(19) Евразийское патентное ведомство

(21) 202193104 (13) A2

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2022.03.31

(22) Дата подачи заявки
2017.11.15

(51) Int. Cl. ***G21C 3/54*** (2006.01)
G21C 11/06 (2006.01)
G21C 15/26 (2006.01)

(54) УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ ПРОЦЕССОМ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ С РАСПЛАВЛЕННЫМ ТОПЛИВОМ

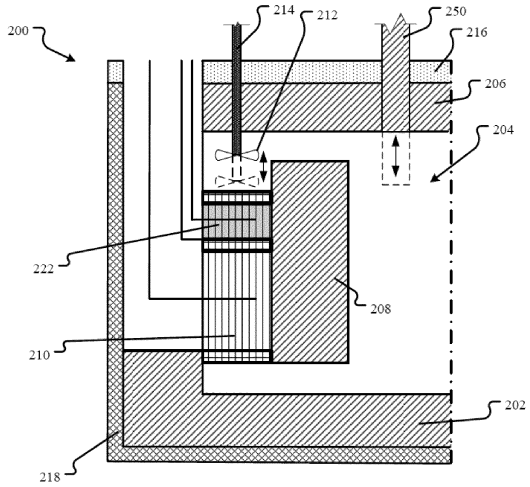
(31) **62/422,474**
(32) **2016.11.15**
(33) **US**
(62) **201991378; 2017.11.15**

(71) Заявитель:
ТЕРРАПАУЭР, ЭЛЭЛСИ (US)

(72) Изобретатель:
Эббот Райан, Сиснерос Ансельмо Т., Флауэрс Дэниель, Фриман Чарльз Грегори, Хэвстэд Марк А., Крамер Кевин, Латковски Джеффри Ф., Маквертер Джон Д., Сьюз Джон Р. (US)

(74) Представитель:
Поликарпов А.В., Соколова М.В., Путинцев А.И., Черкас Д.А., Игнатьев А.В., Билык А.В., Дмитриев А.В., Бучака С.М., Бельтюкова М.В. (RU)

(57) Предложены различные конфигурации и элементы ядерного реактора с расплавленным топливом на быстрых или тепловых нейтронах для управления рабочей температурой в активной зоне. Изобретение включает различные конфигурации теплообменников системы прямого вспомогательного охлаждения реактора (СПВОР) и теплообменников первого контура, а также описание улучшенных путей потока ядерного топлива, теплоносителя первого контура и теплоносителя СПВОР через компоненты реактора.



202193104 A2

202193104 A2

PCT/EP2017/061843G21C 3/54; G21C 11/06; G21C 15/26

Управление тепловым процессом ядерных реакторов с расплавленным топливом

По настоящей заявке, поданной 15 ноября 2017, так же как и по международной заявке PCT, испрашивается приоритет от 15 ноября 2016 согласно предварительной заявке на патент США № 62/422474, озаглавленной «Управление тепловым процессом ядерных реакторов с расплавленным топливом», которая посредством этого включена в настоящий документ путем ссылки.

Уровень техники

Применение расплавленного топлива в ядерном реакторе для выработки энергии обеспечивает значительные преимущества по сравнению с твердым топливом. Например, реакторы с расплавленным топливом в общем предоставляют более высокие плотности энерговыделения по сравнению с твердотопливными реакторами, и в то же время, имеют пониженные затраты на топливо из-за относительно высокой стоимости изготовления твердого топлива.

Расплавленные фтористые топливные соли, подходящие для использования в ядерных реакторах, были разработаны с использованием тетрафторида урана (UF_4), смешанного с другими фтористыми солями, а также с использованием фтористых солей тория. Реакторы на расплавленных фтористых солях эксплуатировали при средних температурах от 600^0C до 860^0C. Бинарные, третичные и четвертичные хлористые топливные соли урана, а также других делящихся элементов, были описаны в совместно поданной патентной заявке США № 14/981512, озаглавленной «Расплавленные ядерные топливные соли и относящиеся к ним системы и способы», которая посредством этого включена в настоящий документ путем ссылки. Помимо хлористых топливных солей, содержащих одно или более из соединений UCl_4, UCl_3F, UCl_3, UCl_2F_2 и $UClF_3$, в заявке дополнительно описывают топливные соли с модифицированным количеством ^{37}Cl, бромистые топливные соли, такие как UBr_3 или UBr_4, топливные соли на основе хлорида тория и способы и системы использования топливных солей в реакторе с расплавленным топливом. Средние рабочие температуры реакторов на хлористых солях оценивают в интервале от 300^0C до 800^0C, но они могут быть даже еще выше, например, > 1000^0C.

Краткое описание чертежей

Следующие чертежи, которые образуют часть этой заявки, являются иллюстрацией описываемой технологии и не подразумевают каким-либо образом ограничения заявленной области защиты изобретения, которая должна основываться на приложенной формуле изобретения.

На Фиг. 1 в форме блок-схемы показаны некоторые основные элементы реактора с расплавленным топливом.

На Фиг. 2A и 2B показан реактор с расплавленным топливом, оборудованный теплообменниками СПВОР (система прямого вспомогательного охлаждения реактора).

На Фиг. 2C и 2D показан способ эксплуатации того же реактора с расплавленным топливом, показанного на Фиг. 2A и 2B, который уменьшает коррозию импеллеров, при поддержании импеллеров вблизи верхней части активной хоны реактора.

На Фиг. 2E показаны два воплощения устройства перемещения топлива.

На Фиг. 2F показан другой аспект технологии, в котором топливную соль, выходящую из теплообменников, смешивают с помощью одного или более пассивных смесителей.

На Фиг. 2G показано еще одно воплощение, в котором топливную соль, выходящую из теплообменников, смешивают с помощью диффузора.

На Фиг. 3A и 3B показаны различные виды и элементы альтернативного воплощения реактора с расплавленным топливом с горизонтальным потоком теплоносителя через теплообменники.

На Фиг. 4 показано воплощение способа эксплуатации реактора в режиме противотока.

На Фиг. 5A и 5B показаны различные виды и элементы еще одного воплощения реактора с расплавленным топливом с горизонтальным потоком теплоносителя через теплообменники.

На Фиг. 6A и 6B показаны различные виды и элементы альтернативного воплощения с разделением потока теплоносителя в первом контуре реактора с расплавленным топливом с горизонтальным потоком теплоносителя через теплообменники.

На Фиг. 7A -7E показано альтернативное воплощение цилиндрического диффузора корзины активной зоны реактора.

Подробное описание

В этом изобретении описаны различные конфигурации и элементы ядерного реактора с расплавленным топливом на быстрых или тепловых нейтронах. В рамках этой заявки описывают воплощения реактора с расплавленным топливом на быстрых нейтронах, в котором используют хлористое топливо. Однако, следует понимать, что можно использовать любой тип топливной соли, известный в настоящее время или разработанный в дальнейшем, и что описанные в данном документе технологии можно равным образом применять независимо от типа используемого топлива, такого, например, как соли, содержащие один или более элементов из U, Pu, Th или любого другого актинида. Отметим, что минимальная и максимальная рабочие температуры топлива в реакторе могут изменяться в зависимости от топливной соли для поддержания соли в жидкой фазе во всем реакторе. Минимальные температуры могут составлять до 300 – 350^0C, а максимальные – до 1400^0C или выше.

На Фиг. 1 в форме блок-схемы показаны некоторые основные элементы реактора с расплавленным топливом. В общем, реактор 100 с расплавленным топливом включает активную зону 104, содержащую делящуюся топливную соль 106, которая является жидкой при рабочей температуре. Делящиеся топливные соли включают соли любого нуклида, способного претерпевать деление под воздействием низкоэнергетических тепловых нейтронов или высокоэнергетических нейтронов. Кроме того, в рамках этого изобретения делящийся материал включает любой делящийся материал, любой воспроизводящий материал или сочетание делящегося и воспроизводящего материалов. Топливная соль 106 может полностью или не полностью заполнять активную зону 10,4 и показанное воплощение изображено с возможным свободным пространством 102 выше уровня топливной соли 106 в активной зоне 104. Размер активной зоны 104 можно выбрать на основе характеристик и типа конкретной используемой топливной соли 106, чтобы достичь непрерывного состояния критичности топлива и удерживать топливо в этом состоянии, в течение которого тепло, выработанное путем непрерывного производства нейтронов в топливе, приводит к повышению температуру расплавленного топлива, когда оно находится в активной зоне. Характеристика реактора 100 улучшена путем обеспечения одного или более отражателей 108 вокруг активной зоны 104 для отражения нейтронов обратно в активную зону. Расплавленная топливная соль 106

циркулирует между активной зоной 104 и одним или более теплообменников 110 первого контура, расположенных вне активной зоны 104. Циркуляцию можно выполнять, используя один или более насосов 112.

Теплообменники 110 первого контура переносят тепло от расплавленной топливной соли 106 в теплоноситель 114 первого контура, который циркулирует через петлю 115 охладителя первого контура. В одном воплощении теплоноситель первого контура может быть другой солью, такой как $NaCl\text{-}MgCl_2$, или свинцом. Также возможны другие теплоносители, включая Na, NaK, сверхкритический CO_2 и легкоплавкий свинцово-висмутовый сплав. В одном воплощении отражатель 108 расположен между каждым теплообменником 110 первого контура и активной зоной 104, как показано на Фиг. 1. Например, в одном воплощении цилиндрическая активная зона 104, имеющая диаметр 2 метра (м) и высоту 3 м, ориентирована вертикально, так что плоские торцы цилиндра находятся сверху и снизу, соответственно. Вся активная зона 104 окружена отражателями 108, между которыми предусмотрены каналы для протекания топливной соли 106 в активную зону 104 и из нее. Восемь теплообменников 110 первого контура распределены азимутально по окружности активной зоны и набора отражателей, каждый оборудован насосами для создания циркуляции топливной соли. В альтернативных воплощениях можно использовать другое количество теплообменников 110 первого контура. Например, предусмотрены воплощения, имеющие 2, 3, 4, 5, 6, 12 и 16 теплообменников первого контура.

В воплощении, показанном на Фиг. 1, при нормальной эксплуатации (выработка энергии) топливную соль перекачивают из активной зоны 104 через теплообменник 110, и охлажденную топливную соль возвращают обратно в активную зону 104. Нагретый теплоноситель 114 первого контура из теплообменников 110 первого контура проходит в систему 120 выработки энергии для выработки какой-либо формы энергии, например, тепловой, электрической или механической. Активная зона 104, теплообменники 110 первого контура, насосы 112, трубопровод для циркуляции расплавленного топлива (включая другие вспомогательные элементы, которые не показаны, такие как обратные клапаны, запорные клапаны, фланцы, сливные баки и т.п.) и любые другие элементы, через которые расплавленное топливо циркулирует или с которыми контактирует в течение работы, можно назвать топливной петлей 116. Аналогично, петля 115 охладителя первого контура включает те элементы, через которые циркулирует теплоноситель

первого контура, включая теплообменники 110 первого контура, трубопровод циркуляции теплоносителя первого контура (включая другие вспомогательные элементы, которые не показаны, такие как насосы 113 теплоносителя, обратные клапаны, запорные клапаны, изолирующие клапаны, фланцы, сливные баки и т.п.).

Контактирующие с солью элементы теплообменника 110 и петлю 115 охладителя первого контура можно облицевать для защиты от коррозии. Другие варианты защиты включают защитные покрытия, кожухи со свободной или тугой посадкой. В одном воплощении облицовка внутренней поверхности труб представляет собой молибден, который совместно экструдируют с основным материалом труб теплообменника. Для других контактирующих с топливной солью поверхностей (внешние поверхности трубной решетки и внешние поверхности корпуса) облицовочный материал представляет собой молибденовый сплав. Другими возможными облицовочными материалами являются никель и никелевые сплавы. Ниобий, ниобиевые сплавы и молибден-рениевые сплавы можно использовать, когда требуется сварка. Элементы, находящиеся в контакте с солевым теплоносителем первого контура можно облицовывать сплавом 200 или любыми другими совместимыми металлами, такими как материалы, удовлетворяющие правилам для сосудов под давлением Американского общества инженеров-механиков. Основным материалом для трубы может быть нержавеющая сталь 316 или любые другие совместимые металлы. Например, в одном воплощении сплав 617 является материалом корпуса и трубной решетки.

Реактор 100 с расплавленным топливом дополнительно содержит по меньшей мере одну защитную оболочку 118, которая содержит топливную петлю 116, для предотвращения выброса расплавленной топливной соли 116 в случае утечки из одного из элементов топливной петли. Защитную оболочку 118 часто изготавливают из двух элементов: нижней корпусной части 118v, которая принимает форму единого сосуда с открытым верхом без каких-либо проникновений любого сорта, и колпака 118h, называемого крышкой корпуса реактора, который покрывает корпусную часть 118v. Все точки доступа в реактор 100 проходят с верхней части через крышку 118h корпуса реактора.

Одной возможной ситуацией, которая встречается в реакторах, является аварийная потеря принудительной циркуляции, при которой, возможно из-за потери мощности или по другой причине, солевые насосы прекращают функционировать. В таком случае

реактор необходимо все еще охлаждать для предотвращения неприемлемого повышения температуры, даже после того, как система защиты прекратила цепную реакцию деления, потому что продукты деления в топливной соли вырабатывают теплоту распада. Реакторы часто оборудуют системой прямого вспомогательного охлаждения реактора (СПВОР) специально для ограничения этого повышения температуры до того, как произойдет разрушение любого из элементов. СПВОР является вспомогательной системой охлаждения, которая может быть или может не быть полностью независимой от петли теплоносителя первого контура, которая сконструирована для обеспечения вспомогательного охлаждения в определенных обстоятельствах, чтобы отводить теплоту распада из топливной соли в течение аварийной потери принудительной циркуляции или при других авариях.

В некоторых случаях СПВОР основана на естественной циркуляции топливной соли через топливную петлю 116. Для многих топливных солей расплавленная соль с более высокой температурой является менее плотной, чем соль с более низкой температурой. Например, для одной топливной соли (71 мольн.% UCl_4-17 мольн.% UCl_3-12 мольн.% NaCl) при повышении температуры на 300°C (например, от 627°C до 927°C), расчетное падение плотности топливной соли составляет примерно 18%, от 3680 до 3010 кг/м^3. Разница плотности, созданная разницей температуры между солью с более высокой температурой в активной зоне и солью с более низкой температурой в других местах в топливной петле 116, создает ячейку циркуляции в топливной петле. Эту циркуляцию называют естественной циркуляцией.

В широком смысле, в этом изобретении описано множество изменений и конфигураций элементов, которые улучшают характеристику реактора 100, описанного со ссылкой на Фиг. 1.

Теплообменник теплоты распада (ТТР) СПВОР

На Фиг. 2А и 2В показан реактор с расплавленным топливом, оборудованный теплообменниками СПВОР, предназначенными для отвода теплоты распада в период остановки реактора. Остановка реактора может быть запланированной остановкой реактора, незапланированной потерей принудительной циркуляции в петле топливной соли или какой-либо другой аварией, которая требует применения СПВОР для отвода тепла из активной зоны. Фиг. 2А представляет собой вид сверху реактора 200,

показывающий расположение различных каналов и элементов, проходящих через крышку 216 корпуса реактора, и ниже крышки 216 корпуса реактора. Фиг. 2В представляет собой вид в разрезе реактора 200, взятый вдоль линии сечения А – А' Фиг. 2А. Аналогично тому, что описано со ссылкой на Фиг. 1, реактор 200 содержит активную зону в форме заданного объема 204, заполненного топливной солью. Активная зона 204 ограничена цилиндрическим отражателем 208, верхним отражателем 206 и нижним отражателем 202, с проходами, предоставленными между отражателями 208, 206, 202, для обеспечения циркуляции соли в активную зону 204 и из нее.

В показанном воплощении восемь контуров теплообменников, каждый из которых содержит теплообменник 222 СПВОР и теплообменник 210 первого контура (ТПК), расположены вокруг активной зоны 204. В верхней части и нижней части активной зоны 204 предусмотрены каналы 244 для перемещения топливной соли, которые обеспечивают путь потока между активной зоной и каждым из восьми контуров теплообменников. Активная зона 204, отражатели 208, 206, 202 и контуры теплообменников находятся внутри защитной оболочки 218 с открытым верхом, которая накрыта крышкой 216 корпуса реактора. Принудительную циркуляцию топливной соли осщуествляют с помощью восьми импеллеров 212, каждый импеллер 212 приводится в движение валом 214, который проходит через крышку 216 корпуса реактора.

Теплообменники 222 СПВОР называют теплообменниками теплоты распада (ТТР) для того, чтобы отличить их от теплообменников 210 первого контура. В показанном воплощении ТТР 222 и ТПК 210 являются кожухотрубными теплообменниками, в которых множество труб (называемых пучком труб или связкой труб) проходят через кожух, заполненный теплоносителем (эту конфигурацию иногда называют конфигурацией с охладителем в межтрубном пространстве/топливом в трубном пространстве). Топливная соль протекает через пучок труб и охлаждается теплоносителем. В показанном воплощении каждый ТТР 222 расположен вертикально сверху связанного с ним ТПК 210. Кожух ТТР 222 и кожух ТПК 210 разделены трубной решеткой 240, через которую проходит непрерывный пучок вертикальных труб. В показанном воплощении топливо течет через трубы пучка труб. Теплоноситель течет через кожух вокруг труб пучка труб. Трубная решетка 240 также обеспечена на входе и выходе контуров теплообменников.

В воплощении, показанном на Фиг. 2А, теплоноситель ТТР и теплоноситель ТПК поставляют с помощью независимых контуров теплоносителя. В показанном воплощении

первый контур теплоносителя поставляет теплоноситель первого контура в нижнюю часть каждого из кожухов ТПК через входной канал 228 и через возвратный канал 230 отводит нагретый теплоноситель первого контура из верхней части каждого кожуха ТПК. Теплоноситель СПВОР поставляют с помощью входного канала 224 теплоносителя СПВОР через крышку 216 корпуса реактора в кожух ТТР и затем отводят, снова через крышку корпуса реактора, с помощью возвратного канала 226 теплоносителя СПВОР.

Также возможны альтернативные воплощения. Например, ТТР и ТПК в контуре теплообменника могут быть теплообменниками различного типа. Например, помимо кожухотрубных теплообменников могут подойти пластинчатые (иногда также называемые рамными пластинчатыми теплообменниками), кожухопластинчатые, пластинчатые теплообменники с вытравленными каналами и ребристые пластинчатые теплообменники. Альтернативно или дополнительно, можно изменять относительное положение ТТР и ТПК относительно друг друга. Например, ТТР может быть расположен после или ниже связанного с ним ТПК. В еще одном воплощении не вся соль, проходящая через ТПК, также может проходить через связанный с ним ТТР.

Аналогично, можно изменять положение входного и возвратного каналов теплоносителя. Например, входной и возвратный каналы 224, 226 теплоносителя СПВОР и/или входной и возвратный каналы 228, 230 теплоносителя ТПК могут быть расположены между ТТР 222 и цилиндрическим отражателем 208 или в любом другом положении относительно связанных с ними теплообменников, а не между теплообменниками и защитной оболочкой 213, как показано.

Теплоноситель первого контура и теплоноситель СПВОР могут иметь одинаковый состав, или они могут быть различными. В одном воплощении теплоноситель первого контура и/или СПВОР может представлять собой другую соль, такую как $NaCl\text{-}MgCl_2$, или свинец. Также возможны другие теплоносители, включая Na, NaK, сверхкритический CO_2 и легкоплавкий свинцово-висмутовый сплав.

В течение нормальной, с выработкой энергии, работы СПВОР может охлаждать или может не охлаждать топливную соль. В одном воплощении, например, ТТР не обеспечивают какого-либо охлаждения в течение нормальной работы, так что все тепло, удаленное из топливной соли, удаляют с помощью ТПК. В этом воплощении теплоноситель СПВОР в ТТР оставляют нагреваться до рабочей температуры. Нагретый теплоноситель СПВОР можно периодически или непрерывно подвергать циркуляции,

например, через петлю охладителя ТТР или СПВОР для предотвращения засорения. В альтернативном воплощении СПВОР непрерывно работает, и тепло, удаленное с помощью теплоносителя СПВОР, можно извлекать или можно не извлекать для выработки энергии или общего нагрева.

Смесители топлива

На Фиг. 2F показан другой аспект технологии, в котором топливную соль, выходящую из теплообменников, перемешивают с помощью одного или более пассивных смесителей. Это можно выполнять, используя любой сорт перегородок, профилей и/или другое оборудование, которое обеспечивает перемешивание топливной соли для предотвращения развития горячих и холодных зон в передаточных каналах 244 топливной соли. В показанном воплощении ряд неподвижных смесительных лопастей 256 показан в нижней части передаточного канала 244 топливной соли. Смесительным лопастям 256 придают форму для повышения перемешивания топливной соли, по мере того, как она течет вокруг лопастей.

Также показан другой смеситель в форме диафрагмы 254 с отверстиями. В одном воплощении диафрагма 254 с отверстиями представляет собой простую перфорированную пластину, снабженную множеством круглых отверстий, через которые течет топливная соль. Турбулентность, создаваемая потоком через пластину 254, усиливает перемешивание и делает однородной температуру топливной соли. В другом воплощении отверстия в снабженной отверстиями диафрагме 254 могут иметь специальную форму, быть наклонными или расположенными другим образом к направлению потока, чтобы еще больше усилить перемешивание.

На Фиг. 2G показано другое воплощение, в котором топливную соль, выходящую из теплообменников, перемешивают с помощью пассивного смесителя, в этом случае вертикального диффузора, что вызывает поставку охлажденной топливной соли в активную зону в различных положениях по вертикали по окружной поверхности активной зоны. В этом воплощении топливную соль, выходящую из ТПК 210, направляют в диффузор 260 корзины активной зоны. Диффузор 260 корзины активной зоны ограничен внешней цилиндрической стенкой 262, соседней или находящейся в контакте с боковым отражателем 208, и внутренней цилиндрической стенкой 264, которая определяет окружную поверхность активной зоны 204. Внешняя стенка 262 и внутренняя стенка 264

разделены пространством, которое образует цилиндрическую камеру 266, через которую охлажденная топливная соль проходит перед поступлением в активную зону 204. В показанном воплощении внешняя стенка 262 и внутренняя стенка 264 соединены в верхней части верхней стенкой 270. Охлажденная топливная соль из выхода ТПК 210 течет в диффузор 260 корзины активной зоны. В показанном воплощении охлажденная топливная соль течет в нижнюю часть диффузора 260 корзины активной зоны через отверстие во внешней стенке 262, предусмотренное для каждого ТПК 210. Внутренняя стенка 264 снабжена отверстиями 268 в различных местах для регулирования потока охлажденной топливной соли в активную зону 204. В показанном воплощении расположены на различных уровнях по вертикали вдоль внешней стенки 264 от нижней части до почти самого верха диффузора 260 корзины активной зоны, хотя относительно большее количество отверстий обеспечено в нижней части активной зоны 204.

Эта конструкция диффузора 260 корзины активной зоны приводит к относительно более холодной топливной соли вблизи бокового отражателя 208, по существу образуя слой охлажденной топливной соли вокруг внешней части активной зоны. Это обеспечивает большую гибкость в выборе материалов отражателя и конструкции отражателя. Фактически, можно обеспечить одно или более отверстий, ведущих из диффузора 260 корзины активной зоны во входной канал 244 топливной соли, таким образом также охлаждая верхнюю поверхность бокового отражателя 208. На Фиг. 7A – 7E ниже более подробно показано альтернативное воплощение цилиндрического диффузора корзины активной зоны.

В цилиндрических диффузорах корзины активной зоны Фиг. 2G и Фиг. 7A – 7E камера 266 представляет собой непрерывное пространство вокруг активной зоны 204, в котором собирается вся охлажденная топливная соль перед ее поступлением в активную зону 204. Однако цилиндрический диффузор 260 корзины активной зоны представляет собой диффузор только одной возможной геометрии, благодаря которой поток охлажденной топливной соли направляется в активную зону на различных уровнях по вертикали вокруг внешней части активной зоны. В альтернативном воплощении предоставляют отдельный диффузор для каждого ТПК 210, которой является просто камерой приблизительно в форме вертикально ориентированной прямоугольной призмы или цилиндрической секции, которая проходит от нижней части активной зоны 204 до входного канала ТПК 210 или даже до верхней части активной зоны 204. Снабженные

отверстиями 268 по вертикали вдоль внутренней стенки 264, отдельные диффузоры отличаются от цилиндрического диффузора 260 корзины активной зоны тем, что охлажденная топливная соль из каждого ТПК 210 не собирается в одной камере и не проходит через одну камеру, а вместо этого отдельные выходящие потоки охлажденной топливной соли держат отдельно до сбора в активной зоне 204.

На Фиг. 7A – 7E более подробно показано альтернативное воплощение цилиндрического диффузора корзины активной зоны. На Фиг. 7A показан вид в перспективе диффузора 700 корзины активной зоны. В показанном воплощении диффузор 700 корзины активной зоны содержит внешнюю стенку 702 и внутреннюю стенку 704, где внутренняя стенка 704 снабжена отверстиями 706. Внешняя стенка 702 представлена сужающейся на конус вблизи верхней части диффузора 700, и две стенки 702, 704 соединены верхней стенкой 708.

Фиг. 7B представляет собой вид в перспективе поперечного сечения диффузора 700 корзины активной зоны, показывающий более подробно внутреннюю стенку 704 и отверстия 706. В показанном воплощении отверстия выполнены рядами, расположенными вокруг внутренней стенки 704 на различных уровнях внутри диффузора 700. Как показано, относительно большее количество отверстий 706 выполнено вблизи нижней части диффузора 700. Отверстия обеспечивают доступ к пространству 712 между внутренней стенкой 704 и внешней стенкой 702, которое действует как камера 712 для транспортировки топливной соли из нижней части диффузора 700 в активную зону.

Фиг. 7C представляет собой вид сверху со стороны диффузора, а Фиг. 7D представляет собой вид сверху в поперечном сечении, снова показывающий более подробно внутреннюю стенку 704, ряды отверстий 706, камеру 712 и сужающуюся на конус внешнюю стенку 702. На Фиг. 7D также показан путь потока охлажденной топливной соли, поступающей в активную зону через ряды отверстий 706. Расплавленная топливная соль поступает в камеру 712 снизу под давлением и течет через отверстия 706 в активную зону.

Фиг. 7E является подробным видом сверху в поперечном сечении Фиг. 7D основания диффузора 700, показывающим камеру 712 и ряды отверстий 706 у основания внутренней стенки 704.

В показанном воплощении отверстия представляют собой простые горизонтально расположенные цилиндрические отверстия во внутренней стенке 704. В альтернативном

воплощении отверстия можно расположить диагонально, например, под углом 45 градусов (вверх или вниз), для направления потока топливной соли, поступающей в активную зону вверх или вниз, в зависимости от требуемой картины течения. В еще одном воплощении отверстия могут иметь форму усеченного конуса, из-за чего они действуют как простые сопла для пассивного регулирования скорости потока в активную зону. В еще одном воплощении в каждом отверстии можно установить сопло, имеющее более сложный путь потока. Все отверстия или сопла могут быть одинакового размера и/или одинаково ориентированы, или могут иметь разные размеры и/или быть по-разному ориентированными для достижения более сложных картин циркуляции соли внутри активной зоны в течение работы.

В показанном воплощении внешняя стенка 702 сужается на конус, что достигается двумя коническими секциями перед внешней стенкой 702 и внутренней стенкой 704, покрываемых верхней стенкой 710. Внешняя стенка показана с приблизительно равномерной толщиной, так что сужение на конус также обеспечивают для камеры 712. Коническую форму камеры 712 используют для регулирования профиля потока охлажденной топливной соли через камеру 712. В альтернативном воплощении сужения на конус можно достичь, используя более или менее конические секции или один или более стрельчатых сводов. В еще одном воплощении внешняя стенка 704 не является равномерной по толщине, однако, все еще предоставляет собой сужающуюся на конус камеру 712. Например, внешняя поверхность внешней стенки 704 может не сужаться на конус, но толщина стенки 702 возрастает вблизи верхней части активной зоны для сохранения конического профиля камеры 712, как описано выше.

В показанном воплощении диффузора диффузор 700 имеет цилиндрическую конфигурацию. Возможны другие конфигурации, включая любую регулярную или нерегулярную призму, такую как восьмиугольная призма, шестиугольная призма, прямоугольная призма или кубическая форма.

Устройства перемещения топлива

Для эффективной работы реактора с расплавленными топливными солями может быть полезным регулирование уровня топливной соли в реакторе. Как упоминали выше со ссылкой на Фиг. 1, топливная соль 106 может полностью или не полностью заполнять активную зону и показанное воплощение проиллюстрировано с возможным свободным

пространством 102 выше уровня топливной соли 106 в активной зоне 104. В одном воплощении реактор может быть оборудован одним или более устройствами перемещения топлива для регулирования уровня топливной соли в течение работы. Устройство перемещения топлива является элементом, который можно использовать для изменения общего объема топливной петли 116 либо путем перемещения элемента в топливную петлю 116 или из топливной петли 116, либо путем изменения размера элемента, который уже находится в топливной петле.

На Фиг. 2E показаны два примера устройства перемещения топлива. Одним примером простого устройства перемещения топлива является вытесняющий стержень 250, который можно изготовить из отражающего или поглощающего материала, который проходит через крышку 216 корпуса реактора в активную зону 204, таким образом перемещая топливо в активную зону. На Фиг. 2E показан такой стержень 250, который можно перемещать между первым положением, в котором стержень находится вплотную к верхнему отражателю 206, и вторым положением, показанным пунктирными линиями, в котором стержень 250 проник в активную зону 204. Такой вытесняющий стержень не обязательно проходит через крышку 216 корпуса реактора, как показано, а вместо этого его можно встроить в верхний отражатель 206. Вытесняющий стержень 250 может быть настолько большим, насколько это необходимо. Действительно, в одном воплощении весь верхний отражатель 206 может быть подвижным для того, чтобы действовать как устройство перемещения. Во втором показанном примере в качестве устройства перемещения используют вал 214. В этом воплощении положение импеллера 212 можно повысить или понизить, изменяя таким образом объем топливной петли, поднимая вал 214. Устройство перемещения можно расположить в любом месте внутри реактора. Например, стержень 250 может выходить из нижнего отражателя 202 или цилиндрического отражателя 208. Кроме того, вытесняющий стержень 250 не обязательно входит в активную зону 204, но может перемещать топливо из любого положения в топливной петле.

В альтернативном воплощении устройство перемещения может принимать форму элемента, который уже находится внутри реактора 200, но который может изменять свою форму или быть регулируемым другим образом, чтобы объем топливной петли изменялся. Например, в топливной петле можно разместить металлические сильфоны, содержащие теплоноситель первого контура или СПВОР, например, выше или ниже контуров

теплообменников. Размер сильфонов можно регулировать путем закачивания или удаления теплоносителя. В еще одном воплощении сильфоны можно заполнить инертным газом и размер регулировать путем закачивания или удаления газа.

Перемещение топлива можно использовать для регулирования реактивности, обеспечивая таким образом настройку реактивности посредством движений устройства перемещения. Этого можно достичь посредством изменения формы объема активной зоны. Дополнительное регулирование реактивности можно обеспечить путем включения замедлителя в устройство перемещения. В одном воплощении устройство перемещения также представляет собой управляющий стержень, изготовленный, по меньшей мере частично, из замедлителя. Например, такое устройство может быть замедлителем, например, содержащим бор (например, B_4C), серебро, индий или кадмий, с защитной оболочкой или облицовкой, как описано выше, для предотвращения контакта замедлителя с топливной солью.

Другим примером устройств перемещения топлива являются перемещающие лопатки 252, как показано на Фиг. 2А. В этом воплощении в топливной петле обеспечена одна или более лопаток 252, например, в активной зоне 204, как показано. Лопатки 252 могут быть выполнены из отражающего или поглощающего материала, и они могут иметь облицовку или оболочку для защиты от контакта с солью. Лопатки могут проходить через крышку 216 корпуса реактора в активную зону 204. Лопатки 252 могут быть подвижными, чтобы их можно было поднимать или опускать, перемещая таким образом топливо в активную зону. В одном воплощении лопатки можно полностью удалить из активной зоны 204. Один аспект перемещающих лопаток 252, отличный от простых стержней 250, состоит в том, что лопатки 252 служат для стабилизации и направления потока соли через активную зону 204.

Обратное течение топлива

В реакторах с расплавленным топливом импеллеры насосов являются такими компонентами, которые должны работать в особенно неблагоприятной среде. Чтобы воспользоваться преимуществом силы естественной циркуляции, в реакторах с топливной солью удаляют горячую топливную соль из верхней части активной зоны, переносят тепло от соли и затем возвращают охлажденную соль в нижнюю часть активной зоны. В конструкции реактора, в которой импеллеры насосов приводят в движение с помощью

вала, который проходит через верхнюю часть крышки корпуса реактора, требуется расположить импеллеры вблизи верхней части реактора. Однако топливная соль часто является очень коррозионной и при температуре топливной соли часто повышается способность к коррозии. Верхнее положение импеллеров в результате подвергает импеллеры воздействию топливной соли с наивысшей температурой в топливной петле 116, которое происходит в точке выхода топливной соли из активной зоны, увеличивая таким образом коррозию импеллеров.

На Фиг. 2C и 2D показан способ эксплуатации такого же реактора с расплавленным топливом, как показанный на Фиг. 2A и 2B, который уменьшает коррозию импеллеров 212, при этом поддерживая импеллеры вблизи верхней части активной зоны 204. В показанном воплощении уменьшения коррозии достигают путем изменения направления потока соли в топливной петле на противоположной в период нормальной, с выработкой энергии, работы (направление потока изменяют на противоположное относительно потока соли, обусловленного естественной циркуляцией). Другими словами, путем изменения направления потока топливной соли на противоположное в течение нормальной, с выработкой энергии, работы, так что охлажденная соль поступает в верхнюю часть активной зоны 204, а горячая соль выходит из нижней части активной зоны 204, установленные сверху импеллеры 212 подвергаются воздействию соли с наименьшей температурой в топливной петле на выходе из теплообменников 210, 222. Рабочая среда с более низкой температурой позволяет снизить затраты на материалы, необходимые для импеллеров, при сохранении положения установки импеллеров в верхней части, и также может улучшить эффективность закачивания.

На Фиг. 4 показан способ обратного течения топлива в виде блок-схемы. В показанном воплощении способа 400 способ начинается с предоставления ядерного реактора с расплавами солей, содержащего активную зону, описанную выше, в операции 402. Циркуляция обратного течения начинается с операции 404 закачивания охлажденной топливной соли. В этой операции 404 низкотемпературное ядерное топливо поставляют в верхнюю область активной зоны, вытесняя таким образом часть высокотемпературного ядерного топлива из активной зоны вниз и из активной зоны в контур теплообменников. Затем выполняют операцию 406 удаления и охлаждения нагретой топливной соли. В этой операции 406 вытесненное высокотемпературное топливо удаляют из реактора, и оно течет вверх через контур теплообменников, перенося таким образом тепло из

высокотемпературного ядерного топлива в теплоноситель и превращая вытесненное высокотемпературное ядерное топливо в низкотемпературное ядерное топливо.

Эту технологию обратного течения топливной соли в реакторе с расплавом топливной соли, в которой направление естественной циркуляции и рабочее направление циркуляции топливной соли являются противоположными, можно использовать при любой геометрии активной зоны реактора с расплавом топливной соли, и она не ограничена использованием в реакторах, содержащих теплообменники СПВОР. В альтернативном воплощении в петле топливной соли можно обеспечить односторонние клапаны для изменения пути циркуляции топлива в зависимости от того, находится ли реактор под принудительной циркуляцией, или под естественной циркуляцией. Например, в одном воплощении односторонние клапаны можно установить в части или во всех каналах, соединяющих активную зону с теплообменниками, так что во время естественной циркуляции весь поток топливной соли направлен только через некоторые нитки теплообменников (или только через некоторые трубы в теплообменниках), при этом в течение нормальной работы он направлен через все восемь ниток теплообменников и все трубы в пучках труб теплообменников.

Отметим, что естественная циркуляция во время аварийной потери принудительной циркуляции теперь противоположна течению естественной циркуляции во время нормальной работы. При аварийной потере принудительной циркуляции это означает, что существует некоторый период времени перед тем, как поток соли сможет изменить направление на обратное и достигнуть установившегося течения естественной циркуляции.

Теплообменник первого контура с горизонтальным потоком теплоносителя

На Фиг. 3А и 3В показаны различные виды и элементы альтернативного воплощения реактора с расплавленным топливом с горизонтальным потоком теплоносителя через теплообменники. Фиг. 3А представляет собой вид сверху реактора 300, показывающий положения различных каналов и элементов, проходящих через крышку 316 корпуса реактора, и ниже крышки 316 корпуса реактора. Фиг. 3В представляет собой вид в разрезе реактора 300, взятый вдоль линии сечения В – В’ Фиг. 3А.

В показанном воплощении, аналогично тому, что описано со ссылкой на Фиг. 1 и 2A - 2D, реактор 300 содержит активную зону 304, заполненную топливной солью. Активная зона 304 ограничена цилиндрическим отражателем 308, верхним отражателем 306 и нижним отражателем 302. В показанном воплощении четыре контура теплообменников, каждый из которых содержит теплообменник 322 СПВОР и ТПК 310, расположены на расстоянии вокруг активной зоны 304. В верхней части и нижней части активной зоны 304 предусмотрены каналы 344 для перемещения топливной соли, которые обеспечивают путь потока между активной зоной и каждым из четырех контуров теплообменников. Активная зона 304, отражатели и контуры теплообменников находятся внутри защитной оболочки 318 с открытым верхом, которая накрыта крышкой 316 корпуса реактора. Принудительная циркуляция топливной соли осуществляется четырьмя импеллерами 312, каждый импеллер 312 приводится в движение валом 314, который проходит через крышку 316 корпуса реактора.

В течение аварийной потери принудительной циркуляции реактор 300 образует ячейку естественной циркуляции с топливной солью, текущей вверх через активную зону 304 и вниз через контуры теплообменников. Реактор 300 может работать с обратным течением в течение нормальной работы, как описано выше со ссылкой на Фиг. 2C и 2D. В этом воплощении обратного течения импеллеры 312 предназначены для того, чтобы вызвать течение топлива из верхней части контура теплообменников в верхнюю область/верх активной зоны 304.

Реактор 300 отличается, по меньшей мере частично, от описанных выше реакторов маршрутом протекания теплоносителя первого контура через по меньшей мере ТПК 310. В показанном воплощении как теплообменники 322 СПВОР, так и ТПК 310 являются кожухотрубными теплообменниками, которые содержат кожух, содержащий множество труб (опять называемых вместе пучком труб или связкой труб) и покрытый на любом конце трубной решеткой 342. Кроме того, как показано, два теплообменника 310, 322 в каждом контуре теплообменников совместно используют кожух и трубы пучка труб, причем теплоноситель СПВОР отделен от теплоносителя первого контура с помощью промежуточной трубной решетки внутри совместно используемого кожуха. Теплоноситель первого контура через каждый ТПК 310 поставляют в боковую часть ТПК 310, и он проходит горизонтально мимо труб, вместо того, чтобы принудительно циркулировать по какому-либо пути циркуляции между различными вертикальными

уровнями внутри ТПК 310. Этого достигают путем поставки теплоносителя в каждый ТПК 310 через одну боковую стенку и удаления теплоносителя из противоположной боковой стенки, создавая таким образом горизонтальный поток теплоносителя через пучок труб между двумя противоположными боковыми стенками. Альтернативно можно использовать конструкцию пластинчатого теплообменника (не показано).

В показанном воплощении входной канал 328 и возвратный канал 330 для теплоносителя каждого ТПК расположены на противоположных сторонах каждого ТПК 310. Таким образом, холодный теплоноситель течет через входной канал 328 в камеру, которая содержит снабженную отверстиями боковую стенку 340 (лучше всего видно на Фиг. 3В) в кожухе ТПК 310. Теплоноситель течет через снабженную отверстиями боковую стенку 340 в ТПК 310 и горизонтально мимо труб в трубном пучке, охлаждая таким образом топливную соль, текущую вертикально через трубный пучок. Нагретый теплоноситель течет горизонтально на противоположную сторону ТПК 310, выходит из ТПК 310 через снабженную отверстиями боковую стенку 340 и входит из реактора 300 через возвратный канал 330.

В показанном воплощении каждый входной канал 328 расположен в направлении против часовой стрелки (как показано на Фиг. 3А) относительно связанного с ним ТПК 310. В альтернативном воплощении (не показано) входные каналы 328 для соседних ТПК 310 могут быть совмещенными на одной стенке или могут быть одним каналом, который служит двум различным ТПК. Возвратные каналы 330 аналогично могут быть совмещенными в различных наборах соседних ТПК 310. В этой конфигурации стенки между совмещенными каналами не обязательно должны быть изолированными, так как они направляют теплоноситель одинаковой температуры в различные теплообменники. В альтернативном воплощении все стенки между совмещенными каналами можно устранить.

ТТР 322 СПВОР также может быть или может не быть предназначен для использования горизонтально текущего теплоносителя. В показанном воплощении теплоноситель СПВОР поставляют в верхнюю часть одного угла ТТР с помощью входного трубопровода 324 теплоносителя СПВОР и удаляют из верхней части противоположного угла с помощью возвратного трубопровода 326 для теплоносителя СПВОР. Для того, чтобы обеспечить горизонтальное течение через ТТР, теплоноситель СПВОР можно поставлять в противоположные камеры и удалять из противоположных

камер внутри кожуха ТТР. Камеры можно снабдить боковыми стенками с отверстиями (не показаны), так что они действуют как распределительный трубопровод и поставляют и удаляют теплоноситель горизонтально из области кожуха, которая содержит пучок труб, аналогично тому, как теплоноситель поставляют в ТПК 310.

Как обсуждали выше, можно обеспечить различные перегородки, профили и другое оборудование для равномерной поставки потока теплоносителя в теплообменники и из теплообменников, например, в каналах 328, 330, боковых стенках и/или внутри кожухов теплообменников.

На Фиг. 5A и 5B показаны различные виды и элементы еще одного воплощения реактора с расплавленным топливом с горизонтальным потоком теплоносителя через теплообменники. Фиг. 5A представляет собой вид сверху реактора 500, показывающий положения различных каналов и элементов, проходящих через крышку 516 корпуса реактора, и ниже крышки 516 корпуса реактора. Фиг. 5B представляет собой вид в разрезе реактора 500, взятый вдоль линии сечения B – B' Фиг. 5A.

В показанном воплощении, аналогично тому, что описано со ссылкой на Фиг. 1 и 2A - 2D, реактор 500 содержит активную зону 504, заполненную топливной солью. Активная зона 504 ограничена цилиндрическим отражателем 508, верхним отражателем 506 и нижним отражателем 502. В показанном воплощении четыре контура теплообменников, каждый из которых содержит теплообменник 522 СПВОР и ТПК 510, расположены на расстоянии вокруг активной зоны 504. В верхней части и нижней части активной зоны 504 предусмотрены каналы 544 для перемещения топливной соли, которые обеспечивают путь потока между активной зоной и каждым из четырех контуров теплообменников. Активная зона 504, отражатели и контуры теплообменников находятся внутри защитной оболочки 518 с открытым верхом, которая накрыта крышкой 516 корпуса реактора. Принудительная циркуляция топливной соли осуществляется четырьмя импеллерами 512, каждый импеллер 512 приводится в движение валом 514, который проходит через крышку 516 корпуса реактора.

Реактор 500 отличается, по меньшей мере частично, от описанных выше реакторов разделением маршрута течения теплоносителя первого контура через по меньшей мере ТПК 510. В показанном воплощении как теплообменники 522 СПВОР, так и ТПК 510 являются кожухотрубными теплообменниками, которые содержат кожух, содержащий множество труб (опять называемых вместе пучком труб или связкой труб) и покрытый на

любом конце трубной решеткой 542. Как и на Фиг. 3В, теплообменник СПВОР и ТПК 510 совместно используют кожух и трубы пучка труб, причем теплоноситель СПВОР отделен от теплоносителя первого контура с помощью промежуточной трубной решетки 542 внутри совместно используемого кожуха.

Воплощение 500 разделения потока теплоносителя первого контура отличается от показанного на Фиг. 3В путем потока и каналами для протекания теплоносителя первого контура через каждый ТПК 510. В воплощении разделения потока ТПК 510 разделяют трубной решеткой 542 на две зоны. Как показано, теплоноситель первого контура течет через первую более низкую зону и затем его направляют с помощью промежуточного канала 532 в верхнюю зону и из реактора 500. Снова теплоноситель первого контура проходит горизонтально мим труб, вместо того, чтобы принудительно циркулировать по какому-либо пути циркуляции между различными вертикальными уровнями внутри ТПК 510. Этого достигают путем поставки теплоносителя в каждый ТПК 510 через одну боковую стенку и удаления теплоносителя из противоположной боковой стенки, создавая таким образом горизонтальный поток теплоносителя через пучок труб между двумя противоположными боковыми стенками. В показанном воплощении теплоноситель делает два прохода через ТПК 510, так что наиболее холодный теплоноситель проходит мимо труб, содержащих наиболее холодную топливную соль. Чтобы достичь такого же охлаждения, как для Фиг. 3А и 3В, полагая такой же размер ТПК, массовый расход теплоносителя первого контура необходимо повысить вдвое. В одном воплощении потоки теплоносителя первого контура и расплавленной топливной соли выбирают так, чтобы общее количество отведенного тепла равнялось общей выделенной топливной солью энергии. В воплощении Фиг. 5А и 5В длина пути теплоносителя первого контура через кожух вдвое больше длины пути в случае Фиг. 3А и 3В. Поэтому, из-за этих двух эффектов, перепад давления теплоносителя первого контура между входом и выходом возрастает.

Одним аспектом воплощения Фиг. 5А и 5В является более равномерный температурный профиль топливной соли, выходящей из ТПК 510. Температура топливной соли, выпускаемой между верхней и нижней половинами ТПК 510, имеет неравномерное распределение, так как теплоноситель первого контура, поступающий в верхнюю половину справа является более холодным, чем теплоноситель, выходящий слева. Температура топливной соли в трубах слева поэтому является более высокой. Нижняя

половина ТПК 510, однако, содержит более холодный теплоноситель первого контура, поступающий с левой стороны, который охлаждает более теплую топливную соль, поступающую через трубы с левой стороны. Эта конфигурация уменьшает или устраняет неравномерное распределение температуры топливной соли, выпускаемой из нижней половины ТПК 510, по сравнению с воплощением, показанным на Фиг. 3А и 3В.

В показанном воплощении входной канал 528 и возвратный канал 530 для теплоносителя каждого ТПК расположены на одной и той же стороне соответствующего ТПК 510. Таким образом, холодный теплоноситель течет через входной канал 528 в камеру, которая содержит снабженную отверстиями боковую стенку 540 в кожухе ТПК 510. Теплоноситель течет через снабженную отверстиями боковую стенку 540 в ТПК 510 и горизонтально мимо труб в трубном пучке, охлаждая таким образом топливную соль, текущую вертикально через трубный пучок. Нагретый теплоноситель течет горизонтально на противоположную сторону ТПК 510, выходит из ТПК 510 через снабженную отверстиями боковую стенку 540 и входит из реактора 500 через возвратный канал 530. В альтернативном воплощении (не показано) входные каналы 528 для соседних ТПК 510 могут быть совмещенными на одной стенке или могут быть одним каналом, который служит двум соседним ТПК.

ТТР 522 СПВОР также может быть или может не быть предназначен для использования горизонтально текущего теплоносителя. В показанном воплощении теплоноситель СПВОР поставляют в верхнюю часть одного угла ТТР с помощью входного трубопровода 524 теплоносителя СПВОР и удаляют из верхней части противоположного угла с помощью возвратного трубопровода 526 для теплоносителя СПВОР. Для того, чтобы обеспечить горизонтальное течение через ТТР, теплоноситель СПВОР можно поставлять в противоположные камеры и удалять из противоположных камер внутри кожуха ТТР. Камеры можно снабдить боковыми стенками с отверстиями (не показаны), так что они действуют как распределительный трубопровод и поставляют и удаляют теплоноситель горизонтально из области кожуха, которая содержит пучок труб, аналогично тому, как теплоноситель поставляют в ТПК 510.

На Фиг. 6А и 6В показаны различные виды и элементы альтернативного воплощения разделения потока теплоносителя первого контура реактора с расплавленным топливом с горизонтальным потоком теплоносителя через теплообменники. Фиг. 6А представляет собой вид сверху реактора 600, показывающий положения различных

каналов и элементов, проходящих через крышку 616 корпуса реактора и ниже крышки 616 корпуса реактора. Фиг. 6B представляет собой вид в разрезе реактора 600, взятый вдоль линии сечения B – B’ Фиг. 6A.

В показанном воплощении, аналогично тому, что описано со ссылкой на 3A и 3B и 5A и 5B, реактор 600 содержит активную зону 604, заполненную топливной солью. Активная зона 604 ограничена цилиндрическим отражателем 608, верхним отражателем 606 и нижним отражателем 602. В показанном воплощении четыре контура теплообменников, каждый из которых содержит теплообменник 622 СПВОР и ТПК 610, расположены на расстоянии вокруг активной зоны 604. В верхней части и нижней части активной зоны 604 предусмотрены каналы 644 для перемещения топливной соли, которые обеспечивают путь потока между активной зоной и каждым из четырех контуров теплообменников. Активная зона 604, отражатели и контуры теплообменников находятся внутри защитной оболочки 618 с открытым верхом, которая накрыта крышкой 616 корпуса реактора. Принудительная циркуляция топливной соли приводится в движение четырьмя импеллерами 612, каждый импеллер 612 приводится в движение валом 614, который проходит через крышку 616 корпуса реактора.

В течение аварийной потери принудительной циркуляции реактор 600 образует ячейку естественной циркуляции с топливной солью, текущей вверх через активную зону 604 и вниз через контуры теплообменников. Реактор 600 может работать с обратным течением во время нормальной работы, как описано выше со ссылкой на Фиг. 2C и 2D. В этом воплощении обратного течения импеллеры 612 предназначены для того, чтобы вызвать течение топлива из верхней части контура теплообменников в верхнюю область/верх активной зоны 604.

Реактор 600 отличается, по меньшей мере частично, от описанных выше реакторов маршрутом течения теплоносителя первого контура через по меньшей мере ТПК 610. В показанном воплощении как теплообменники 622 СПВОР, так и ТПК 610 являются кожухотрубными теплообменниками, которые содержат кожух, содержащий множество труб (снова называемых вместе пучком труб или связкой труб) и покрытый на любом конце трубной решеткой 642. Кроме того, как показано, два теплообменника в каждом контуре теплообменников совместно используют кожух и трубы пучка труб, причем теплоноситель СПВОР отделен от теплоносителя первого контура с помощью промежуточной трубной решетки внутри совместно используемого кожуха.

Теплоноситель первого контура через каждый ТПК 610 поступает в боковую часть ТПК 610 и проходит горизонтально мимо труб, вместо того, чтобы принудительно циркулировать по какому-либо пути циркуляции между различными вертикальными уровнями внутри ТПК 610. Этого достигают путем поставки теплоносителя в каждый ТПК 610 через одну боковую стенку и удаления теплоносителя из противоположной боковой стенки, создавая таким образом горизонтальное течение теплоносителя сквозь пучок труб между двумя противоположными боковыми стенками. Альтернативно можно использовать конструкцию пластинчатого теплообменника (не показано).

В показанном воплощении входной канал 628 и возвратный канал 630 теплоносителя для каждого ТПК расположены на противоположных сторонах каждого ТПК 610. Таким образом, холодный теплоноситель течет через входной канал 628 в камеру, которая содержит снабженную отверстиями боковую стенку 640 (лучше всего видно на Фиг. 6В) в кожухе ТПК 610. Теплоноситель течет через снабженную отверстиями боковую стенку 640 в ТПК 610 и горизонтально мимо труб в трубном пучке, охлаждая таким образом топливную соль, текущую вертикально через трубный пучок. Нагретый теплоноситель течет горизонтально на противоположную сторону ТПК 610, выходит из ТПК 610 через снабженную отверстиями боковую стенку 640 и входит из реактора 600 через возвратный канал 630.

В показанном воплощении каждый входной канал 628 расположен в направлении против часовой стрелки (как показано на Фиг. 6А) относительно соответствующего ТПК 610. В альтернативном воплощении (не показано) входные каналы 628 для соседних ТПК 610 могут быть совмещенными на одной стенке или могут быть одним каналом, который служит двум различным ТПК. Возвратные каналы 630 аналогично могут быть совмещенными для различных наборов соседних ТПК 610. В этой конфигурации стенки между совмещенными каналами не обязательно должны быть изолированными, так как они направляют теплоноситель одинаковой температуры в различные теплообменники. В альтернативном воплощении все стенки между совмещенными каналами можно устранить.

ТТР 622 СПВОР также может быть или может не быть предназначен для использования горизонтально текущего теплоносителя. В показанном воплощении теплоноситель СПВОР поставляют в верхнюю часть одного угла ТТР с помощью входного трубопровода 624 теплоносителя СПВОР и удаляют из верхней части

противоположного угла с помощью возвратного трубопровода 626 теплоносителя СПВОР. Для того, чтобы обеспечить горизонтальный поток через ТТР, теплоноситель СПВОР можно поставлять в противоположные камеры и удалять из противоположных камер внутри кожуха ТТР. Камеры можно снабдить боковыми стенками с отверстиями (не показаны), так что они действуют как распределительный трубопровод и поставляют и удаляют теплоноситель горизонтально из области кожуха, которая содержит пучок труб, аналогично тому, как теплоноситель поставляют в ТПК 610.

Одним аспектом воплощения Фиг. 6А и 6В является более равномерный температурный профиль топливной соли, выходящей из ТПК 610. Однако, в отличие от воплощения, показанного на Фиг. 5А и 5В, этого достигают без удвоения длины пути потока теплоносителя первого контура, но вместо этого разделяя поток теплоносителя первого контура пополам. Снова температура топливной соли, выпускаемой между верхней и нижней половинами ТПК 610, имеет неравномерное распределение, так как теплоноситель первого контура, поступающий в верхнюю половину справа является более холодным, чем теплоноситель, выходящий слева. Температура топливной соли в трубах слева поэтому является более высокой. Нижняя половина ТПК 610, однако, содержит более холодный теплоноситель первого контура, поступающий с левой стороны, который охлаждает более теплую топливную соль, поступающую через трубы с левой стороны. Эта конфигурация уменьшает или устраняет неравномерное распределение температуры топливной соли, выпускаемой из нижней половины ТПК 610, по сравнению с воплощением, показанным на Фиг. 3А и 3В.

Несмотря на приложенную формулу изобретения, изобретение также определено следующими пунктами.

1. Ядерный реактор с расплавленным топливом, содержащий:

по меньшей мере один отражатель, окружающий активную зону, предназначенную для вмещения ядерного топлива и имеющую верхнюю область и нижнюю область,

контур теплообменников, отделенный от активной зоны отражателем, причем контур теплообменников имеет первое соединение с верхней областью и второе соединение с нижней областью и содержит:

теплообменник СПВОР, предназначенный для отведения тепла из ядерного топлива и переноса тепла в теплоноситель СПВОР,

теплообменник первого контура, который является кожухотрубным теплообменником, в котором теплоноситель первого контура в межтрубном пространстве отводит тепло от вертикальных труб, содержащих ядерное топливо,

при этом теплообменник СПВОР расположен выше теплообменника первого контура и соединен по текучей среде с теплообменником первого контура и теплообменник СПВОР соединен по текучей среде с верхней областью активной зоны посредством первого соединения,

при этом вертикальные трубы теплообменника первого контура соединены по текучей среде с нижней областью активной зоны посредством второго соединения, и

импеллер, предназначенный для принудительной циркуляции ядерного топлива в направлении, противоположном направлению естественной циркуляции ядерного топлива.

2. Ядерный реактор с расплавленным топливом, дополнительно содержащий систему теплоносителя первого контура, которая направляет поток теплоносителя первого контура горизонтально мимо вертикальных труб, содержащих ядерное топливо.

3. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.1 или п.2, в котором теплоноситель СПВОР поставляет система теплоносителя СПВОР, которая независима от системы теплоносителя первого контура.

4. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.1 или любому пункту, который зависит от п. 1, в котором теплоноситель первого контура протекает через входной канал в камеру, которая содержит первую снабженную отверстиями боковую стенку в кожухе теплообменника первого контура.

5. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.1 или любому пункту, который зависит от п.1, в котором теплоноситель протекает через первую снабженную отверстиями боковую стенку в кожух, горизонтально мимо труб, охлаждая таким образом ядерное топливо, текущее вертикально через трубы.

6. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.1 или любому пункту, который зависит от п. 1, в котором нагретый теплоноситель выходит из теплообменника первого контура через вторую снабженную отверстиями боковую стенку, противоположную первой снабженной отверстиями боковой стенке, и выходит из реактора через возвратный канал.

7. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.1 или любому пункту, который зависит от п.1, в котором теплообменник СПВОР является кожухотрубным теплообменником, и трубы теплообменника СПВОР соединены по текучей среде с трубами теплообменника первого контура.

8. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.1 или любому пункту, который зависит от п.1, в котором в отсутствие потока, вызываемого импеллером, поток ядерного топлива через активную зону и по меньшей мере теплообменник СПВОР вызывает естественная циркуляция, при этом естественная циркуляция возникает в результате разницы температур между высокотемпературным топливом в активной зоне и топливом с более низкой температурой, выходящим из контура теплообменников.

9. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.1 или любому пункту, который зависит от п.1, в котором активная зона предназначена для использования ядерного топлива в форме хлористой, бромистой и/или фтористой соли.

10. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п. 9, в котором ядерное топливо содержит один или более элементов из урана, плутония или тория.

11. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.1 или любому пункту, который зависит от п.1, в котором теплообменник СПВОР и теплообменник первого контура находятся внутри одного кожуха.

12. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.1 или любому пункту, который зависит от п.1, в котором импеллер можно поднимать или опускать, изменяя таким образом уровень ядерного топлива в реакторе.

13. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.1 или любому пункту, который зависит от п.1, в котором ядерный реактор с расплавленным топливом дополнительно содержит устройство перемещения топлива, которое регулирует уровень ядерного топлива в реакторе.

14. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.1 или любому пункту, который зависит от п.1, в котором кожух теплообменника первого контура разделен на первую секцию и вторую секцию и поток теплоносителя первого контура через первую секцию проходит в горизонтальном направлении, противоположном потоку теплоносителя первого контура через вторую секцию.

15. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.14, в котором поток теплоносителя первого контура, выходящий из первой секции, направляют на протекание через вторую секцию.

16. Ядерный реактор с расплавленным топливом по п.14, в котором первая секция находится выше второй секции.

17. Способ отведения тепла из ядерного реактора с расплавленным топливом, содержащего активную зону с высокотемпературным ядерным топливом, включающий:

поставку низкотемпературного ядерного топлива в верхнюю область активной зоны, вытесняя таким образом высокотемпературное ядерное топливо из активной зоны вниз и из активной зоны в контур теплообменников,

направление высокотемпературного топлива вверх через контур теплообменников, перенося таким образом тепло от высокотемпературного ядерного топлива в теплоноситель и превращая вытесненное высокотемпературное ядерное топливо в низкотемпературное ядерное топливо.

18. Способ по п.17, в котором поставка низкотемпературного ядерного топлива в активную зону включает пропускание низкотемпературного ядерного топлива из теплообменника СПВОР в верхнюю область активной зоны.

19. Способ по п.17 или п.18, в котором поставка низкотемпературного ядерного топлива в активную зону включает эксплуатацию по меньшей мере одного импеллера для создания потока ядерного топлива через контур теплообменников в направлении, противоположном направлению естественной циркуляции топлива, создаваемой разницей температур между высокотемпературным топливом в активной зоне и топливом с более низкой температурой, выходящим из контура теплообменников, в отсутствие эксплуатации импеллера.

20. Способ по п.17 или любому пункту, который зависит от п.17, в котором контур теплообменников, включая теплообменник первого контура и теплообменник СПВОР экранируют от нейтронов, образующихся в активной зоне.

21. Способ по п.17 или любому пункту, который зависит от п.17, в котором теплоноситель протекает горизонтально мимо труб в теплообменнике первого контура от первой стороны теплообменника первого контура ко второй стороне, противоположной первой стороне.

22. Устройство для поставки охлажденной топливной соли в активную зону, содержащее:

стенку, окружающую активную зону и отделяющую активную зону от камеры, при этом стенка снабжена множеством отверстий, проходящих через стенку и обеспечивающих поток соли ядерного топлива между активной зоной и камерой, и

вход в камеру для приема охлажденной соли ядерного топлива в камере.

23. Устройство по п.22, в котором отверстия расположены по меньшей мере в двух горизонтальных рядах отверстий.

24. Устройство по п.22 или п.23, в котором по меньшей мере одно отверстие из множества отверстий представляет собой сквозное цилиндрическое отверстие в стенке, имеющее центральную ось, которая не параллельна горизонтальной плоскости.

25. Устройство по п.22 или любому пункту, который зависит от п. 22, в котором по меньшей мере одно отверстие из множества отверстий представляет собой сквозное отверстие в стенке в виде усеченного конуса.

26. Устройство по п. 23 или любому пункту, который зависит от п. 22, в котором по меньшей мере одно отверстие из множества отверстий представляет собой сквозное отверстие в стенке в виде усеченного конуса, имеющее центральную ось, которая не параллельна горизонтальной плоскости.

Несмотря на то, что численные интервалы и параметры, описывающие широкий объем защиты технологии, являются приближенными, численные значения, приведенные в конкретных примерах приведены настолько точно, насколько это возможно. Любые численные значения, однако, по своей природе содержат некоторые ошибки, неизбежно получаемые из стандартного отклонения, обнаруживаемого в соответствующих опытных измерениях.

Ясно, что описанные в данном документе системы и способы хорошо приспособлены для достижения упомянутых конечных целей и преимуществ, а также таких преимуществ, которые им внутренне присущи. Специалистам понятно, что способы и системы в техническом описании можно реализовать на практике различным образом и как таковые они не ограничены приведенными выше в качестве примера воплощениями и примерами. В связи с этим, любое количество признаков различных воплощений, описанных в данном документе, можно объединить в одно воплощение и возможны альтернативные воплощения, имеющее не все признаки, описанные в данном документе, или имеющее больше признаков, чем описано в данном документе.

Хотя для этого изобретения были описаны различные воплощения, можно выполнить различные изменения и модификации, которые находятся в области защиты настоящего изобретения. Например, вместо снабженных отверстиями боковых стенок или камер можно использовать распределительные трубопроводы для более точного регулирования потока теплоносителя в кожухи и из кожухов теплообменников. Можно выполнить множество других изменений, которые легко могут прийти в голову специалистам и которые охватываются сущностью изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство для поставки охлажденной топливной соли в активную зону, содержащее:

стенку, окружающую активную зону и отделяющую активную зону от камеры, при этом стенка снабжена множеством отверстий, проходящих сквозь стенку и обеспечивающих поток соли ядерного топлива между активной зоной и камерой, и

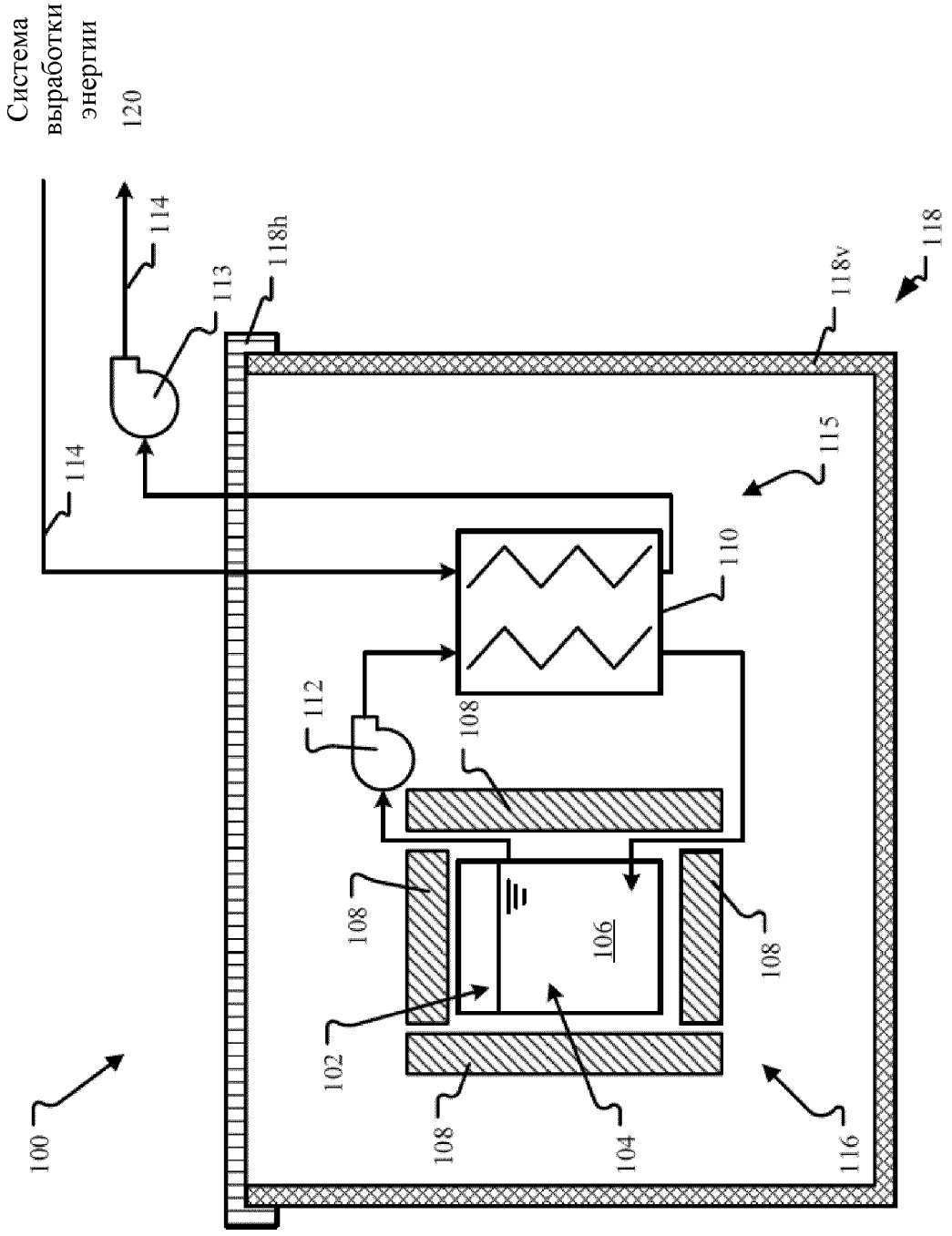
вход в камеру для приема охлажденной соли ядерного топлива в камере.

2. Устройство по п.1, в котором отверстия расположены по меньшей мере в двух горизонтальных рядах отверстий.

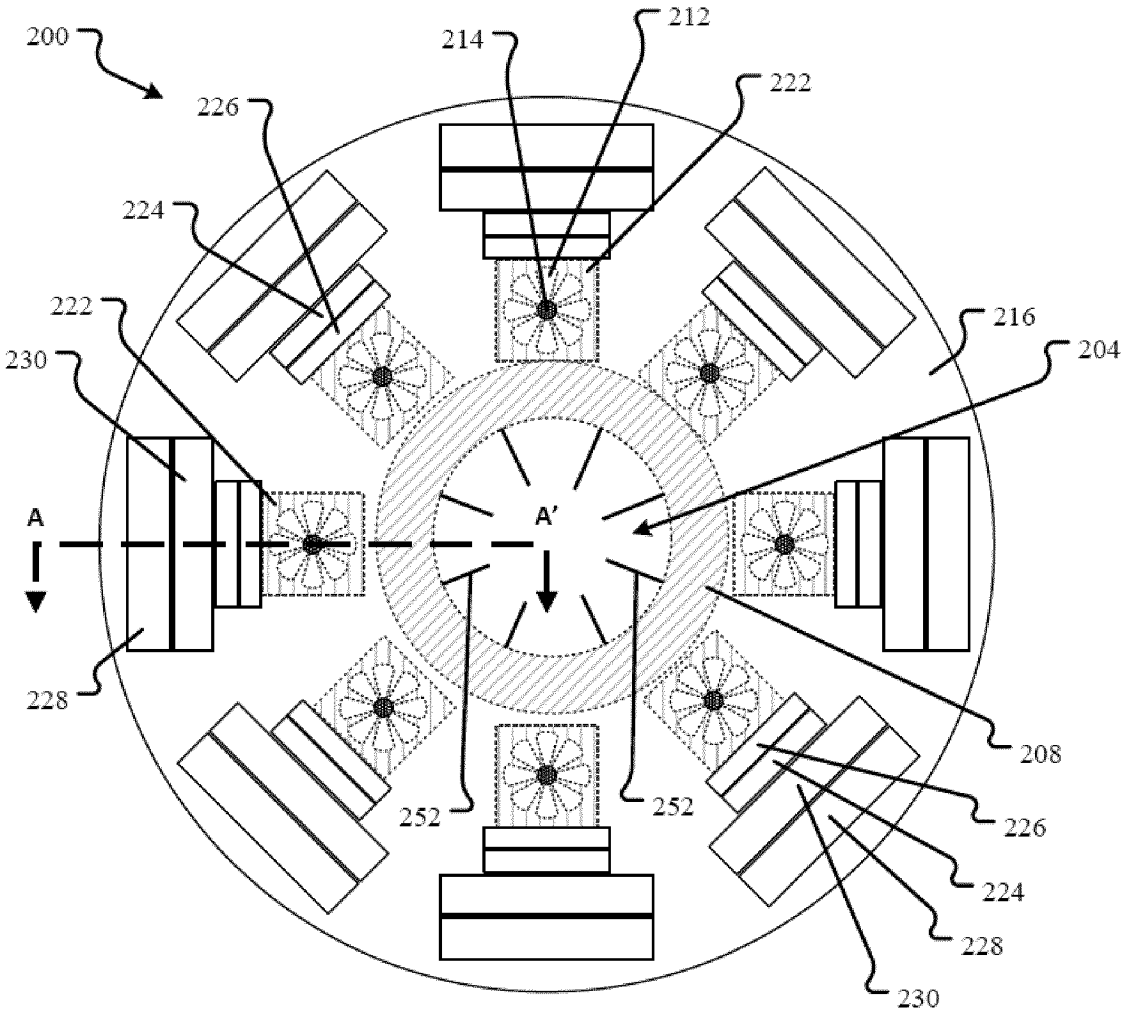
3. Устройство по п.1, в котором по меньшей мере одно отверстие из множества отверстий представляет собой сквозное цилиндрическое отверстие в стенке, имеющее центральную ось, которая не параллельна горизонтальной плоскости.

4. Устройство по п.1, в котором по меньшей мере одно отверстие из множества отверстий представляет собой сквозное отверстие в стенке в виде усеченного конуса.

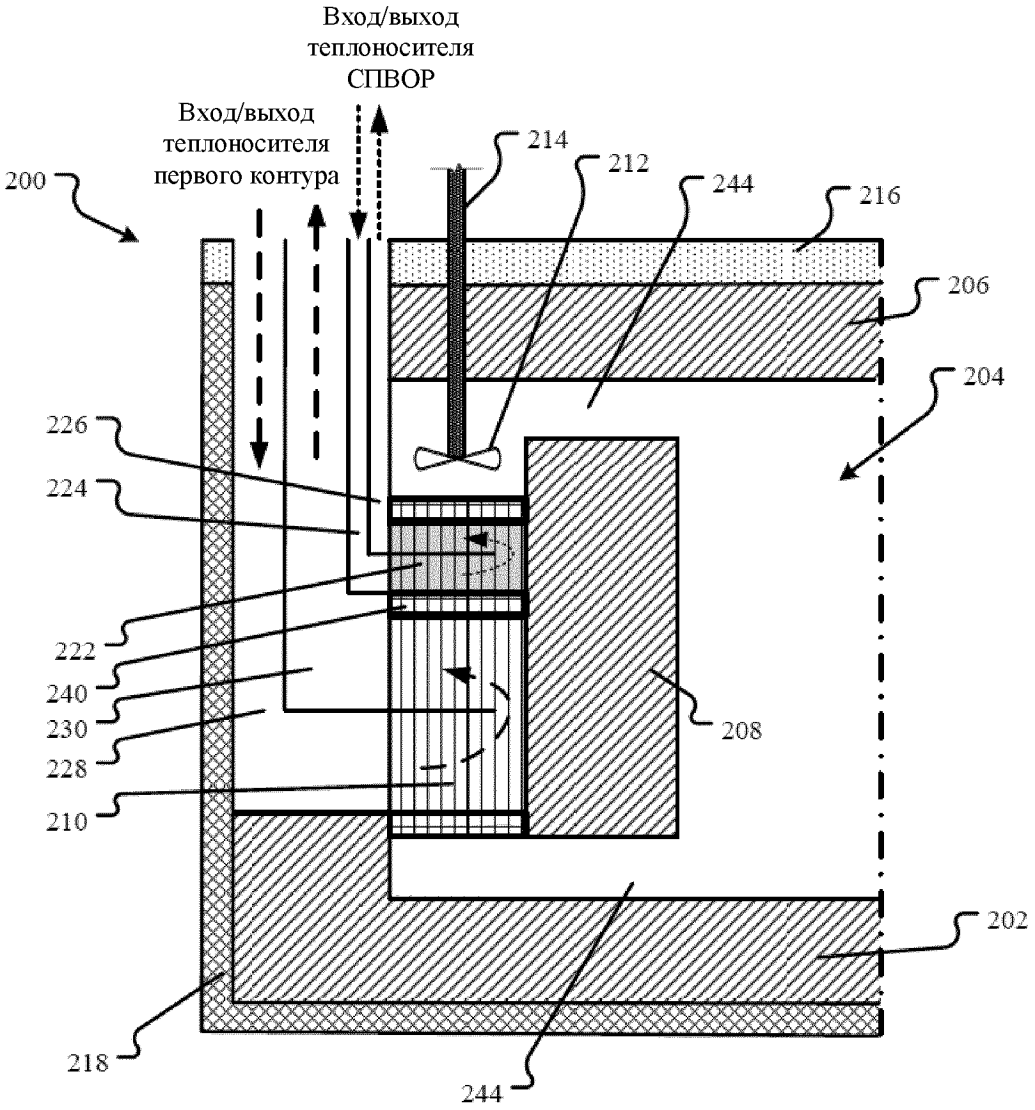
5. Устройство по п. 1, в котором по меньшей мере одно отверстие из множества отверстий представляет собой сквозное отверстие в стенке в виде усеченного конуса, имеющее центральную ось, которая не параллельна горизонтальной плоскости.


Система
выработки
энергии
120
114
113
118h
118v
118
114
115
110
112
108
108
106
108
102
108
104
116
100

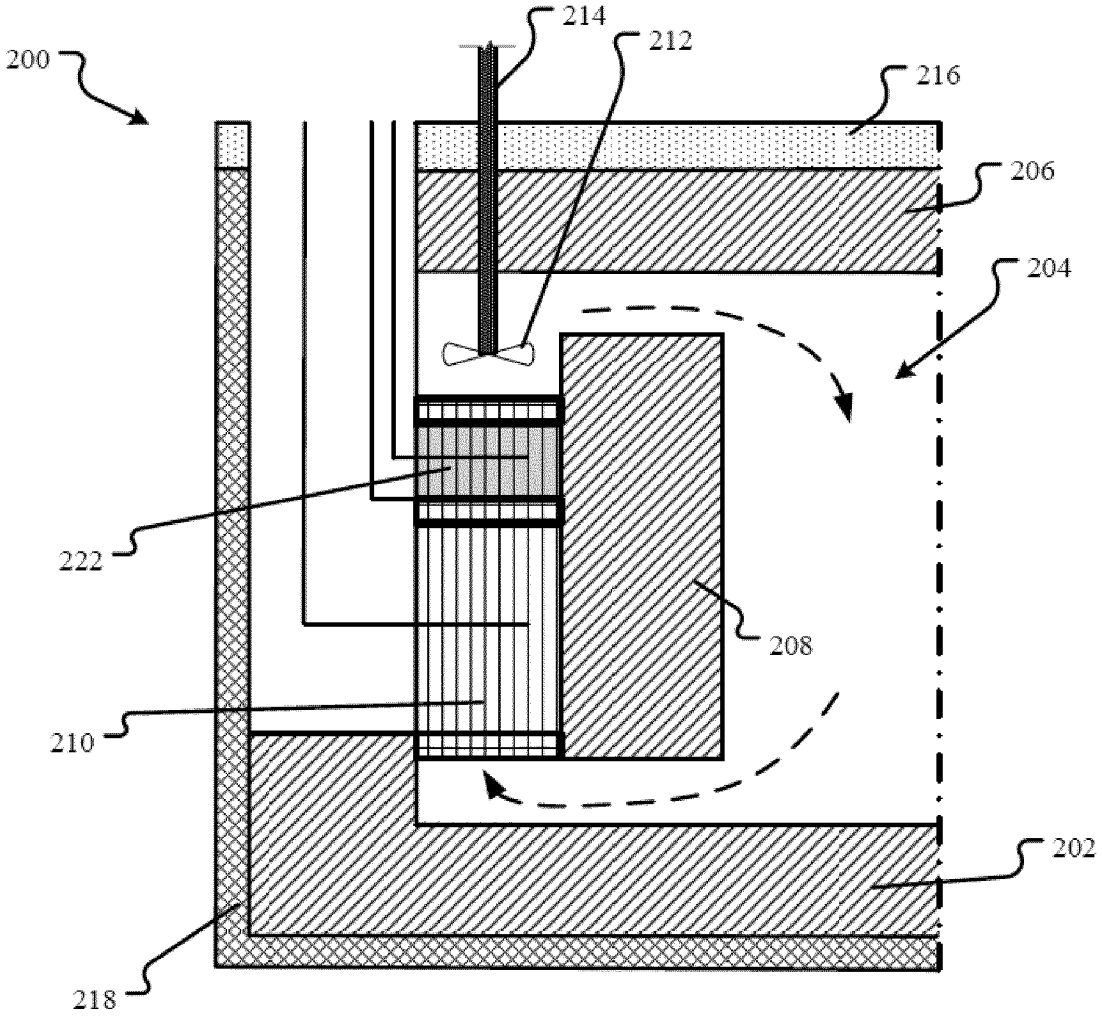
Фиг. 1


200
214
212
222
226
224
222
216
204
230
A
A'
228
208
252
252
226
224
228
230

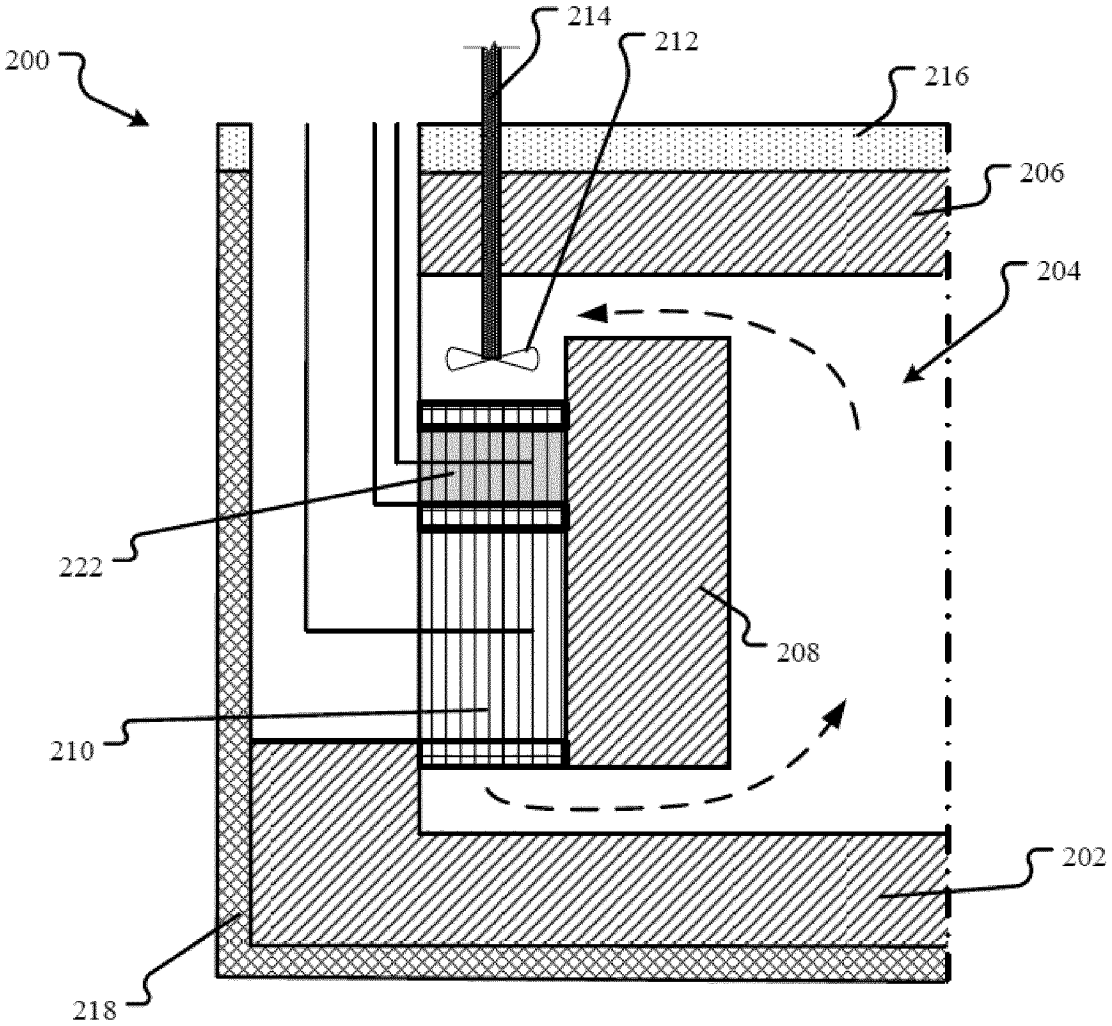
Фиг. 2A


Вход/выход
теплоносителя
СПВОР
Вход/выход
теплоносителя
первого контура
200
214
212
244
216
206
204
226
224
222
240
230
228
210
208
202
218
244

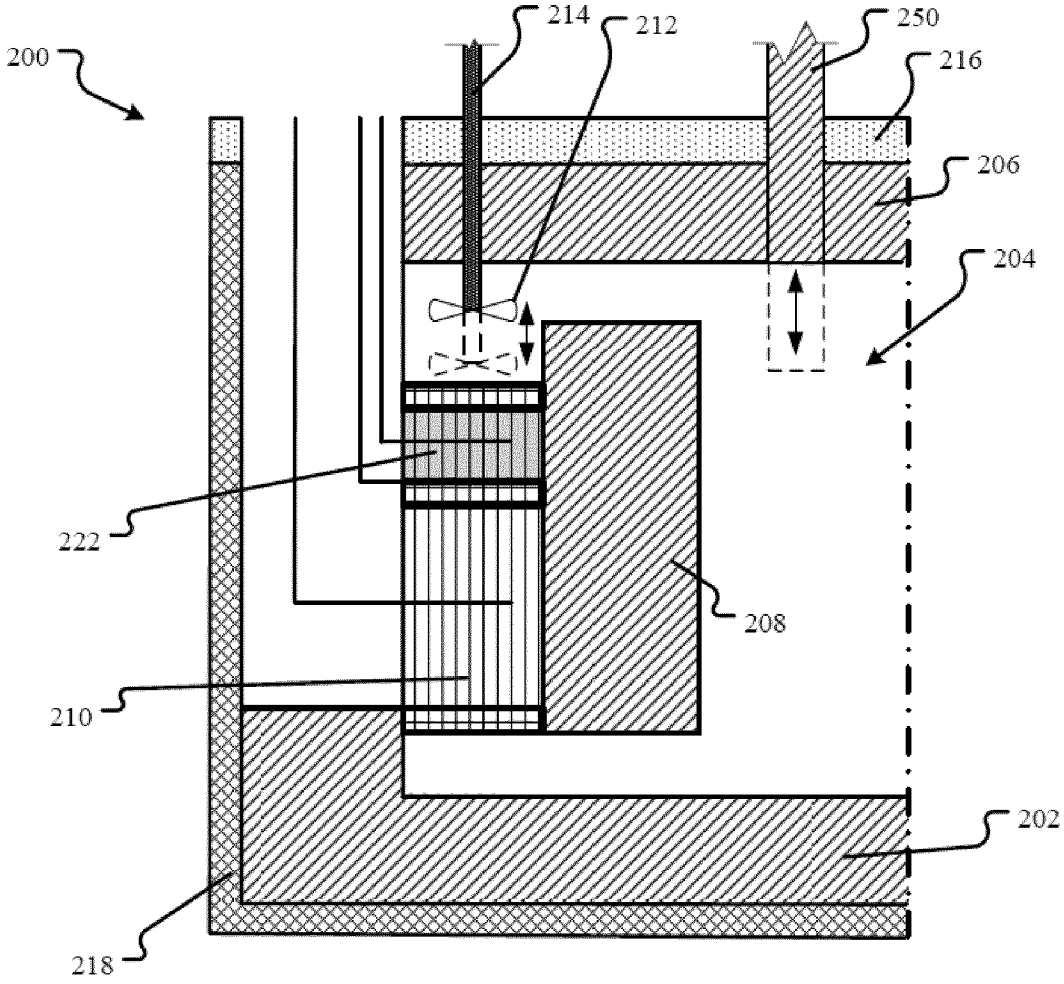
Фиг. 2B



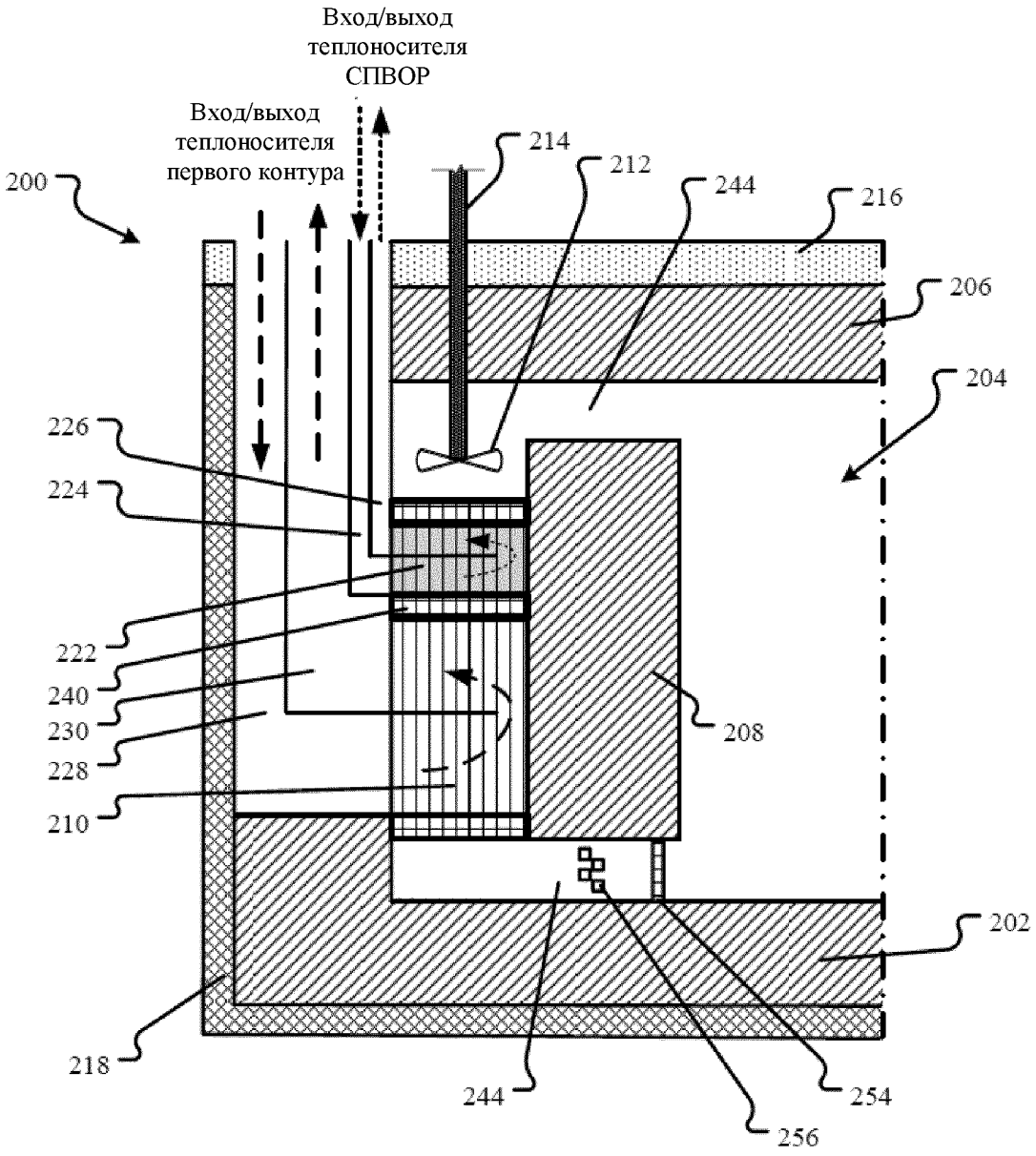
Фиг. 2C



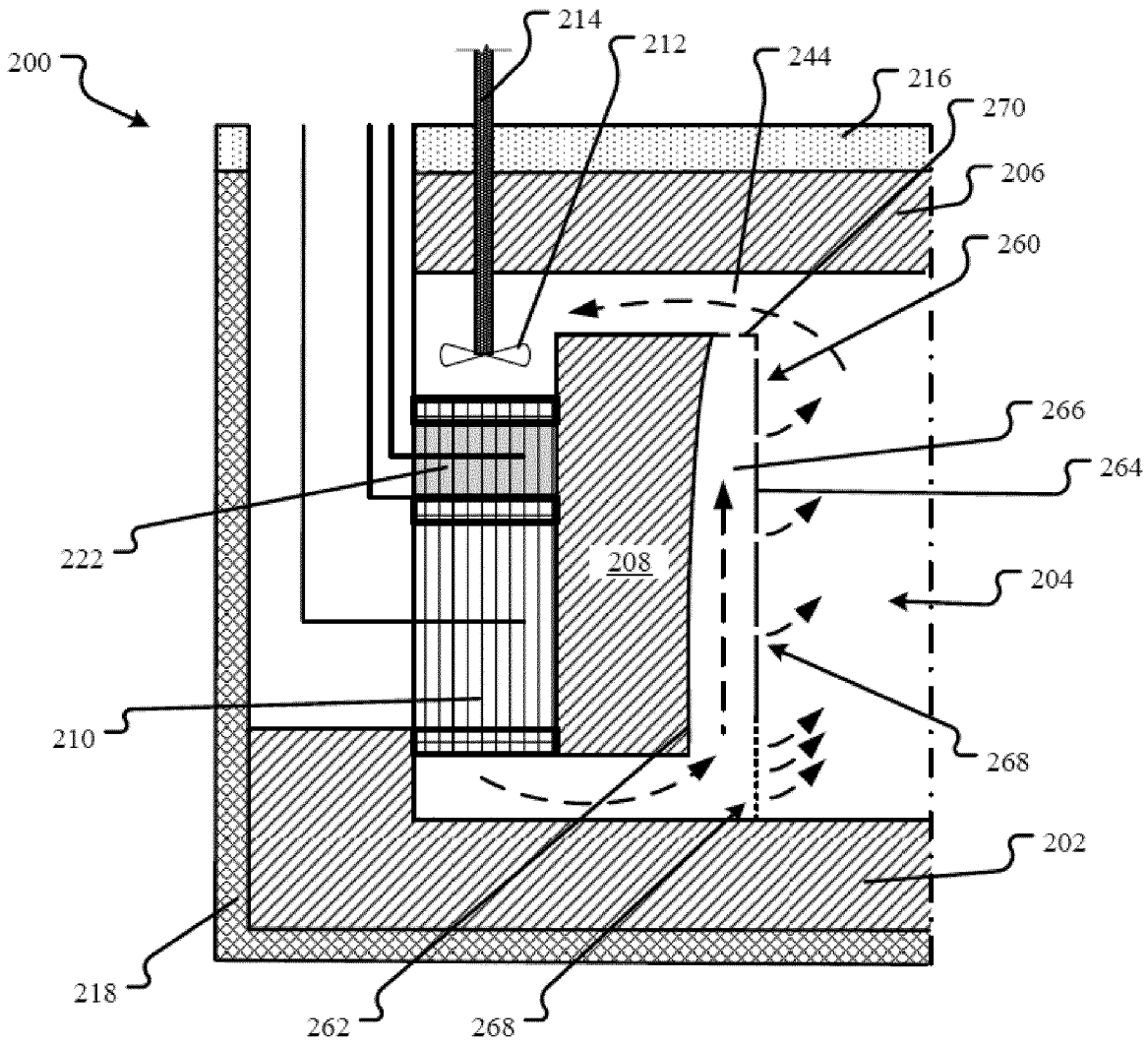
Фиг. 2D



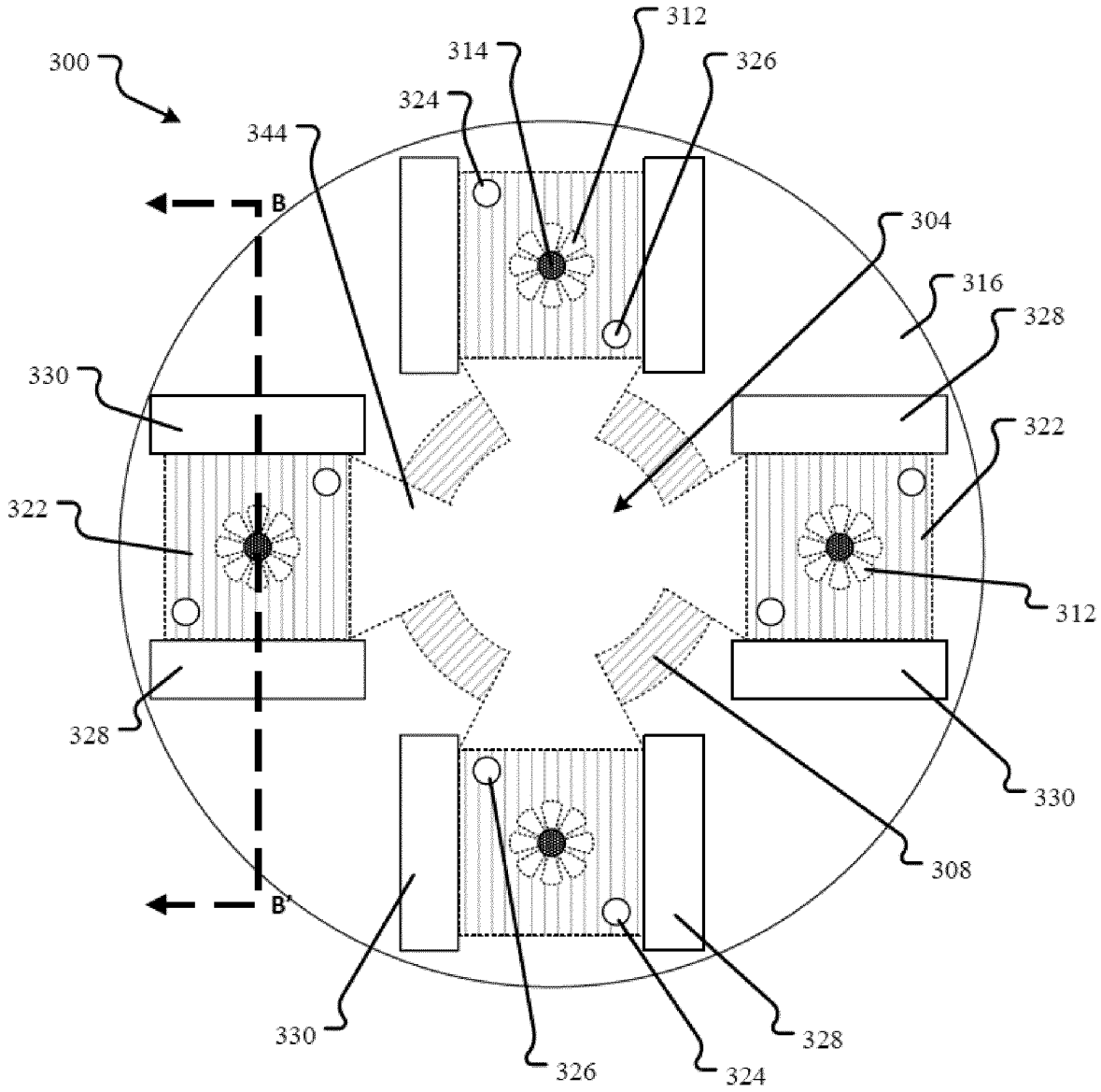
Фиг. 2E


Вход/выход
теплоносителя
СПВОР
Вход/выход
теплоносителя
первого контура
200
214
212
244
216
206
204
226
224
222
240
230
228
210
208
202
218
244
254
256

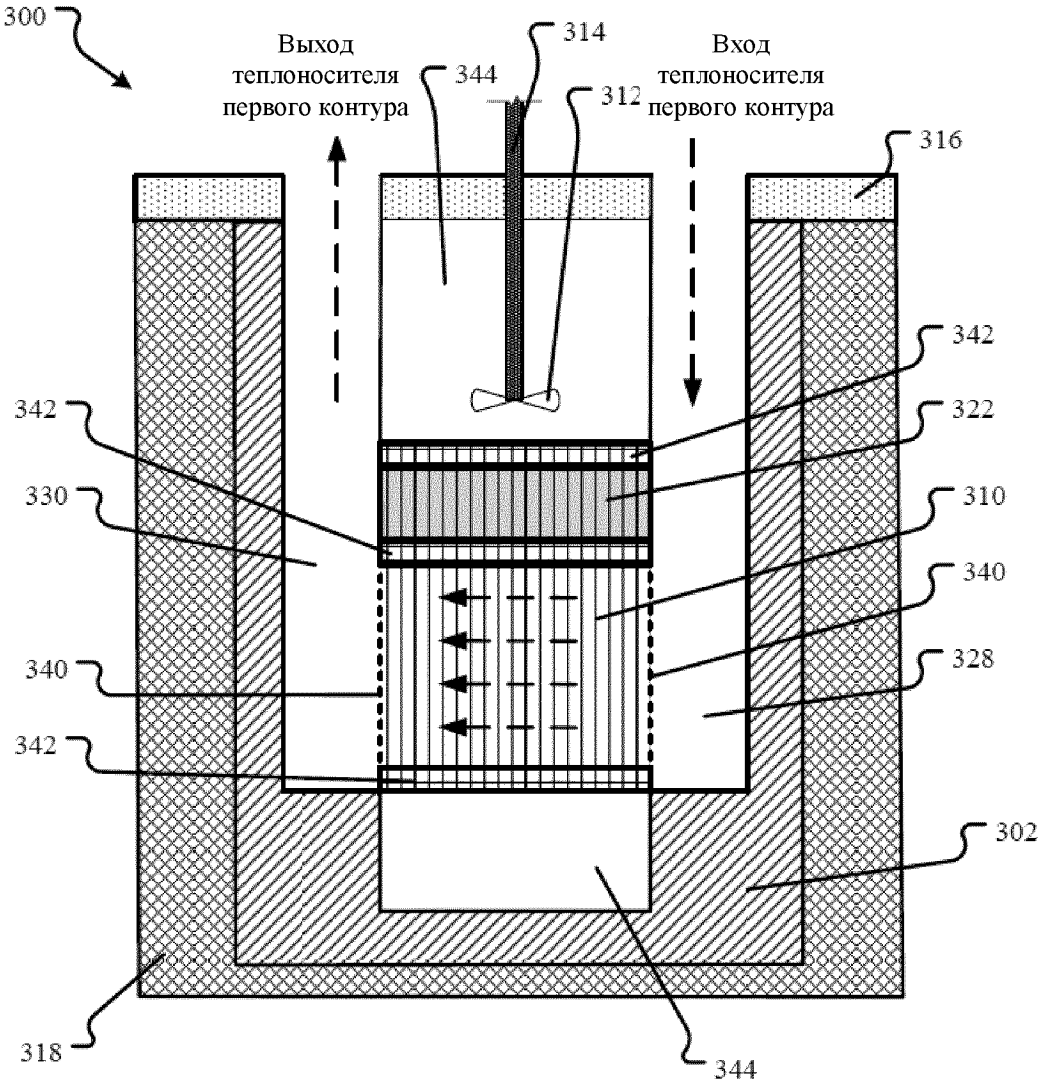
Фиг. 2F


200
214
212
244
216
270
206
260
266
264
222
208
204
210
268
202
218
262
268

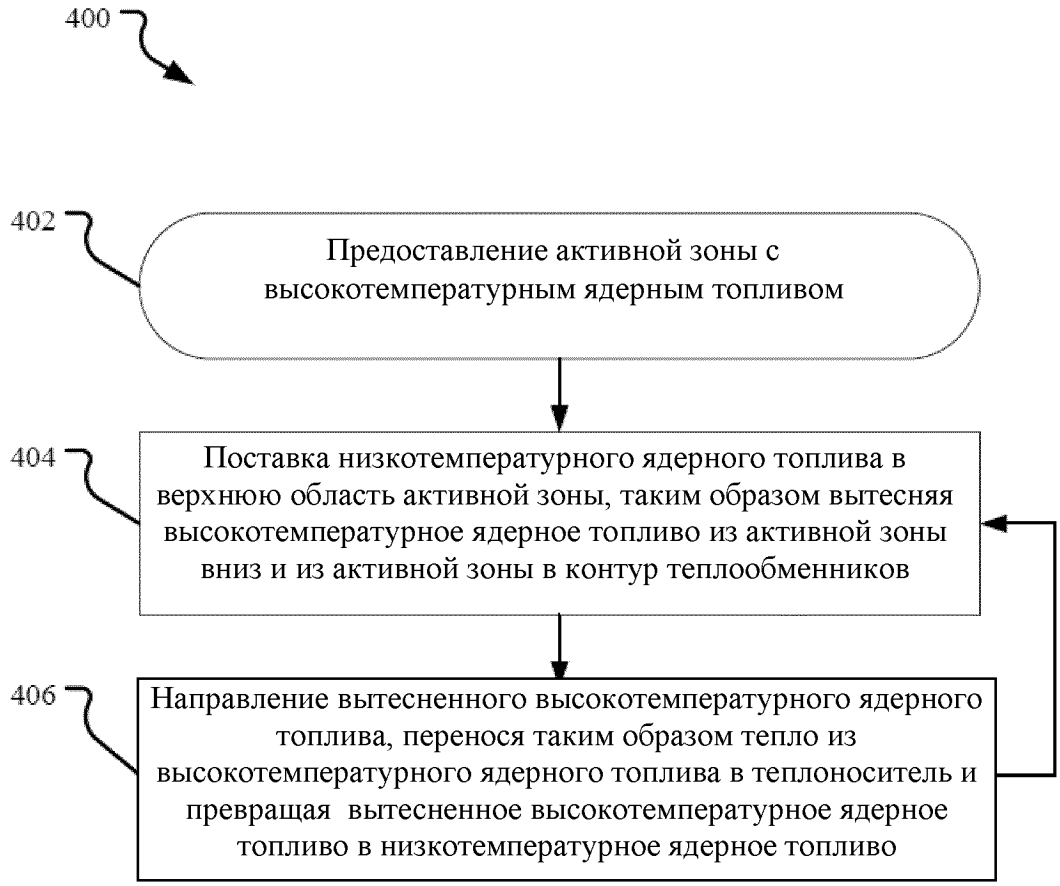
Фиг. 2G


300
312
314
326
324
344
B
304
316
328
330
322
322
312
328
330
308
B'
330
326
324
328

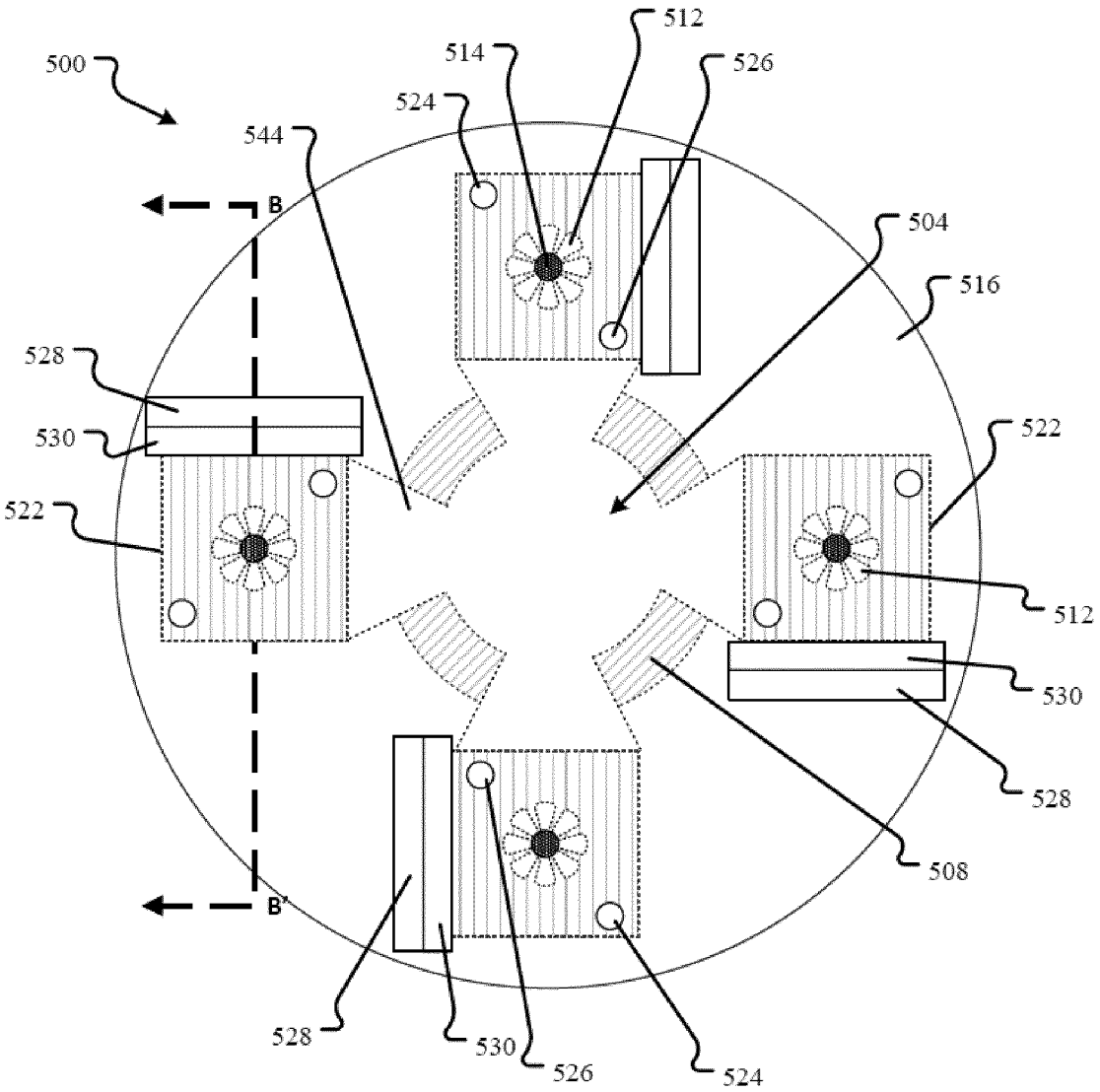
Фиг. 3A


300
Выход
теплоносителя
первого контура
344
314
312
Вход
теплоносителя
первого контура
316
342
322
310
340
328
302
342
330
340
342
318
344

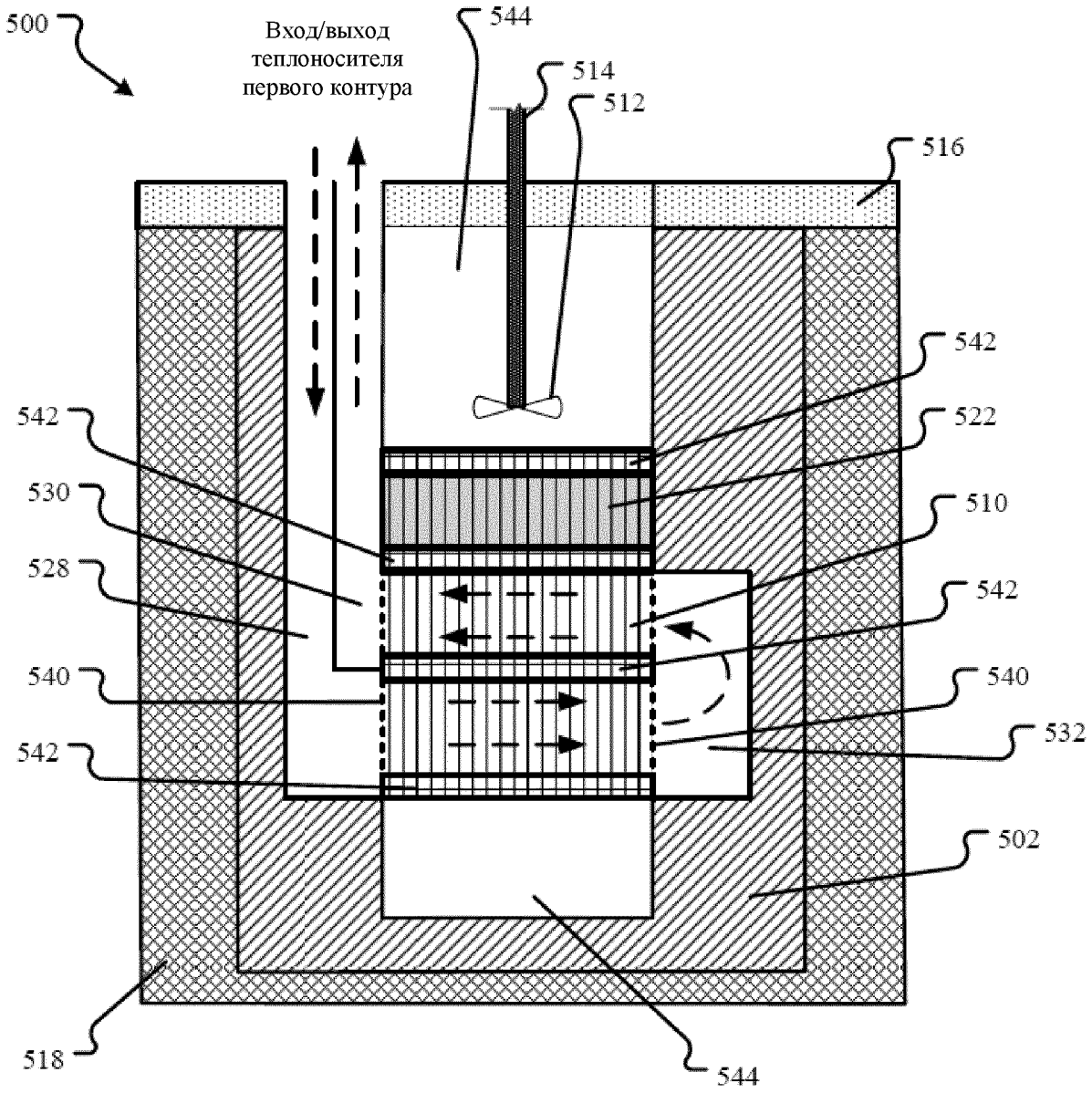
Фиг. 3B


400
402
Предоставление активной зоны с высокотемпературным ядерным топливом
404
Поставка низкотемпературного ядерного топлива в верхнюю область активной зоны, таким образом вытесняя высокотемпературное ядерное топливо из активной зоны вниз и из активной зоны в контур теплообменников
406
Направление вытесненного высокотемпературного ядерного топлива, перенося таким образом тепло из высокотемпературного ядерного топлива в теплоноситель и превращая вытесненное высокотемпературное ядерное топливо в низкотемпературное ядерное топливо

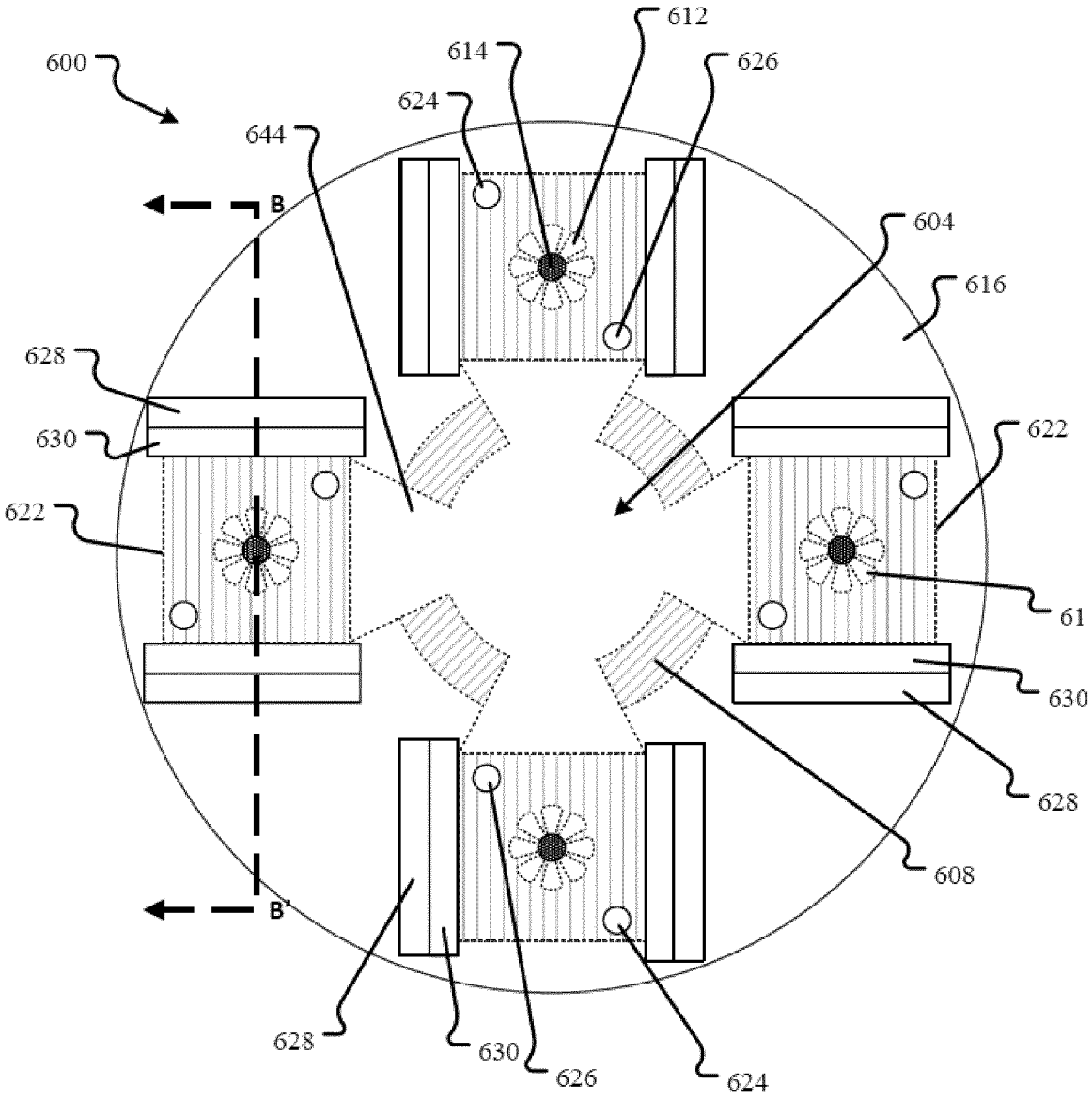
Фиг. 4


500
512
514
526
524
544
B
504
516
528
530
522
522
512
530
528
508
B'
528
530
526
524

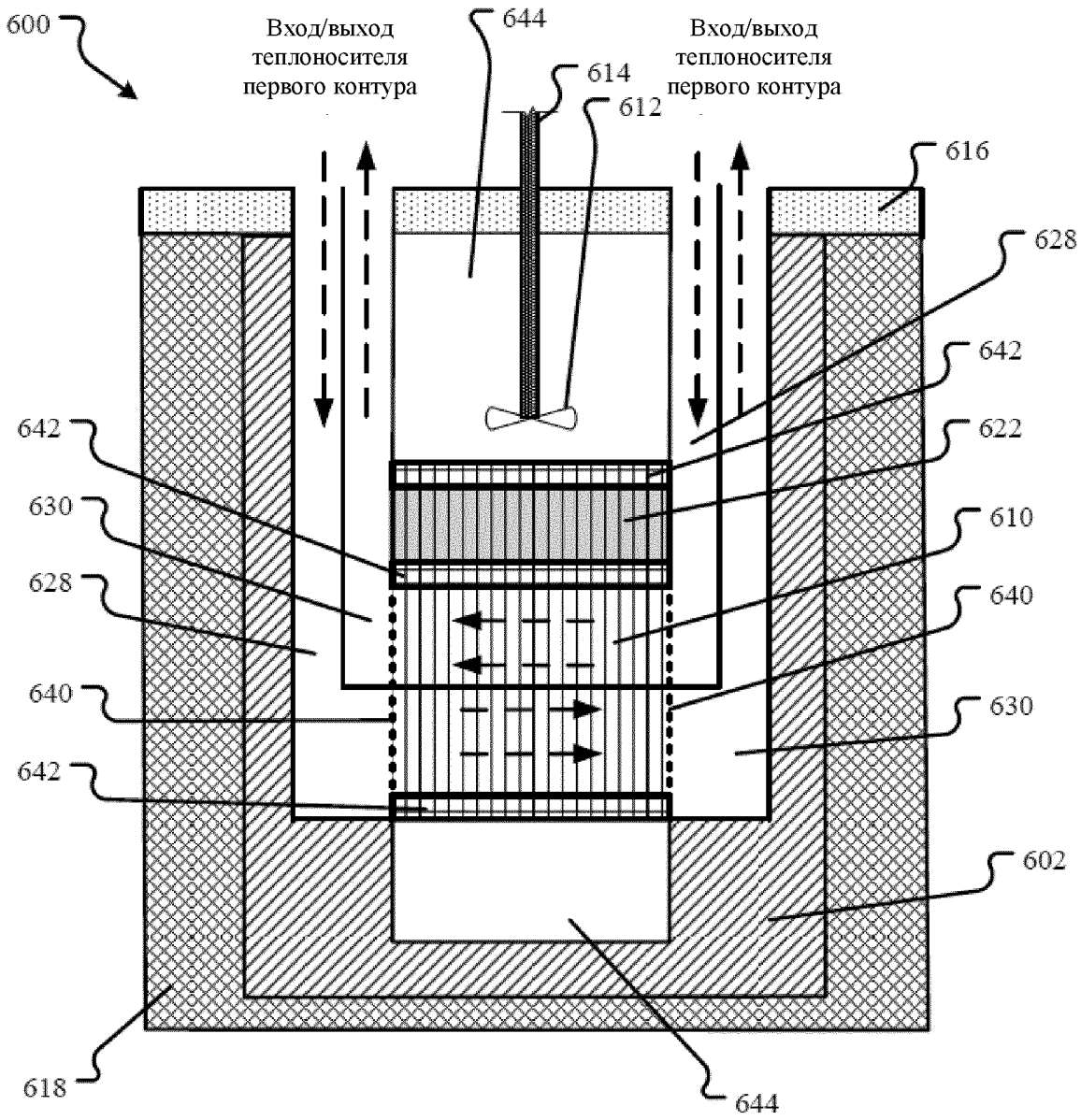
Фиг. 5A


500
Вход/выход
теплоносителя
первого контура
544
514
512
516
542
522
542
530
510
528
542
540
540
542
532
502
518
544

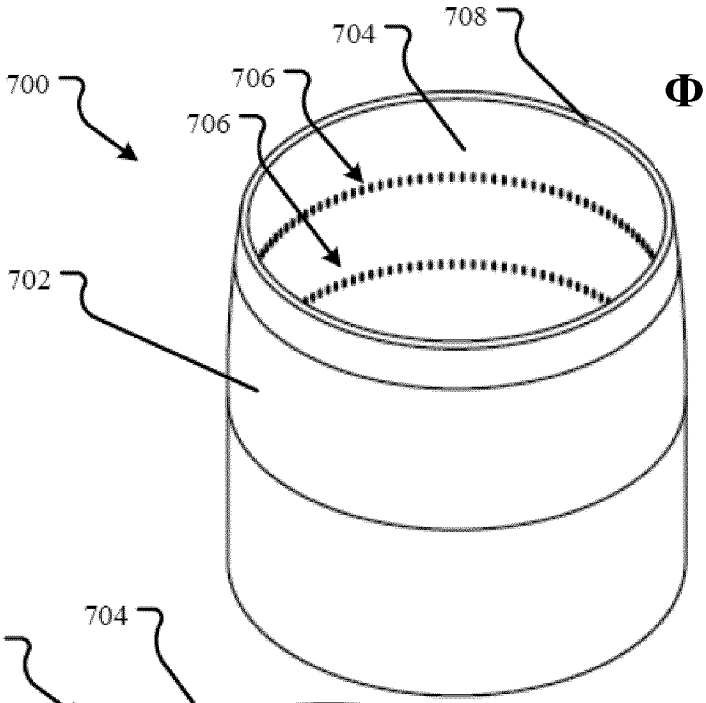
Фиг. 5B


600
612
614
626
624
644
B
604
616
628
630
622
622
61
630
628
608
B'
628
630
626
624

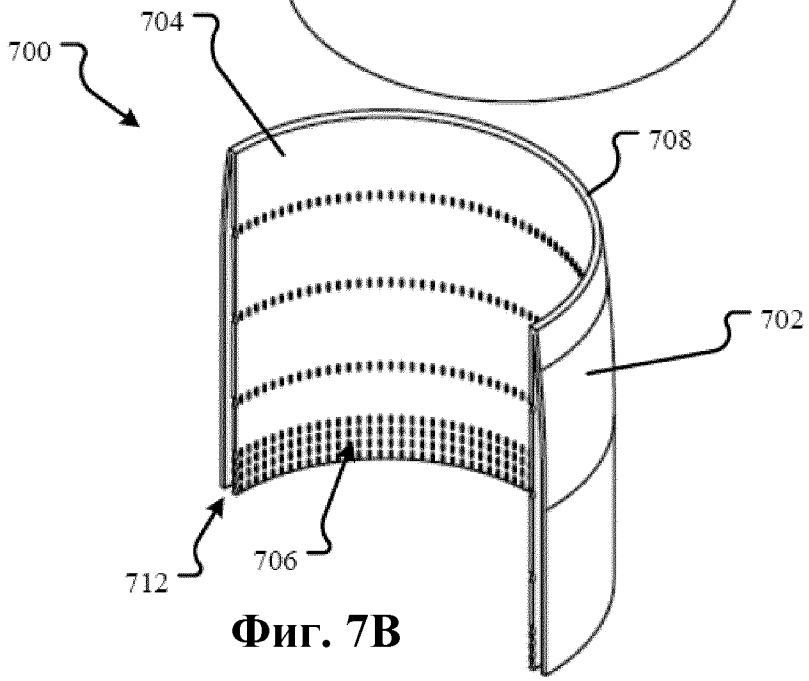
Фиг. 6A


600
Вход/выход
теплоносителя
первого контура
644
614
612
Вход/выход
теплоносителя
первого контура
616
628
642
622
610
640
630
602
642
630
628
640
642
618
644

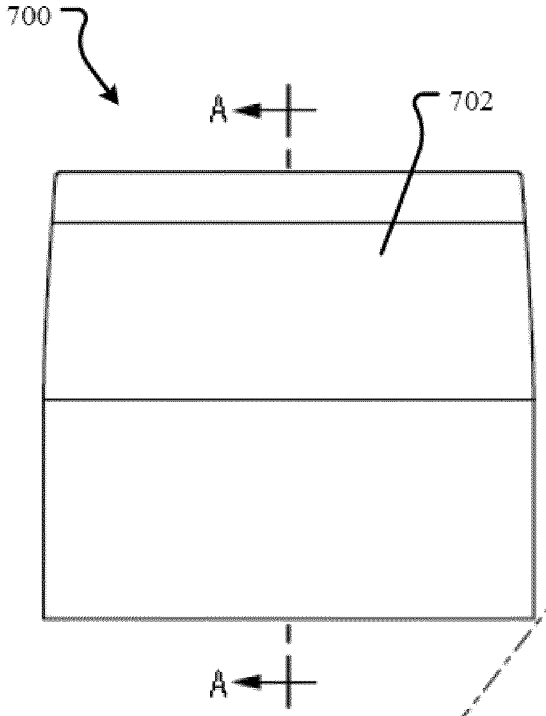
Фиг. 6B



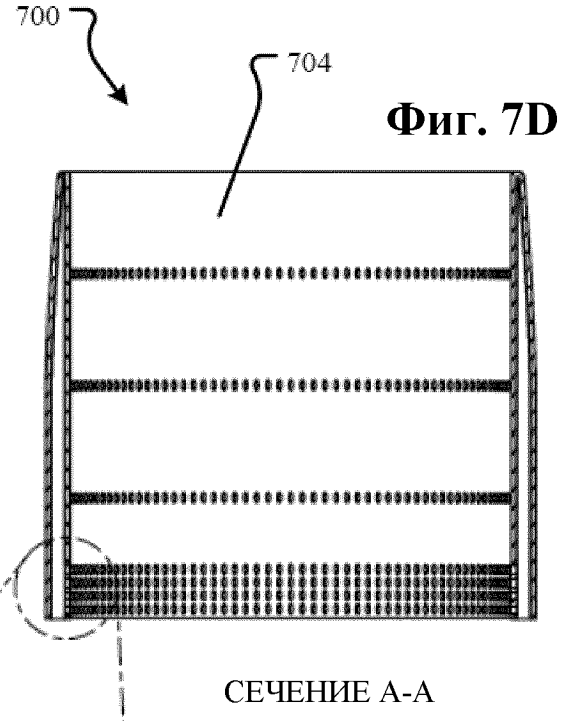
Фиг. 7A



Фиг. 7B

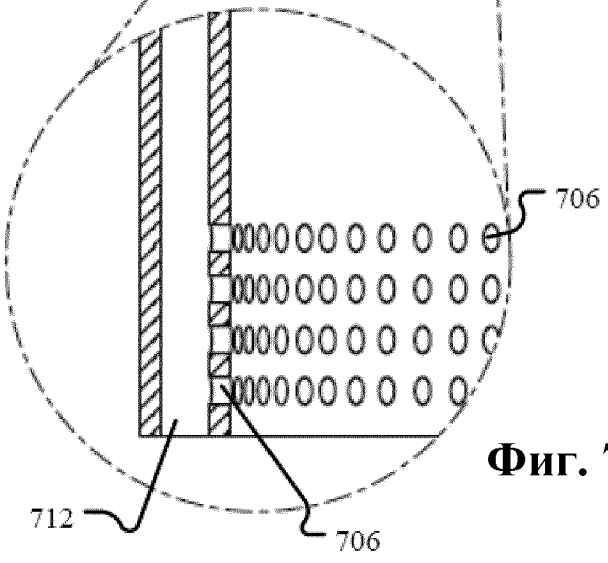


Фиг. 7C



Фиг. 7D

СЕЧЕНИЕ A-A



Фиг. 7E