Черных И.В. (RU)

(57) Изобретение относится к ядерной технике и предназначено для использования в энергетических установках с реактором с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) на основе свинца или сплавов на основе свинца и висмута. Изобретение позволяет повысить эффективность радиационной защиты внутрикорпусного оборудования ядерного реактора, увеличить теплоаккумулирующую способность первого контура, снизить вес ядерного реактора и улучшить его прочностные характеристики. Во внутрикорпусном пространстве ядерного реактора, не занятом необходимым оборудованием, размещены с зазорами, обеспечивающими проток теплоносителя, контейнеры, заполненные материалом, отражающим или поглощающим нейтроны, с теплоемкостью большей, чем теплоемкость теплоносителя, при этом контейнеры размещают таким образом, что образовавшиеся зазоры формируют каналы с турбулентным режимом течения теплоносителя для охлаждения указанных контейнеров при его расходе, соответствующем номинальному уровню мощности ядерного реактора.

042239
B1

042239
B1

Область техники

Изобретение относится к ядерной технике и предназначено для использования в энергетических установках с реактором с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) на основе свинца или сплавов на основе свинца и висмута.

Предшествующий уровень техники

Известны реакторы с ТЖМТ, в которых активная зона погружена в емкость, заполненную теплоносителем (например, патент США № 8817942, Проект БРЕСТ ОД-300, патент РФ № 2247435, патент РФ № 2545098, патент РФ № 2313143, заявка РСТ WO 2016/147139).

В патенте США № 8817942 описан ядерный реактор, охлаждаемый жидким металлом (например, тяжелым металлом, таким как свинец или сплав свинец-висмут) или натрием или расплавленными солями, с активной зоной, образованной тепловыделяющими элементами, погруженными в текучую среду, циркулирующую между активной зоной и по меньшей мере одним теплообменником.

Реактор БРЕСТ ОД-300 (Конструктивные и компоновочные решения основных узлов и оборудования реактора БРЕСТ-ОД-300. В.Н. Леонов, А.А. Пикапов, А.Г. Сила-Новицкий и др. ВАНТ, серия: Обеспечение безопасности АЭС, выпуск 4, Москва, ГУЛ НИКИЭТ, 2004 г., стр. 65-72) включает железобетонную шахту с внутренней стальной облицовкой, блок корпусов реактора с верхним перекрытием, активную зону, систему исполнительных механизмов воздействия на реактивность активной зоны, блоки парогенераторов и главных циркуляционных насосов, систему массообменников и фильтров для очистки теплоносителя, систему перегрузки элементов активной зоны, систему контроля технологических параметров и другие вспомогательные системы. Блок корпусов реактора БРЕСТ-ОД-300 выполнен в виде центральной и четырех периферийных цилиндрических шахт с плоскими днищами, которые совместно с верхним перекрытием образуют границу первого контура реакторной установки, в котором циркулирует теплоноситель, обеспечивая теплоотвод от активной зоны, и формируется объем защитного газа, а также размещены внутриреакторные устройства и оборудование. Активная зона размещена в центральной шахте блока корпусов, а блоки парогенераторов размещаются в четырех периферийных шахтах, соединенных с центральной шахтой верхними и нижними патрубками. Каждый парогенератор выполнен в виде трубчатого теплообменника для нагрева воды (пара) за критических параметров, который погружен в поток свинцового теплоносителя, движущегося в межтрубном пространстве корпуса парогенератора сверху вниз. Циркуляция свинцового теплоносителя в реакторе БРЕСТ-ОД-300 осуществляется путем его перекачки циркуляционными насосами из шахты парогенератора на уровень напорной камеры реактора, из которой теплоноситель опускается до входной камеры активной зоны, поднимается и нагревается в активной зоне при контакте с твэлами тепловыделяющих сборок и затем поступает в общую камеру «горячего» теплоносителя. Далее теплоноситель перетекает во входные камеры и межтрубное пространство парогенераторов, охлаждается и поступает на вход циркуляционных насосов, а затем снова подается в напорную камеру реактора.

Активная зона окружена рядами блоков бокового свинцового отражателя, выполненных в виде плотных стальных кожухов, заполненных проточным свинцовым теплоносителем. Часть прилегающего к зоне блоков отражателя выполнены в виде вертикальных каналов, заглушенных сверху (газовый колокол) и открытых для заполнения свинцом снизу, при этом его уровень в канале соответствует напору свинцового теплоносителя на входе в активную зону. С помощью этих каналов с изменяемыми по высоте уровнями столбов свинца, влияющими на утечку нейтронов, пассивным образом осуществляется связь реактивности и мощности реактора с расходом теплоносителя через активную зону, что является важным фактором регулирования мощности через расход теплоносителя и не менее важным фактором безопасности.

В патенте РФ № 2247435 описана интегрально-петлевая компоновка основного оборудования, при которой установка включает реактор, размещенный в центральном баке, парогенераторы и циркуляционные насосы, размещенные в периферийных баках, а также систему обработки теплоносителя газовыми смесями для восстановления окислов свинца. Реактор, парогенераторы, циркуляционные насосы размещены под свободным уровнем жидкометаллического теплоносителя. Парогенераторы установки выполнены в виде трубчатого теплообменника, в котором в трубах подается вода (пар), а в межтрубном пространстве сверху вниз циркулирует свинцовый теплоноситель. В реакторной установке между свободным уровнем жидкометаллического теплоносителя и верхним перекрытием выполнена общая газовая полость, сообщенная с системой циркуляции и очистки газа.

Интегрально-петлевая компоновка основного оборудования характеризуется высоким удельным объемом свинцового теплоносителя на единицу мощности реактора, что приводит к увеличению размеров реактора и капитальных затрат при создании реактора.

Во всех указанных случаях существенной проблемой является большой вес теплоносителя, высокие нагрузки на опорные конструкции корпуса реактора, сложности обеспечения стойкости оборудования к сейсмическим воздействиям, обусловленные большой массой и габаритами.

В патенте РФ № 2545098 задача снижения веса теплоносителя решается путем размещения оборудования с высоким внутренним давлением (парогенератор) вне активной среды (свинцового теплоносителя).

Реакторная установка, описанная в патенте РФ № 2545098, включает шахту реактора с верхним перекрытием, размещенный в шахте реактор с активной зоной, парогенераторы, циркуляционные насосы, циркуляционные трубопроводы, системы исполнительных механизмов и устройств для обеспечения пуска, эксплуатации и остановки реакторной установки. Парогенераторы размещены в отдельных боксах и сообщены с шахтой реактора циркуляционными трубопроводами подъема и слива свинцового теплоносителя, парогенераторы и большая часть циркуляционных трубопроводов размещены выше уровня свинцового теплоносителя в шахте реактора, циркуляционные насосы размещены в шахте реактора на циркуляционных трубопроводах подъема "горячего" свинцового теплоносителя и предусмотрено техническое средство для обеспечения естественной циркуляции свинцового теплоносителя через активную зону реактора при отключении циркуляционных насосов.

Однако в известном техническом решении объем теплоносителя в контуре является также достаточно большим за счет протяженных и объемных каналов циркуляции, что ухудшает массогабаритные и экономические показатели установки.

Указанная проблема решается в ядерном реакторе, в частности, в компактном ядерном реакторе с жидкометаллическим охлаждением (WO 2016/147139), содержащем главный корпус реактора, покрытый крышкой и вмещающий внутри себя активную зону и гидравлическую разделяющую конструкцию, имеющую по существу форму амфоры и ограничивающую горячий коллектор и холодный коллектор, в котором циркулирует теплоноситель первого контура, охлаждающий активную зону. Между верхним участком разделяющей конструкции и корпусом реактора расположены теплообменники. В данном техническом решении насосы и парогенератор располагаются ближе к активной зоне и нуждаются в радиационной защите, функцию защиты от нейтронов выполняет жидкий металл, расположенный между разделяющей конструкцией и наружным кольцом тепловыделяющих элементов.

К недостаткам описанного ядерного реактора можно отнести две наиболее существенные проблемы:

- отсутствие радиационной защиты оборудования, требующего в процессе эксплуатации проведения регламентных работ и обслуживания с участием персонала;

- большие свободные объемы теплоносителя в области напротив активной зоны и в нижней части реактора, в которых скорости течения крайне низки, возможно формирование;

- неустойчивого вихревого течения в режимах пониженных мощностей или при расхолаживании реактора в режиме естественной конвекции.

Ограничения по допустимой активации оборудования потоком нейтронов, исходящих из активной зоны, обеспечиваются за счет удаления насосов, парогенератора, стенок корпуса и крышки реактора от активной зоны.

Известно устройство тепловой защиты корпуса реактора (патент РФ № 2331939), содержащее корзину активной зоны, кольцевые стальные обечайки, установленные и закрепленные в упомянутой корзине, разделительную обечайку, закрепленную на днище корпуса. В состав теплового экрана введены блоки с карбидом бора. Они расположены за разделительной обечайкой и образуют в плане многослойный кольцевой экран по всей высоте активной зоны. Зазоры между блоками с карбидом бора одного слоя перекрываются блоками с карбидом бора следующего слоя. Изобретение позволяет исключить жесткое захватное γ -излучение в элементах теплового экрана и уменьшить радиационное воздействие на корпус реактора.

Недостатком такого технического решения является то, что оно решает только одну частную задачу, а именно, обеспечивает радиационную защиту корпуса реактора напротив активной зоны. Вместе с тем в направлении на крышку реактора также необходима радиационная защита, как для защиты оборудования, расположенного на крышке реактора, так и для радиационной защиты парогенератора.

Важно отметить, что ни одно из известных технических решений не обеспечивает одновременное комплексное решение нескольких важных проблем безопасности.

Первое. Важнейшими задачами обеспечения безопасности ЯР является предотвращение опасных последствий отказов, связанных с потерей теплоотвода, а также минимизация радиационных последствий аварий, связанных с повреждениями барьеров безопасности. Отказы или аварии в системах отвода тепла от ядерного реактора, даже при срабатывании аварийной защиты и переходе на резервные каналы отвода остаточных энерговыделений приводят, как правило, к кратковременному или достаточно длительному повышению температуры в активной зоне, до тех пор, пока не установится равновесие между отводимой мощностью систем отвода тепла и мощностью остаточного энерговыделения. При этом существенным фактором, обеспечивающим минимизацию опасных последствий таких событий, а именно скорость роста температуры и максимальных значений достигнутых температур, является теплоемкость систем, оборудования и теплоносителя первого контура.

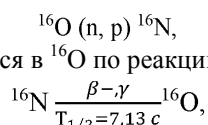
Второе. Существенной проблемой для безопасности ЯР является большой вес теплоносителя, что приводит к сложности обеспечения стойкости оборудования к сейсмическим воздействиям.

Уменьшение габаритов корпуса в реакторах интегрального типа, благоприятно сказывается на экономических характеристиках проекта, упрощает создание корпуса реактора с одновременным улучшением сейсмостойкости конструкции. Однако при этом возникает известная проблема защиты оборудования

первого контура, которое при этом приближается к активной зоне.

Третье. При компактном размещении парогенератора и приближении его к активной зоне ядерного реактора, помимо более известной проблемы активации стальных конструкций, существенной становится проблема активации примесей в воде парогенератора, включая образование изотопа ^{16}N в результате реакции:

При этом в дальнейшем ^{16}N распадается в ^{16}O по реакции:



формируя дополнительный радиационный фон вблизи паропроводов и турбины.

Радиационное воздействие на корпус реактора и оборудование, расположенное внутри корпуса, приводит также к изменению свойств материалов (потеря пластичности, например), что может стать причиной аварийной ситуации.

Недостатком известных ядерных реакторов (ЯР) является то, что каждая из вышеперечисленных проблем решается отдельно с помощью направленных на решение конкретной задачи технических средств.

Раскрытие изобретения

Техническими мерами, обеспечивающими безопасность реактора в аварийных ситуациях и во время эксплуатации, являются, в том числе:

увеличение теплоемкости элементов первого контура, аккумулирующего выделяемое тепло в аварийных и переходных процессах без заметного роста температуры;

снижение массы реактора, снижающее нагрузки на силовые элементы реактора при сейсмических воздействиях;

обеспечение радиационной защиты корпуса реактора и оборудования, как размещенного в нем (парогенератор, насос), так и за его пределами (оборудование на крышке реактора, оборудование в шахте реактора).

Задачей изобретения является создание оптимальной конструкции ядерного реактора, путем реализации указанных технических мер, за счет использования в первом контуре элемента конструкции, исполняющего одновременно функцию теплового аккумулятора и поглотителя излучения (нейтроны, гамма-излучение) и имеющего плотность меньшую, чем плотность теплоносителя.

Технический результат заключается в повышении эффективности радиационной защиты внутрикорпусного оборудования ЯР, повышении теплоаккумулирующей способности первого контура (совместной теплоемкости теплоносителя первого контура и оборудования, омываемого этим теплоносителем), в снижении веса ЯР и улучшении прочностных характеристик.

Использование предложенного технического решения позволяет сформировать тракт теплоносителя без применения соединительных трубопроводов.

Указанная задача решается и указанный технический результат достигается тем, что в ядерном реакторе с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) с размещенными в одном корпусе активной зоной, органами управления и контроля, как минимум, одним теплообменником или, как минимум, одним парогенератором, как минимум, одним циркуляционным насосом первого контура, основными каналами и вспомогательными каналами, не выполняющими функцию охлаждения активной зоны, для прохода теплоносителя, включая коллектора для сбора и распределения теплоносителя по основным и вспомогательным каналам, во внутрикорпусном пространстве ядерного реактора, не занятом указанными элементами, размещены с зазорами, обеспечивающими проток теплоносителя, стальные контейнеры, заполненные материалами, преимущественно отражающими или поглощающими нейтроны, с теплоемкостью большей, чем теплоемкость теплоносителя, при этом контейнеры размещают таким образом, что образовавшиеся зазоры формируют каналы с турбулентным режимом течения теплоносителя для охлаждения указанных контейнеров при расходе, соответствующем номинальному уровню мощности ядерного реактора.

Существенное увеличение скорости выше границы турбулентного режима нежелательно, т.к. приводит к увеличению гидравлического сопротивления. Существенное уменьшение величины зазоров с переходом к ламинарному режиму течения также нежелательно, т.к. ухудшает теплопередачу между теплоносителем и контейнерами, ухудшает перемешивание теплоносителя, обеспечивающее выравнивание температур и концентраций примесей в теплоносителе во всем объеме.

Последний технический результат (выравнивание концентраций примесей в теплоносителе) является существенным для реакторов с ТЖМТ, использующими для обеспечения коррозионной стойкости материалов технологию поддержания оптимальной концентрации кислорода в теплоносителе.

В качестве ограничивающего критерия перехода к турбулентному режиму течения может быть принято критическое значение критерия Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{W \cdot d_r}{\nu} > Re_{кр} \cong 2300,$$

где W - скорость теплоносителя;

d_r - гидравлический диаметр;

ν - кинематическая вязкость теплоносителя;

$Re_{кр}$ - критическое значение критерия Рейнольдса, а гидравлический диаметр определяется по общему правилу:

$$d_r = \frac{4S}{P},$$

где S - суммарная поперечная площадь всех зазоров для протока теплоносителя между контейнерами в сечении с минимальными скоростями;

P - смоченный теплоносителем суммарный периметр всех поверхностей в этом же сечении.

Контейнеры внутри корпуса устанавливают таким образом, чтобы каналы для протока теплоносителя располагались преимущественно вертикально, что обеспечивает отсутствие крупномасштабных вихрей в режиме естественной конвекции и ускоренное ее развитие при останове насосов.

В качестве наполнителя контейнеров, могут быть использованы блочки из горячепрессованного либо виброуплотненного порошка карбида бора, либо материал на основе гидрида циркония, гидрида иттрия, либо сталь.

В последнем случае, контейнеры могут быть заменены цельными блоками из стали.

При использовании в качестве наполнителя карбида бора, он может в одной части контейнеров находиться в виде горячепрессованных блочков, а в другой находится в виде виброуплотненного порошка.

Одновременно в разных контейнерах могут находиться разные наполнители, так, например, в части контейнеров в качестве наполнителя могут использовать материал на основе гидрида циркония, либо сталь.

Внутри контейнеров имеется свободный объем, не занятый наполнителем. Свободный объем в полости контейнеров предпочтительно дополнительно заполнен ТЖМТ, что улучшает теплопередачу.

Свободный объем контейнеров предпочтительно может сообщаться с объемом теплоносителя через специально организованные пробки, в которых помещен фильтр, предпочтительно, изготовленный из металлической проволоки, препятствующий попаданию, например, карбида бора в первый контур и, в то же время, выпускающий гелий, образующийся в результате захвата нейтронов на ^{10}B .

Контейнеры с наполнителем размещены в корпусе реактора так, чтобы заполнить всё внутрикорпусное пространство, кроме опускающего канала насосов, теплообменников (парогенераторов) и специально организованных коллекторов, например, над и под активной зоной или перед входом в насосы и иметь максимально возможный размер, поскольку при этом уменьшаются паразитные прострелы нейтронов в зазорах между контейнерами.

Весь контур циркуляции теплоносителя реализован исключительно на гидравлических связях, благодаря формированию тракта теплоносителя за счет размещения определенным образом контейнеров внутри корпуса реактора и элементов силового каркаса корпуса, в которых контейнеры фиксируются от перемещений.

Контейнеры имеют ограниченные размеры и расположены с зазорами, которые необходимы для протока теплоносителя. Средняя температура в контейнерах определяется эффективностью отвода тепла, генерируемого в результате ядерных реакций взаимодействия с нейтронами и частично гамма-квантами, за счет конвективной теплоотдачи к теплоносителю и теплопроводности наполнителя.

Контейнеры совместно с элементами их закрепления в корпусе реактора образуют силовой каркас, улучшающий прочностные характеристики корпуса и его стойкость к внешним воздействиям.

Повышение теплоемкости оборудования, находящегося внутри корпуса, путем замещения избыточного теплоносителя элементами с теплоемкостью большей, чем теплоемкость теплоносителя, позволяет в случае аварии аккумулировать тепло в больших объемах, чем вытесненный ими объем теплоносителя первого контура.

Замещение ТЖМТ на нержавеющую сталь увеличивает теплоемкость системы первого контура приблизительно в 3 раза, замещение ТЖМТ на карбид бора увеличивает теплоемкость системы более, чем в 2 раза. При этом карбид бора химически не взаимодействует с ТЖМТ, а в результате взаимодействия нейтронов с углеродом и бором не образуется значительных количеств изотопов с большим периодом распада или высокой радиоактивностью.

Окружение парогенератора блоками с наполнителем, например, с карбидом бора, приводит к снижению радиоактивности примесей в генерируемом паре и повышению безопасности за счет поглощения нейтронов бором.

Удельный вес контейнеров с наполнителем меньше удельного веса ТЖМТ, что обуславливает снижение веса ЯР за счет замещения части теплоносителя первого контура указанными блоками.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 представлен 3-D вид реакторной установки в соответствии с предлагаемым техническим решением.

На фиг. 2 представлен фрагмент А 3-D вида реакторной установки с указанием направления течения теплоносителя в зазорах между блоками.

На фиг. 3 представлен вертикальный разрез 1-1 реакторной установки по насосу и парогенератору. На фиг. 3 стрелками отражена схема циркуляции теплоносителя в реакторе интегрального типа, основной особенностью которого является размещение в одном корпусе активной зоны, насоса, обеспечивающего циркуляцию теплоносителя, и парогенератора или теплообменника для отвода генерируемого в активной зоне тепла.

На фиг. 4 представлен горизонтальный разрез реактора между патрубков подвода теплоносителя к парогенератору и активной зоной.

На фиг. 5 представлен фрагмент силового каркаса с размещенными в нем блоками, выполненными в виде контейнеров с карбидом бора (А), а также примеры возможных решений по выбору конструкции контейнеров (Б-Е). На фиг. 5Б показан фрагмент силового каркаса с разрезами (наполнитель условно не показан) и перемещением элементов (по стрелкам). На фиг. 5В показана нижняя часть контейнера (наполнитель условно не показан). На фиг. 5Г представлен блок из контейнеров меньшего размера (наполнитель условно не показан), на который может быть заменен контейнер, показанный на фиг. 5В. На фиг. 5Д показан пучок стержневых контейнеров, на которые могут быть заменены контейнеры коробчатого типа. На фиг. 5Е представлен контейнер с внутренними каналами охлаждения (наполнитель условно не показан), на который может быть замещена группы контейнеров с внешним охлаждением.

Вариант осуществления изобретения

Далее описан возможный, но не единственный, вариант осуществления заявленного изобретения.

Корпус реакторной установки (фиг. 3) содержит активную зону 1 с пробкой 2, циркуляционный насос 3, теплообменник 4, напорную камеру 5, основные каналы 6, нижнюю камеру 7, верхнюю камеру 8, патрубки 9, контейнеры 10.

В качестве теплоносителя используется тяжелый жидкометаллический теплоноситель на основе свинца или сплавов на основе свинца и висмута.

Контейнеры 10 размещены как в низкотемпературной части первого контура реактора, так и в высокотемпературной части контура.

Контейнеры 10 выполнены из коррозионностойкой в ТЖМТ, жаростойких и жаропрочных сталей аустенитной группы.

Контейнеры 10 заполняют все внутрикорпусное пространство, кроме опускного канала насоса 3, коллекторов над и под активной зоной 1. Контейнеры 10 совместно с обечайкой 11 вокруг активной зоны 1 с пробкой 2, обечайкой корпуса 12, радиальными ребрами 13 и кольцевыми горизонтальными ребрами 14 образуют силовой каркас корпуса. В кольцевых горизонтальных ребрах 14 организованы отверстия для прохода теплоносителя в вертикальном направлении. Форму отверстий выбирают исходя из удобства сварки силового каркаса, крепления блоков и обеспечения равномерной раздачи теплоносителя из коллекторов на вход в вертикально ориентированные щели. Форма отверстий может быть цилиндрической.

Размеры зазоров 15 (фиг. 2) между контейнерами 10 и элементами силового каркаса выбирают таким образом, чтобы при расходе теплоносителя, соответствующем номинальному уровню мощности ядерного реактора, режим течения был турбулентным.

При выборе конкретной конструкции контейнеров, включая их объем, плотность и материал наполнителя (сталь или карбид бора в виде более плотных горячепрессованных блочков или менее плотной засыпки порошком) учитываются следующие факторы:

- непревышение температур, при которых обеспечена совместимость материалов;
- непревышение температурой материалов блоков температуры выхода теплоносителя из активной зоны;

- достаточность объема и массы материалов блоков для выполнения функции радиационной защиты корпуса и оборудования, расположенного в нем, а также теплоносителя второго контура;

- площадь сечения для прохода теплоносителя и смоченный периметр блоков и элементов силового каркаса должны быть такими, чтобы обеспечивался турбулентный режим течения теплоносителя во внутрикорпусном пространстве при расходе теплоносителя, соответствующем номинальному уровню мощности ядерного реактора.

Выполнение указанных выше критериев проверяется соответствующими расчетами, которые проводят с использованием известных расчетных методов.

Существенное увеличение скорости в зазорах между блоками выше границы турбулентного режима нежелательно, т.к. приводит к увеличению гидравлического сопротивления. Существенное увеличение величины зазоров с уменьшением скорости и переходом к ламинарному режиму течения также нежелательно, так как ухудшает теплопередачу между теплоносителем и контейнерами.

Во время работы в штатном режиме холодный теплоноситель циркуляционным насосом 3 подают в

напорную камеру 5, откуда по каналам 6 он поступает на вход в активную зону 1. В активной зоне 1 теплоноситель нагревается и поступает в объем над активной зоной 1, а затем поступает в патрубки 9, которые обеспечивают поступление горячего теплоносителя в парогенераторы или теплообменники второго контура (на фиг. трубная система теплообменников условно не показана). На фиг. 1, 2 показано, что таких теплообменников с соответствующими им патрубками может быть несколько. После входа в теплообменники 4 теплоноситель разделяется на два потока. Часть теплоносителя, движущаяся вверх, охлаждается теплоносителем второго контура и поступает в верхнюю камеру 8. Часть теплоносителя, движущаяся вниз, также охлаждается теплоносителем второго контура и поступает в нижнюю камеру 7, где разворачивается в направлении движения вверх. При движении вверх большая часть теплоносителя движется во внутрикорпусном пространстве между блоками 10 и в конечном итоге также выходит в верхнюю камеру 8. Незначительная часть теплоносителя из нижней камеры 7 поступает на термостатирование корпуса реактора в зазор между корпусом 12 и обечайкой 11 (см. фиг. 3). Соотношение расходов вверх и вниз теплообменника выбирается расчетом, таким образом, чтобы температуры теплоносителя первого контура на выходе двух потоков теплоносителя из теплообменника 4 были примерно равны с учетом их подогрева в каналах между контейнерами 10 и в канале термостатирования корпуса.

Конструкция контейнеров 10, исходя из необходимости одновременного достижения ключевых технических результатов, а именно, формирования требуемого состава радиационной защиты, увеличения теплоаккумулирующей способности первого контура реакторной установки, обеспечения требуемой теплопередачи к элементам, выполняющим функции теплового аккумулятора, снижения массы реакторной установки, может быть принята различной, как это показано на фиг. 5.

В качестве наполнителя блоков может использоваться не только карбид бора, но и в необходимых случаях могут использоваться и другие материалы. Например, вместо карбида бора для улучшения замедления нейтронов в локальных областях могут применяться известные материалы на основе гидридов тугоплавких металлов. Для улучшения защиты от гамма-излучения или увеличения теплоемкости может использоваться наполнитель контейнера из стали, или тонкостенный контейнер может быть заменен на цельный стальной блок, соответствующей геометрии. Для улучшения теплопередачи между теплоносителем и контейнером, а также исходя из удобства монтажа или технологии изготовления контейнеров сложной геометрической формы, контейнеры могут быть укрупнены с формированием внутренних каналов, как это показано в вариантах реализации на фиг. 4.

Свободный объем контейнеров 10 может сообщаться с объемом теплоносителя через специально организованные пробки, в которых помещен фильтр, изготовленный, например, из металлической проволоки, препятствующий попаданию карбида бора в первый контур. При этом обеспечивается улучшение теплопередачи между теплоносителем и материалами контейнера.

Описанное размещение контейнеров 10 внутри корпуса реактора формирует тракт теплоносителя, по которому теплоноситель проходит при движении вверх из нижней камеры 7 в верхнюю камеру 8.

В случае любого вида аварии приводящей к ухудшению отвода тепла от активной зоны, значительный объем блоков, выполненных из материала, с теплоемкостью большей, чем теплоемкость теплоносителя играет роль теплового аккумулятора. При этом теплоемкость блоков выше, чем теплоемкость вытесняемого ими теплоносителя, что в сочетании с развитой поверхностью контейнеров обеспечивает замедление роста температур на входе в активную зону и способствует повышению безопасности. Сформированные между блоками вертикальные каналы, ориентированные в направлении, соответствующем естественной конвекции, способствуют ее быстрому развитию в авариях с отключением циркуляционных насосов, что также способствует повышению безопасности.

Промышленная применимость

Техническое решение согласно изобретению может быть использовано в энергетических установках с реактором с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) на основе свинца или сплавов на основе свинца и висмута. Предложенная конструкция ядерного реактора обеспечивает высокую степень безопасности.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Ядерный реактор с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем с размещенными в одном корпусе активной зоной, органами управления и контроля, как минимум, одним теплообменником или, как минимум, одним парогенератором, как минимум, одним циркуляционным насосом первого контура, предназначенными для прохода теплоносителя основными каналами и вспомогательными каналами, не выполняющими функцию охлаждения активной зоны, включая коллектора для сбора и распределения теплоносителя по основным и вспомогательным каналам, отличающийся тем, что во внутрикорпусном пространстве ядерного реактора, не занятом указанными элементами, размещены с зазорами, обеспечивающими проток теплоносителя, контейнеры, заполненные материалом, отражающим или поглощающим нейтроны, с теплоемкостью большей, чем теплоемкость теплоносителя, при этом контейнеры размещают таким образом, что образовавшиеся зазоры формируют каналы с турбулентным режимом течения теплоносителя для охлаждения указанных контейнеров при его расходе, соответствующем номи-

нальному уровню мощности ядерного реактора.

2. Ядерный реактор по п.1, отличающийся тем, что контейнеры размещают таким образом, что образованные между ними каналы для протока теплоносителя располагаются преимущественно вертикально.

3. Ядерный реактор по п.1, отличающийся тем, что в качестве наполнителя контейнеров используют карбид бора.

4. Ядерный реактор по п.3, отличающийся тем, что карбид бора в контейнерах находится в виде виброуплотненного порошка.

5. Ядерный реактор по п.3, отличающийся тем, что карбид бора в контейнерах находится в виде горячепрессованных блочков.

6. Ядерный реактор по п.3, отличающийся тем, что карбид бора в одной части контейнеров находится в виде горячепрессованных блочков, а в другой находится в виде виброуплотненного порошка.

7. Ядерный реактор по п.3, отличающийся тем, что в части контейнеров в качестве наполнителя используют материалы на основе гидридов тугоплавких металлов.

8. Ядерный реактор по п.3, отличающийся тем, что в части контейнеров в качестве наполнителя используют сталь.

9. Ядерный реактор по п.3, отличающийся тем, что внутри контейнеров имеется свободный объем, не занятый наполнителем.

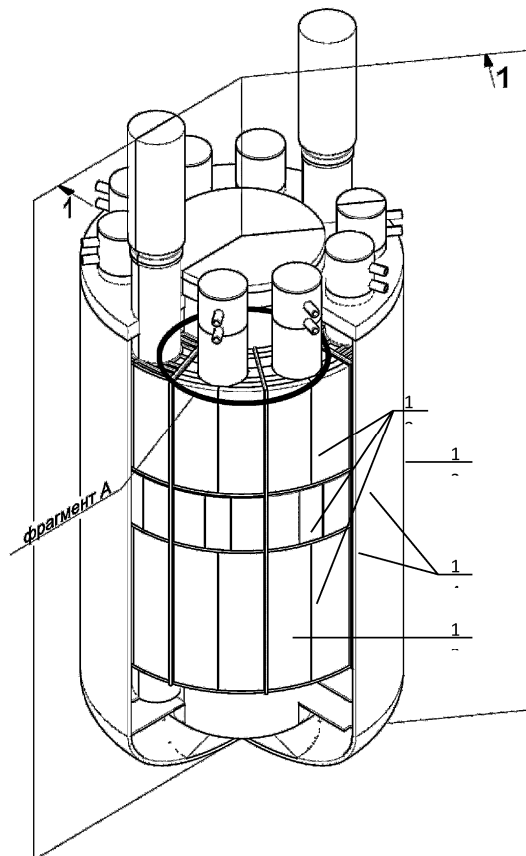
10. Ядерный реактор по п.3, отличающийся тем, что контейнеры снабжены пробками, в которых помещен фильтр.

11. Ядерный реактор по п.10, отличающийся тем, что пробки изготовлены из металлической проволоки.

12. Ядерный реактор по п.1, отличающийся тем, что вместо контейнеров используют цельные стальные блоки с сохранением внешних габаритов контейнеров.

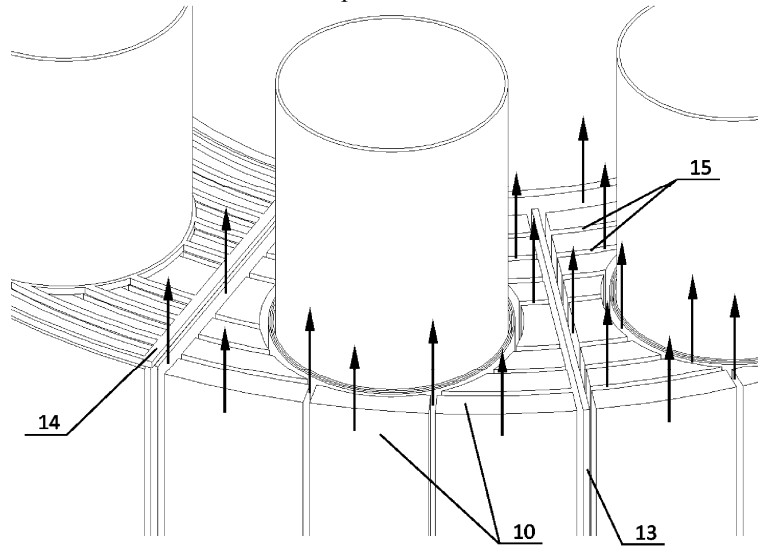
13. Ядерный реактор по п.1, отличающийся тем, что контейнеры выполнены в виде пучков стержневых контейнеров.

14. Ядерный реактор по п.1, отличающийся тем, что контейнеры имеют внутренние каналы охлаждения.



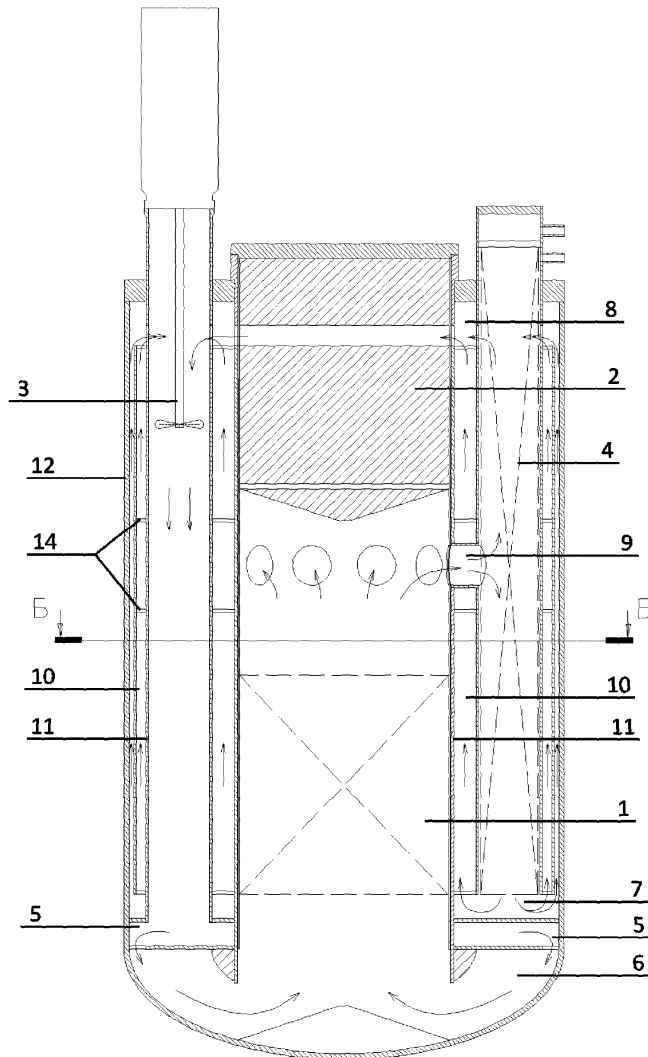
Фиг. 1

Фрагмент А



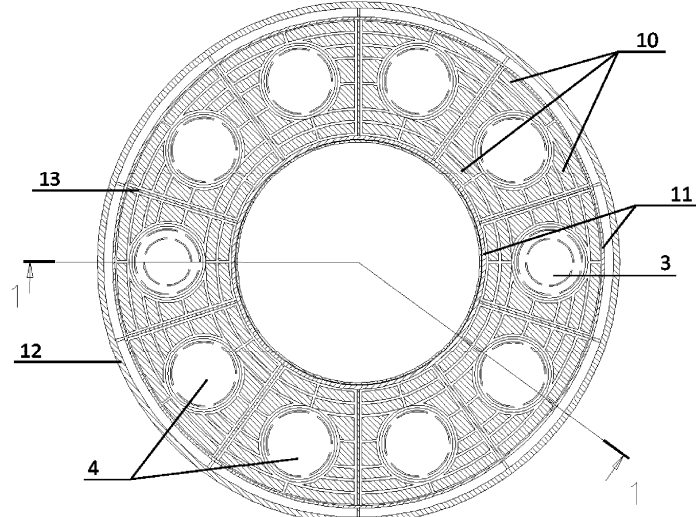
Фиг. 2

Сечение 1-1

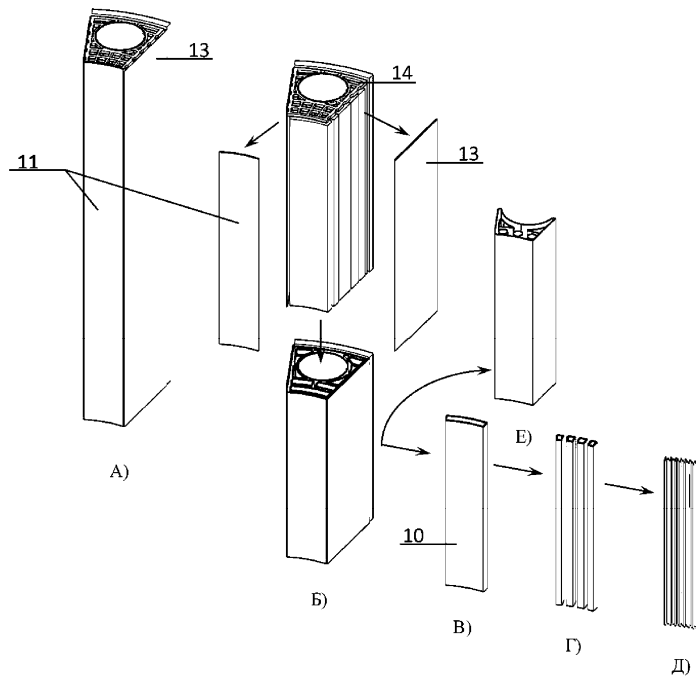


Фиг. 3

Сечение Б-Б



Фиг. 4



Фиг. 5

