

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(21) 201892166 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2019.05.31(22) Дата подачи заявки
2017.05.01

(51) Int. Cl. *G21C 1/22* (2006.01)
G21C 3/24 (2006.01)
G21C 3/54 (2006.01)
G21C 5/14 (2006.01)
G21C 11/06 (2006.01)
G21C 15/243 (2006.01)
G21C 15/26 (2006.01)
G21C 15/12 (2006.01)
G21C 1/32 (2006.01)
G21C 15/02 (2006.01)
G21C 15/25 (2006.01)
G21C 15/28 (2006.01)
G21C 1/14 (2006.01)

(54) УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА РАСПЛАВЛЕННОМ ТОПЛИВЕ

(31) 62/330,726

(32) 2016.05.02

(33) US

(86) PCT/US2017/030455

(87) WO 2017/192463 2017.11.09

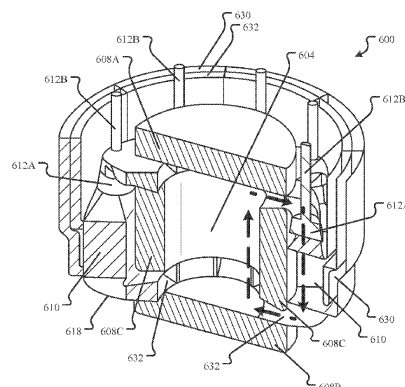
(88) 2018.03.01

(71) Заявитель:
ТЕРРАПАУЭР, ЭлЭлСи (US)

(72) Изобретатель:
Эбботт Райан, Сиснерос Ансельмо Т.,
мл., Флауэрс Дэниель, Фриман Чарльз
Грегори, Хэвстэд Марк А., Джонс
Кристофер Дж., Келлехер Брайан К.,
Крамер Кевин, Латковски Джеффри
Ф., Маквертер Джон Д. (US)

(74) Представитель:
Поликарпов А.В., Соколова М.В.,
Путинцев А.И., Черкас Д.А., Игнатьев
А.В. (RU)

(57) Описаны конфигурации реакторов на расплавленной топливной соли, которые позволяют активно охлаждать защитный корпус реактора с помощью первичного теплоносителя. Кроме того, описаны конфигурации естественной циркуляции реактора, в которых активные зоны реактора имеют, по существу, усеченную форму, так что тепловой центр активной зоны реактора находится ниже выпускного отверстия первичных теплообменников. Описаны конфигурации теплообменников, в которых сварные компоненты удалены от активной зоны реактора, чтобы уменьшить повреждение, вызываемое потоком нейтронов из реактора. Также описываются конфигурации реактора радиального петлевого типа.



A1

201892166

201892166

A1

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ТЕПЛОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА РАСПЛАВЛЕННОМ ТОПЛИВЕ

РОДСТВЕННЫЕ ЗАЯВКИ

[0001] Настоящая заявка подана 1 мая 2017 года в качестве международной патентной заявки (РСТ), приоритет которой испрашивается по дате подачи предварительной заявки на патент США № 62/330726, поданной 2 мая 2016 года, которая включена в настоящее описание посредством ссылки.

ВВЕДЕНИЕ

[0002] Использование расплавленного топлива в ядерном реакторе для производства электроэнергии дает значительные преимущества по сравнению с твердым топливом. Например, реакторы на расплавленном топливе обычно обеспечивают более высокую плотность мощности по сравнению с реакторами на твердом топливе, при этом одновременно снижаются затраты на топливо из-за относительно высокой стоимости производства твердого топлива.

[0003] Соли расплавленного фторида, пригодные для использования в ядерных реакторах, разработаны с использованием тетрафторида урана (UF_4), смешанного с другими фтористыми солями, такими как UF_6 и UF_3 . Реакторы на расплавленной фторидсодержащей соли имеют рабочую температуру между 600 и 860 °C. Двойные, тройные и четверные хлоридные соли урана, а также другие расщепляющиеся элементы описаны в поданной тем же заявителем заявке на патент США № 14/981,512 под названием «ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО НА РАСПЛАВЛЕННЫХ СОЛЯХ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ СИСТЕМЫ И СПОСОБЫ», которая включена в настоящее описание посредством ссылки. В дополнение к хлоридным топливным солям, содержащим одно или несколько из $PuCl_3$, UCl_4 , UCl_3F , UCl_3 , UCl_2F_2 и $UClF_3$, в заявке далее описаны топливные соли с модифицированным количеством ^{37}Cl , бромидсодержащие соли, таких как UBr_3 или UBr_4 , хлорид тория (например, $ThCl_4$), а также способы и системы для использования топливных солей в реакторе на расплавленном топливе. Ожидается, что средние рабочие

температуры реакторов с хлоридной солью составляют от 300 до 600 °С, но могут быть еще выше, например, больше 1000 °С.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

[0004] Следующие чертежи, которые составляют часть этой заявки, являются иллюстрацией описанной технологии и не предназначены для ограничения каким-либо образом объема заявленного изобретения, объем которого должен основываться на формуле изобретения, прилагаемой к настоящему документу.

[0005] Фиг.1 иллюстрирует в виде блок-схемы некоторые из основных компонентов реактора на расплавленном топливе.

[0006] Фиг.2А-2С изображают различные виды варианта выполнения реактора, который использует только естественную циркуляцию для циркуляции топливной соли по топливному контуру.

[0007] Фиг.3 изображает вариант выполнения усовершенствованной конфигурации для активной зоны реактора ядерного деления с естественной циркуляцией, причем активная зона реактора больше в нижней части, чем в верхней части.

[0008] Фиг.4 изображает другой вариант выполнения конструкции реактора с активной зоной в форме усеченного конуса.

[0009] Фиг.5 изображает усеченную часть активной зоны реактора, имеющей форму декагональной пирамиды (10-сторонней пирамиды), пригодной для активной зоны реактора с естественной циркуляцией.

[0010] Фиг.6А-6С изображают вариант выполнения конструкции реактора, который объединяет активное охлаждение защитного корпуса реактора с первичным охлаждающим контуром.

[0011] Фиг.7 иллюстрирует блок-схему варианта выполнения способа активного охлаждения защитного корпуса.

[0012] Фиг.8 изображает вариант выполнения реактора с межтрубной конфигурацией топливного теплообменника.

[0013] Фиг.9 изображает альтернативный вариант выполнения реактора, изображенного на Фиг.8.

[0014] Фиг.10 изображает вариант выполнения реактора с межтрубной U-образной конфигурацией трубчатого топливного теплообменника, в

которой единственная трубная решетка расположена над активной зоной реактора.

[0015] Фиг.11 изображает вариант выполнения реактора с межтрубной U-образной конфигурацией трубчатого топливного теплообменника, в которой единственная трубная решетка находится внутри реактора, но установлена сбоку в месте, удаленном от активной зоны реактора.

[0016] Фиг.12А и 12В изображают альтернативную конструкцию реактора, называемую реактором радиального петлевого типа.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

[0017] Настоящее описание раскрывает различные конфигурации и компоненты ядерного реактора на расплавленном топливе. Для целей настоящей заявки описаны варианты выполнения реактора на расплавленном топливе, в которых используется хлоридное топливо, например, смесь одной или нескольких топливных солей, таких как PuCl_3 , UCl_3 и/или UCl_4 , и одна или несколько не расщепляющихся солей, таких как NaCl и/или MgCl_2 . Однако следует понимать, что может использоваться любой тип топливной соли, который известен теперь или который будет разработан позже, и что описанные здесь технологии могут быть одинаково применимы независимо от типа используемого топлива. Например, топливная соль может содержать одну или несколько не расщепляющихся солей, таких как, но не ограничиваясь ими, NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , BaCl_2 , KCl , SrCl_2 , VCl_3 , CrCl_3 , TiCl_4 , ZrCl_4 , ThCl_4 , AcCl_3 , NpCl_4 , AmCl_3 , LaCl_3 , CeCl_3 , PrCl_3 и/или NdCl_3 . Следует отметить, что минимальная и максимальная рабочие температуры топлива в реакторе могут варьироваться в зависимости от топливной соли, используемой для поддержания соли в жидкой фазе во всем реакторе. Минимальные температуры могут составлять 300-350 °C, а максимальные температуры могут достигать 1400 °C или выше. Аналогичным образом, за исключением случаев, о которых сказано прямо, теплообменники будут в целом представлены в настоящем описании в терминах простых однопроходных кожухотрубных теплообменников, имеющих трубные пучки и с трубными решетками с обоих концов. Однако следует понимать, что в общем случае может использоваться любая конструкция теплообменника, Несмотря на то, что некоторые конструкции могут быть более подходящими,

чем другие. Например, в дополнение к кожухотрубным теплообменникам могут использоваться пластинчатые, кожухо-пластинчатые теплообменники, теплообменники с вытравленными каналами и пластинчато-ребристые теплообменники.

[0018] На Фиг.1 проиллюстрированы, в виде блок-схемы, некоторые из основных компонентов реактора на расплавленном топливе. В целом, реактор 100 на расплавленном топливе содержит активную зону 104, содержащую делимую топливную соль 106, которая является жидкой при рабочей температуре. Расщепляемые топливные соли включают соли любого нуклида, способного к делению при воздействии тепловых нейтронов с низкой энергией или нейтронов с высокой энергией. Кроме того, для целей настоящего описания делимый материал включает любой делящийся материал, любой воспроизводящий материал или комбинацию делящихся и воспроизводящих материалов. Топливная соль 106 может полностью заполнять или может и не полностью заполнять активную зону 104, а показанный вариант выполнения проиллюстрирован с необязательным свободным пространством 102 над уровнем топливной соли 106 в активной зоне 104. Размер активной зоны 104 реактора может быть выбран на основе характеристики и типа конкретной топливной соли 106, используемой для достижения и поддержания постоянного критического состояния топлива, в течение которого тепло, выделяемое непрерывным производством нейтронов в топливе, вызывает повышение температуры расплавленного топлива, когда оно находится в активной зоне реактора. Критичность относится к состоянию, в котором скорость потерь нейтронов равна или меньше, чем скорость производства нейтронов в активной зоне реактора. Производительность реактора 100 улучшается благодаря установке одного или нескольких отражателей 108А, 108В, 108С вокруг активной зоны 104 для отражения нейтронов обратно в активную зону. Отражатели могут быть изготовлены из любого материала, отражающего нейтрон, который известен теперь или будет разработан позже, такого как графит, бериллий, сталь, карбид вольфрама. Расплавленная топливная соль 106 циркулирует между активной зоной 104 реактора и одним или несколькими первичными теплообменниками 110, расположенными снаружи активной зоны 104.

Циркуляция может обеспечиваться путем использования одного или нескольких насосов 112.

[0019] Первичные теплообменники 110 передают тепло из расплавленной топливной соли 106 в первичный теплоноситель 114, который циркулирует по первичному охлаждающему контуру 115. В одном варианте выполнения первичный теплоноситель может представлять собой другую соль, такую как NaCl-MgCl_2 , или свинец. Также возможны и другие теплоносители, включая Na, NaK, сверхкритический CO_2 и эвтектику висмут-свинец. В одном варианте выполнения отражатель 108 находится между каждым первичным теплообменником 110 и активной зоной 104 реактора, как показано на Фиг.1. Например, в варианте выполнения цилиндрическая активная зона реактора 104, имеющая диаметр 2 метра (м) и высоту 3 м, ориентирована вертикально, так что плоские концы цилиндра расположены, соответственно, сверху и снизу. Вся активная зона 104 реактора полностью заключена в отражатели 108, между которыми предусмотрены каналы для потока топливной соли 106 в активную зону 104 реактора и из нее.

[0020] Несмотря на то, что на Фиг.1 проиллюстрирован один теплообменник 110, в зависимости от варианта выполнения может быть использовано любое количество теплообменников 110, которые расположены на внешней поверхности активной зоны 104. Например, также предусмотрены варианты выполнения, имеющие два, четыре, шесть, восемь, десять, двенадцать и шестнадцать первичных теплообменников.

[0021] Как обсуждалось выше, можно использовать любую конструкцию теплообменника, но, в целом, теплообменники 110 будут обсуждаться далее в терминах кожухотрубного теплообменника. В вариантах выполнения кожухотрубного теплообменника топливная соль может проходить через трубки, которые содержатся в корпусе, заполненном первичным теплоносителем. Топливная соль поступает в трубки через одну или несколько трубных решеток, расположенных в корпусе, чтобы предотвратить смешивание топливной соли с первичным теплоносителем. Это называют либо конфигурацией с топливом в трубном пространстве, либо конфигурацией с теплоносителем в межтрубном пространстве. В качестве альтернативы, топливная соль может протекать через корпус, а первичный

теплоноситель может проходить через трубки, причем эта конфигурация упоминается либо как конфигурация с теплоносителем в трубном пространстве, либо как конфигурация с топливом в межтрубном пространстве.

[0022] Соприкасающиеся с солью поверхности компонентов теплообменника могут иметь оболочку для защиты от коррозии. Другие варианты защиты включают защитные покрытия, свободные футеровки или плотно посаженные футеровки. В одном варианте выполнения оболочка на внутренней поверхности трубок выполнена из молибдена, который нанесен совместной экструзией вместе с основным материалом трубок теплообменника. Для других поверхностей, контактирующих с топливной солью (наружные поверхности трубных решеток и наружные поверхности корпуса), материал оболочки представляет собой молибденовый сплав. Никель и никелевые сплавы представляют собой другие возможные материалы оболочки. Молибден-рениевые сплавы могут использоваться там, где требуется сварка. Компоненты, контактирующие с первичной охлаждающей солью, могут быть покрыты Сплавом-200 (Alloy-200) или любыми другими совместимыми металлами, такими как материалы, отвечающие стандартам по давлению Американского Общества Инженеров-Механиков (ASME). Основным материалом трубок может быть нержавеющая сталь 316 или любые другие совместимые металлы. Например, в одном варианте выполнения сплав 617 представляет собой материал корпуса и трубной решетки.

[0023] В варианте выполнения с топливом в трубном пространстве, топливная соль протекает через трубки теплообменника 110 и выходит в канал для выпуска топливной соли. Первичный теплоноситель в корпусе теплообменника 110 удаляет тепло из топливной соли, проходящей через трубки, и нагретый теплоноситель затем передается в систему 120 выработки электроэнергии.

[0024] Как показано на Фиг.1, нагретый первичный теплоноситель 114 из первичных теплообменников 110 передается в систему 120 выработки электроэнергии для генерации некоторой формы мощности, например, тепловой, электрической или механической. Активная зона 104 реактора,

первичные теплообменники 110, насосы 112, трубы для циркуляции расплавленного топлива (включая другие вспомогательные компоненты, которые не показаны, такие как обратные клапаны, запорные клапаны, фланцы, дренажные резервуары и т.п.) и любые другие компоненты, через которые расплавленное топливо циркулирует или с которыми оно контактирует во время работы, могут упоминаться как топливный контур 116. Аналогично, контур 115 первичного теплоносителя содержит те компоненты, через которые циркулирует первичный теплоноситель, включая первичные теплообменники 110, трубы для циркуляции первичного теплоносителя (включая другие вспомогательные компоненты, которые не показаны, например, охлаждающие насосы 113, обратные клапаны, запорные клапаны, фланцы, дренажные резервуары и т.п.).

[0025] Реактор 100 на расплавленном топливе дополнительно содержит по меньшей мере один защитный корпус 118, который содержит топливный контур 116, чтобы предотвратить выпуск расплавленной топливной соли 106 в случае утечки из одного из компонентов топливного контура. Следует отметить, что не весь первичный охлаждающий контур 115 находится внутри защитного корпуса 118.

[0026] В варианте выполнения поток топливной соли приводится в движение насосом 112, так что топливная соль циркулирует через топливный контур 116. В показанном варианте выполнения для каждого первичного теплообменника 110 имеется один насос 112. Также может быть использовано меньшее или большее количество насосов. Например, в альтернативных вариантах выполнения для каждого теплообменника 110 могут использоваться несколько насосов меньшего размера. В одном варианте выполнения насос 112 может содержать крыльчатку, установленную в некотором месте в топливном контуре 116, которая при вращении приводит в движение поток топливной соли по топливному контуру. Крыльчатка может быть прикреплена к вращающемуся валу, который соединяет крыльчатку с двигателем, который может быть расположен снаружи защитного корпуса. Пример этого варианта выполнения можно найти на Фиг.6А-6С, который обсуждается ниже. Также возможны и другие конфигурации насосов.

[0027] В широком смысле это описание раскрывает многочисленные видоизменения и конфигурации компонентов, которые улучшают рабочие характеристики реактора 100, описанного со ссылкой на Фиг.1.

Конфигурация активной зоны реактора в форме усеченного конуса

[0028] В типичных топливных солях более высокотемпературная расплавленная соль менее плотная, чем низкотемпературная соль. Например, в одной топливной соли (71 мол % UCl_4 - 17 мол % UCl_3 - 12 мол % NaCl) при повышении температуры на 300 °C (например, от 627 °C до 927 °C) было подсчитано, что плотность топливной соли падает на 18 %, с 3660 до 3010 кг/м^3 . В одном варианте выполнения желательно, чтобы активная зона реактора и первичный теплообменник были выполнены таким образом, чтобы циркуляция топлива по топливному контуру могла осуществляться благодаря разности плотности, создаваемой разностью температур между солью с более высокой температурой в активной зоне и солью с более низкой температурой в другом месте в топливном контуре 116. Эта циркуляция может упоминаться как естественная циркуляция, так как циркуляционный поток происходит естественным образом в результате различий в плотности в топливной соли во время работы в стационарном режиме.

[0029] Фиг.2А-2С иллюстрируют вариант выполнения реактора, который использует только естественную циркуляцию для циркуляции топливной соли по топливному контуру. Эта конфигурация может устранять необходимость в насосах для топливной соли, и поэтому насосы не показаны. Это уменьшает сложность реактора 200, однако, полагаясь исключительно на естественную циркуляцию, можно ограничить количество тепла, которое может быть удалено, и, таким образом, ограничить общую выходную мощность реактора 200.

[0030] Фиг.2А иллюстрирует реактор 200, который содержит приблизительно цилиндрическую активную зону 204 реактора, которая представляет собой объем, ограниченный верхним отражателем 208А сверху, нижним отражателем 208В снизу и боковым или внутренним отражателем 208С, который в форме кольца охватывает активную зону. Как и на Фиг.1, проточные пути расположены сверху и снизу активной зоны 204 реактора, чтобы обеспечить топливной соли возможность протекать вокруг бокового

отражателя 208С. В этом варианте выполнения с естественной циркуляцией во время устоявшегося процесса деления нагретая топливная соль протекает сверху бокового отражателя 208С в теплообменник(и) 210. Затем топливная соль циркулирует вниз через теплообменник(и) 210 и охлажденная топливная соль возвращается в активную зону 204 реактора через один или несколько проточных путей, расположенных между нижним отражателем 208В и боковым отражателем 208С. В показанном варианте выполнения боковой отражатель 208В снабжен направляющей для потока, выполненной в виде выпуклости ниже теплообменника 210, который дросселирует проточный путь охлажденной топливной соли обратно в активную зону 204 реактора. Может использоваться направляющая для потока любой формы.

[0031] Фиг.2В представляет собой вид в разрезе половины реактора, изображенного на Фиг.2А, показывающий проточный путь топливной соли. В показанном варианте выполнения для целей моделирования активная зона 204 реактора составляет 1 метр (м) в радиусе с высотой 3 м. Сплошные верхние и нижние отражатели 208А, 208В задают верхнюю и нижнюю границу для топливной соли. Пространства между отражателями создают проточные пути, которые могут, в качестве альтернативы, упоминаться как каналы или проходы, обеспечивающие возможность циркуляции топливной соли из активной зоны реактора над внутренним отражателем через первичный теплообменник под внутренним отражателем и обратно в нижнюю часть активной зоны реактора. В проходах для топливной соли топливного контура может быть предусмотрена одна или несколько перегородок для направления потока или направляющих лопаток, чтобы получить более равномерный поток и равномерно распределять поток топливной соли через топливный контур и уменьшать застойные зоны в топливном контуре.

[0032] Топливная соль, нагретая в активной зоне, благодаря естественной конвекции будет подниматься и протекать вокруг внутреннего отражателя 208С через теплообменник 210, а затем через обратный канал, определяемый выпуклой формой внутреннего отражателя 208С и нижнего отражателя 208В. В одном варианте выполнения отражатели могут представлять собой оболочку, заполненную свинцом, а направляющие

конструкции (например, лопасти 212) представляют собой твердые элементы с тепловыми свойствами нержавеющей стали. Представленные охватывающие и направляющие конструкции предназначены для обеспечения хорошего потока во впускном отверстии теплообменника и для уменьшения появления и воздействия рециркуляционных ячеек в топливном контуре.

[0033] Фиг.2С иллюстрирует результаты моделирования температуры и потока для варианта выполнения, показанного на Фиг.2В, в соответствии с набором типичных рабочих условий для типичной топливной соли (71 мол % UCl_4 - 17 мол % UCl_3 - 12 мол % NaCl). Из моделирования было установлено, что самая высокая температура составляет приблизительно $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ в верхней части центра активной зоны 204, а самая низкая температура составляет приблизительно $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ на выходе из теплообменника 210. Температурные результаты показывают, что в условиях модели создается естественная ячейка циркуляции, в которой плотная охлажденная топливная соль протекает в нижнюю часть активной зоны 204 реактора, вытесняя в теплообменник 210, тем самым, более легкую, горячую топливную соль. Продолжающееся деление в центре активной зоны 204 подогревает охлажденную топливную соль и приводит в движение циркуляционный элемент до тех пор, пока деление не будет прервано, например, путем введения замедлителя или путем деградации топливной соли.

[0034] В альтернативном варианте выполнения для перемещения топливной соли через топливный контур во время нормальной выработки электроэнергии реактор может использовать как насосы, так и естественную циркуляцию. Естественная циркуляция по-прежнему выгодна в таком варианте выполнения как для уменьшения размера насосов, необходимых для достижения заданного расхода, так и в случае потери мощности для насоса или насосов, поскольку циркуляция и, тем самым, охлаждение продолжаются даже без активной подачи топливной соли через топливный контур.

[0035] Один из способов увеличения интенсивности естественной циркуляции заключается в выборочном размещении высокотемпературной активной зоны реактора ниже первичного теплообменника 210. Это

усиливает влияние разности плотности на циркуляцию путем размещения самой плотной соли, например, охлажденной соли, выпущенной из первичного теплообменника, в месте в топливном контуре 116, находящемся физически выше соли с самой высокой температурой (тем самым, наименее плотной), которая может быть найдена в «тепловом центре» активной зоны реактора.

[0036] Для целей настоящего описания понятие «теплового центра» относится к такому местоположению в активной зоне реактора, в зависимости от формы и размера активной зоны, в котором продолжающимися реакциями ядерного деления в активной зоне реактора, при отсутствии потока через реактор, вырабатывается наибольшая теплота. Это место изображено на Фиг.2В расположенным в центре цилиндрической активной зоны реактора, как вертикально, так и горизонтально. В докритической однородной топливной соли расположение теплового центра благодаря теплу распада можно аппроксимировать, используя центр масс объема топливной соли, ограниченной активной зоной 204 реактора. Однако это является лишь приближением, поскольку конфигурация и форма отражателей 208 и других компонентов будет иметь некоторое влияние на реакцию деления в активной зоне 204 реактора и, следовательно, на местоположение теплового центра.

[0037] В своем наиболее простом варианте выполнения (не показан) реактор, предназначенный для использования естественной циркуляции, может иметь первичный теплообменник, расположенный полностью над активной зоной реактора. Однако эта вертикально собранная конструкция осложняется генерацией газов в топливной соли во время ядерного деления, а также потенциально требует более крупный защитный корпус. Выделение газов в теплообменник увеличивает вероятность появления паровой пробки в теплообменнике и, как правило, увеличивает сложность и снижает эффективность теплообменника. По этой причине реакторы с теплообменниками, расположенными на уровне типичного уровня рабочей поверхности соли в активной зоне реактора или ниже нее имеют определенные преимущества.

[0038] Фиг.3 иллюстрирует вариант выполнения с улучшенной

конфигурацией для активной зоны реактора деления с естественной циркуляцией, в котором активная зона реактора больше снизу, чем сверху. В показанном варианте выполнения активная зона 304 реактора имеет приблизительно форму усеченного конуса. Форма усеченного конуса относится к форме конуса с кончиком, усеченным плоскостью, параллельной основанию конуса. Фиг.3 представляет собой вид в разрезе половины активной зоны 300 реактора, аналогично тому, что показано на Фиг.2А-2С. Активная зона 304 реактора окружена верхним отражателем 308А, нижним отражателем 308В и внутренним отражателем 308С, который отделяет активную зону реактора от первичного теплообменника 310. Как и в реакторе, изображенном на Фиг.2В, здесь также нет свободного пространства, и весь реактор, т.е. активная зона 304 реактора, каналы и первичный теплообменник 310 заполнены топливной солью. Пространства между отражателями 308А, 308В, 308С создают каналы, обеспечивающие циркуляцию топливной соли из активной зоны 304 реактора над внутренним отражателем 308С, через первичный теплообменник 310, под внутренним отражателем 308С и обратно в нижнюю часть активной зоны 304 реактора. Форма усеченного конуса приводит к перемещению центра масс и, следовательно, теплового центра 324 топливной соли ниже в активной зоне 304 реактора, и, следовательно, тепловой центр должен находиться ниже середины между верхней и нижней частями активной зоны реактора. Учитывая фиксированное расположение первичных теплообменников относительно активной зоны реактора, это изменение формы, при которой нижняя часть активной зоны реактора больше верхней части, как это имеет место в усеченном конусе или в пирамиде, улучшает естественную циркуляцию топливной соли в топливном контуре.

[0039] Фиг.4 иллюстрирует другой вариант выполнения конструкции активной зоны реактора с формой усеченного конуса. Фиг.4 представляет собой вид в разрезе половины активной зоны 400 реактора, аналогично тому, что показано на Фиг.2А-2С и 3. Активная зона 404 реактора окружена верхним отражателем 408А, нижним отражателем 408В и внутренним отражателем 408С, которые отделяют активную зону реактора от вертикально ориентированного первичного теплообменника 410.

Пространства между отражателями 408А, 408В, 408С создают каналы, обеспечивающие циркуляцию топливной соли из активной зоны 404 реактора над внутренним отражателем 408С, через первичный теплообменник 410, под внутренним отражателем 408С и обратно в нижнюю часть активной зоны 404 реактора. Опять же, форма усеченного конуса приводит к перемещению центра массы и теплового центра 424 топливной соли ниже в активной зоне реактора.

[0040] Фиг.2А-2С, 3 и 4 приведены приблизительно в одном и том же масштабе, а сравнение этих трех чертежей иллюстрирует разницу в приблизительных местоположениях их соответствующих тепловых центров. На Фиг.2В тепловой центр находится приблизительно в центре активной зоны реактора, который расположен почти на одном уровне с дном первичного теплообменника. На Фиг.3 и 4 тепловые центры расположены значительно ниже в активной зоне реактора и, очевидно, ниже дна первичного теплообменника. Под дном теплообменника понимается место, в котором самая холодная расплавленная соль будет находиться в системе, т.е. которое представляет собой выход из теплообменника. Например, в кожухотрубном теплообменнике дно теплообменника находится у нижней трубной решетки.

[0041] При использовании активной зоны реактора, которая больше в жней части, чем в верхней, как показано на Фиг.3 и 4, для любой конфигурации теплообменника, в которой верхняя часть теплообменника находится на одном уровне или ниже уровня топливной соли в активной зоне реактора, расположение теплового центра относительно местоположения самой холодной топливной соли в циркуляционном контуре может быть изменено. Это позволяет управлять величиной естественной циркуляции. В одном варианте выполнения один рабочий коэффициент, который определяет интенсивность естественной циркуляции в реакторе, представляет собой соотношение вертикального расстояния А между верхней и нижней частью активной зоны реактора, то есть глубиной соли в активной зоне реактора (обозначенного как расстояние А на Фиг.3 и 4) и расстояния теплового центра активной зоны реактора ниже дна теплообменника (обозначенного как расстояние В на Фиг.3 и 4). В одном

варианте выполнения отношение V/A является положительным, то есть тепловой центр находится ниже дна теплообменника. Чем больше отношение V/A , тем интенсивнее будет ячейка естественной циркуляции. В варианте выполнения отношение V/A составляет от 0,01 до 0,45. В еще одном варианте выполнения отношение составляет от 0,1 до 0,4.

[0042] Активные зоны реактора, выполненные в виде усеченного конуса, являются лишь одним примером формы активной зоны реактора, которая больше в нижней части, чем в верхней, и поэтому улучшает естественную циркуляцию через первичный теплообменник. Возможны и другие формы, тем более что форма активной зоны реактора определяется, главным образом, верхним, нижним и внутренним отражателями. Например, усеченная формы не должна быть точно конической, но может быть усеченной формой пирамиды, имеющей любое число плоских или криволинейных сторон, например, трехстороннюю пирамиду, четырехстороннюю (или квадратную) пирамиду, 5-стороннюю (или пятиугольную) пирамиду, шестигранную (или шестиугольную) пирамиду и т.д., вплоть до пирамиды с любым количеством сторон, но каждая из которых имеет усеченный кончик.

[0043] Фиг.5, например, иллюстрирует усеченную декагональную пирамиду (10-стороннюю пирамиду), которая была бы подходящей формой для активной зоны реактора с естественной циркуляцией. Кроме того, форма не обязательно должна быть осесимметричной. То есть, активная зона реактора может иметь форму трапециевидной призмы, имеющей основание, верхнюю часть, один набор параллельных вертикальных сторон и противоположный набор наклонных плоских сторон. В еще одной альтернативе некоторые из сторон призмы могут быть криволинейными вместо плоских. Активная зона реактора также может быть выполнена как гиперболоид, как и обычно наблюдаемые градирни в некоторых ядерных установках, или иметь неправильную форму. Любая такая усеченная форма годится, если площадь нижней части активной зоны реактора больше площади верхней части, или же если большая часть массы топливной соли находится ниже середины между верхней и нижней частями активной зоны реактора, так что тепловой центр расположен ниже средней точки между

уровнем топливной соли в активной зоне реактора и нижней частью активной зоны реактора. В сочетании с теплообменником, имеющим впускное отверстие на уровне топливной соли в активной зоне реактора или ниже этого уровня и выпускное отверстие над тепловым центром, активная зона реактора усеченной формы значительно улучшает естественную циркуляцию топливной соли во время процесса генерирования мощности для цилиндрической активной зоны той же самой высоты.

Интегрированное активное охлаждение защитного корпуса

[0044] Фиг.6А-6С иллюстрируют вариант выполнения конструкции реактора, который интегрирует активное охлаждение защитного корпуса в первичный охлаждающий контур. Фиг.6А изображает вид в аксонометрии конфигурации с восемью теплообменниками реактора 600 на расплавленной соли, в частичном разрезе для демонстрации различных внутренних компонентов. Фиг.6В иллюстрирует вид в разрезе, проходящем через центр реактора и через два противоположных теплообменника. Фиг.6С изображает вид в разрезе, в котором более подробно представлена конструкция теплообменника и перенаправление первичного теплоносителя. На Фиг.6В и 6С изображены фигурные скобки для отображения секций защитного корпуса 618, которые подвергаются активному охлаждению из-за потока теплоносителя или топливной соли.

[0045] В показанном варианте выполнения активная зона 604 реактора и теплообменники 610 находятся в защитном корпусе 618. Первичный защитный корпус 618 ограничен оболочкой или набором оболочек, которые создают корпус с открытым верхом. Охлажденный первичный теплоноситель входит и выходит из защитного корпуса 618 сверху, что позволяет защитному корпусу быть выполненным как одно целое и не иметь сквозных отверстий. Первичный охлаждающий контур интегрирован в реактор 600 так, что входящий первичный теплоноситель сначала охлаждает по меньшей мере часть защитного корпуса 618. После того, как он направляется на некоторое расстояние во впускной канал 630 для первичного теплоносителя рядом с внутренней поверхностью защитного корпуса 618, в показанном варианте выполнения теплоноситель затем направляется в нижнюю часть первичного теплообменника 610. Теплоноситель выходит из верхней части первичного

теплообменника 610 и затем выводится из защитного корпуса 618 и в систему выработки электроэнергии (не показана).

[0046] В показанном варианте выполнения топливная соль приводится в движение по топливному контуру посредством восьми отдельных крыльчаток 612А, расположенных над теплообменниками 610. Каждая крыльчатка 612А соединена вращающимся валом 612В с двигателем (не показан), расположенным над реактором 600. Поток соли через топливный контур показан пунктирной линией 606, а поток первичного теплоносителя показан пунктирной линией 614.

[0047] Еще один аспект проиллюстрированной конструкции заключается в том, что охлажденная топливная соль, выходящая из теплообменников 610, направляется вдоль части защитного корпуса до входа в активную зону 604 реактора. Это интегрирует в защитный корпус дополнительное активное охлаждение. Как иллюстрирует вариант выполнения, защитный корпус не находится непосредственно рядом с активной зоной реактора в любой точке. Фактически защитный корпус 618, изображенный на Фиг.6А-6С, непосредственно примыкает только к трем компонентам: впускному каналу 630 для охлажденного первичного теплоносителя, каналу 632 для охлажденной топливной соли, который возвращает охлажденную соль в активную зону 604 реактора, и нижнему отражателю 608В. Отметим также, что сам отражатель 608В охлаждается потоком охлажденной топливной соли, поступающей в активную зону 604 реактора, который затем опосредованно охлаждает часть защитного корпуса 618, расположенную рядом с нижним отражателем. Таким образом, защитный корпус 618 находится только рядом с компонентами, которые были активно охлаждены путем контакта либо с охлажденным первичным теплоносителем, либо с охлажденной топливной солью.

[0048] При работе первичный охлаждающий контур не только служит для удаления тепла из расплавленной топливной соли, но также непосредственно удаляет тепло и поддерживает температуру защитного корпуса. Обратите внимание, что система, как показано на чертеже, позволяет независимо контролировать температуру топлива и температуру защитного корпуса путем независимого управления потоком топливной соли

и первичного теплоносителя. Путем модуляции указанных двух потоков оператор может иметь возможность выборочно поддерживать как температуру активной зоны, так и температуру защитного корпуса на независимых уровнях. Кроме того, путем перенаправления потоков и обеспечения изоляции в различных местах, характеристики теплопередачи между различными компонентами могут быть адаптированы для обеспечения большего или меньшего охлаждения, по мере необходимости.

[0049] Фиг.7 иллюстрирует блок-схему варианта выполнения способа активного охлаждения корпуса. В показанном варианте выполнения интегрированное активное охлаждение можно рассматривать как способ 700 активного охлаждения защитного корпуса в ядерном реакторе с расплавленной топливной солью путем удаления тепла непосредственно как из расплавленной соли, так и из по меньшей мере части защитного корпуса через первичный охлаждающий контур. В первой операции 702 непосредственного охлаждения защитного корпуса по меньшей мере первая часть защитного корпуса охлаждается первичным теплоносителем до того, как теплоноситель входит в собственно теплообменник для топливной соли. Это достигается путем перенаправления охлажденного первичного теплоносителя вблизи внутренней поверхности по меньшей мере части защитного корпуса перед направлением его в первичный теплообменник. Это служит для активного охлаждения этой части защитного корпуса. В одном варианте выполнения впускной канал для теплоносителя и его тепловой контакт с защитным корпусом в этой части могут быть сконструированы для усиления теплопередачи между теплоносителем и корпусом.

[0050] Первая операция 702 непосредственного охлаждения защитного корпуса может также включать охлаждение крышки корпуса реактора путем перенаправления первичного теплоносителя через крышку корпуса реактора. В одном варианте выполнения эта перенаправление может быть использована для конкретного охлаждения верхнего отражателя реактора. Это может быть сделано с использованием того же теплоносителя, который затем протекает в теплообменник, т.е. боковой поток теплоносителя, который затем объединяется с основным потоком теплоносителя или с использованием полностью отдельного потока теплоносителя.

[0051] В показанном варианте выполнения во второй операции 704 непосредственного охлаждения защитного корпуса по меньшей мере вторая часть защитного корпуса охлаждается охлажденной топливной солью, выходящей из первичного теплообменника, до того, как охлажденная топливная соль войдет в активную зону реактора. Это может быть достигнуто путем перенаправления охлажденной топливной соли рядом с внутренней поверхностью второй части защитного корпуса, как показано на Фиг.6А-6С. Подобно впускному каналу для теплоносителя, канал для охлажденной топливной соли и его тепловой контакт с защитным корпусом в этой части могут быть выполнены для усиления теплопередачи между охлажденной топливной солью и корпусом.

[0052] Также может быть выполнена третья операция 706 непрямого охлаждения. В этой операции топливная соль может направляться рядом с поверхностью отражателя нейтронов, который контактирует с некоторой третьей частью защитного корпуса, охлаждая, тем самым, отражатель нейтронов и, опосредованно, третью часть защитного корпуса, находящуюся в контакте с отражателем нейтронов. В этой операции 706, в зависимости от варианта выполнения, отражатель может представлять собой нижний отражатель, такой как отражатель 608В, как показано на Фиг.6А-6С, или боковой отражатель, который примыкает к части защитного корпуса.

Конфигурация первичного теплообменника с топливом в межтрубном пространстве

[0053] Там, где подробно описано выше, первичные теплообменники обсуждались в терминах кожухотрубных теплообменников с топливной солью, протекающей через трубки, и первичным теплоносителем, протекающим через корпус и вокруг трубок. Как уже упоминалось ранее, это конфигурация может называться альтернативно как «топливо в межтрубном пространстве» или как «теплоноситель в трубном пространстве». Однако усовершенствование работы реактора в целом может быть достигнуто путем перехода к конфигурации топлива в межтрубном пространстве.

[0054] Было установлено, что в условиях, когда металлические компоненты подвергаются воздействию высоких доз радиации в течение длительных периодов времени, более сложно предсказать разрушение

сварных компонентов, чем несварного материала. Сварные швы слабы и потенциально подвержены радиационному повреждению и деградации с течением времени при высоких дозах радиации. Таким образом, для снижения риска и повышения уровня предсказуемости, присущего конкретной конструкции, полезно перемещать свариваемые компоненты как можно дальше от областей с большим потоком нейтронов или полностью исключить сварные компоненты из конструкции.

[0055] Одним сварным компонентом, который трудно исключить, являются трубные решетки в кожухотрубных теплообменниках. Поскольку сварные швы в трубных решетках предотвращают смешивание топливной соли с первичным теплоносителем, уменьшение разрушения сварных швов с течением времени является конструктивным фактором.

[0056] Усовершенствование конструкции реактора заключается в том, чтобы изменить конструкцию теплообменника на конструкцию с топливом в межтрубном пространстве и переместить противоположные трубные решетки как можно дальше от центра активной зоны реактора, но при этом чтобы они остались в защитном корпусе. Это уменьшает относительную дозу, получаемую трубными решетками, по сравнению с конструкциями, изображенными на Фиг.2А-2С, 3, 4 и 6А-6С.

[0057] Фиг.8 иллюстрирует вариант выполнения реактора с теплообменником, имеющим конфигурацию топлива в межтрубном пространстве. В варианте выполнения половина реактора 800 показана, как и на Фиг.4А-6. Активная зона 804 реактора окружена верхним отражателем 808А, нижним отражателем 808В и внутренним отражателем 808С, который отделяет активную зону реактора от первичного теплообменника 810. Пространства между отражателями 808А, 808В, 808С создают каналы, обеспечивающие циркуляцию (проиллюстрирована пунктирной линией 806) из активной зоны 804 реактора над внутренним отражателем 808С через межтрубное пространство первичного теплообменника 810, под внутренним отражателем 808С и обратно в нижнюю часть активной зоны 804 реактора. Для того, чтобы заставить топливную соль следовать обходному пути вокруг трубок теплообменника, в корпусе предусмотрены перегородки 812.

[0058] Теплоноситель протекает через трубное пространство

теплообменника 810, но прежде, чем войти в нижнюю часть теплообменника, сначала протекает вниз по длине впускного канала 830 для теплоносителя, прилегающего к боковой стенке и к части нижней части защитного корпуса 818. Таким образом, показанный выше реактор 800 использует вариант выполнения способа 700 активного охлаждения, описанного выше со ссылкой на Фиг.7, в котором часть защитного корпуса 818 реактора непосредственно охлаждается охлажденным первичным теплоносителем, а нижний отражатель 808В непосредственно охлаждается охлажденной топливной солью, возвращающейся в активную зону 804 реактора.

[0059] Первичный теплоноситель поступает в трубки теплообменника 810, протекая через нижнюю трубную решетку 831, которая показана расположенной в нижней части активной зоны реактора. В зависимости от варианта выполнения, нижняя трубная решетка 831 может находиться на уровне или ниже уровня нижнего отражателя 808В. Теплоноситель выходит из трубок теплообменника на верхней трубной решетке 832, которая на Фиг.8 показана расположенной на некотором расстоянии выше активной зоны 804 реактора и защитного корпуса 818. Поток теплоносителя также проиллюстрирован пунктирной линией 814.

[0060] Фиг.8 иллюстрирует область 834 внутри оболочки теплообменника, которая находится выше уровня соли в активной зоне 804 реактора. Эта область может быть либо сплошной, за исключением проникающих трубок, либо может представлять собой свободное пространство, заполненное инертным газом.

[0061] Для содействия циркуляции топливной соли, циркуляции первичного теплоносителя, или того и другого, может быть предусмотрен один или несколько насосов (не показаны). Например, крыльчатка может быть установлена в одном или в обоих впускных каналах для нагретой топливной соли в верхней части активной зоны 804 реактора или (как более подробно описано ниже) в выпускных каналах для охлажденного топлива в нижней части активной зоны 804 реактора. Аналогично, крыльчатка может быть установлена во впускном канале 830 для теплоносителя, чтобы способствовать управлению потоком первичного теплоносителя.

[0062] Фиг.9 иллюстрирует альтернативный вариант выполнения

реактора, изображенного на Фиг.8. В показанном варианте выполнения номера позиций соответствуют номерам позиций на Фиг.8 для тех же самых элементов. Фиг.9 иллюстрирует альтернативную конфигурацию для трубных решеток 931, 932, которая еще более снижает воздействие на сваренные трубные решетки потока нейтронов из топливной соли. В показанном варианте выполнения трубки трубного пучка проникают, по меньшей мере частично, через верхний и нижний отражатели 908А и 908В на обоих концах теплообменника 910. В еще одном варианте выполнения трубная решетка устранена в пользу отражателей 908А, 908В, которые, поэтому, выполняют роль трубной решетки, предотвращая утечку топливной соли из межтрубного пространства в теплоноситель в трубном пространстве.

[0063] Следует также отметить, что на Фиг.9 показан второй боковой отражатель 908D, расположенный между теплообменником 910 и впускным каналом 930 для теплоносителя. Это может обеспечить дополнительное отражение или может быть просто замедлителем или другой защитой для уменьшения потока нейтронов за пределами активной зоны 904.

U-образная конфигурация трубок первичного теплообменника

[0064] Еще одно усовершенствование конструкции реактора заключается в изменении конструкции теплообменника на конструкцию с топливом в межтрубном пространстве и использовании теплообменника с U-образными трубками. В этой конструкции единственная трубная решетка теплообменника с U-образными трубками расположена над активной зоной реактора и снаружи защитного корпуса и, таким образом, в среде с относительно низкой дозой, по сравнению с конструкциями, изображенными на Фиг.2А-2С, 3, 4 и 6А-6С.

[0065] На Фиг.10 изображен вариант выполнения реактора с теплообменником, имеющим конфигурацию с топливом в межтрубном пространстве и с U-образными трубками, в котором единственная трубная решетка расположена над активной частью реактора. В этом варианте выполнения проиллюстрирована половина реактора 1000, как и на Фиг.8 и 9. Активная зона 1004 реактора окружена верхним отражателем 1008А, нижним отражателем 1008В и внутренним отражателем 1008С, которые ограничивают активную зону реактора и отделяют ее от первичного

теплообменника 1010. Пространства между отражателями 1008 А, 1008В, 1008С создают каналы, обеспечивающие циркуляцию топливной соли (проиллюстрированную пунктирной линией 1006) из активной зоны 1004 реактора над внутренним отражателем 1008С, через межтрубное пространство первичного теплообменника 1010, под внутренним отражателем 1008С и обратно в нижнюю часть активной зоны 1004 реактора. Для того, чтобы заставить топливную соль следовать по обходному пути вокруг трубок теплообменника, в оболочке предусмотрены перегородки 1012. Теплоноситель протекает через U-образные трубки теплообменника 1010 так, что теплоноситель как входит в трубки, так и выходит из трубок сверху, через единственную трубную решетку 1032. Верхняя трубная решетка 1032 на Фиг.10 показана расположенной на некотором расстоянии выше активной зоны 1004 реактора и защитного корпуса 1018 и, следовательно, воздействие не нее излучения уменьшается относительно других конструкций, как обсуждалось выше. Поток теплоносителя также проиллюстрирован пунктирной линией 1014.

[0066] На Фиг.10 показана область 1034 внутри оболочки теплообменника, которая находится выше уровня соли в активной зоне 1004 реактора. Опять же, эта область может быть либо сплошной, за исключением проникающих трубок, либо может представлять собой свободное пространство, заполненное инертным газом. Если оно сплошное, то оно может быть заполнено материалом отражателя, через который проходит трубка.

[0067] Опять же, один или несколько насосов или по меньшей мере их крыльчатки (не показаны) могут быть предусмотрены для содействия циркуляции топливной соли и/или теплоносителя. Например, крыльчатка может быть установлена в одном или обоих впускных каналах для нагретой топливной соли в верхней части активной зоны 1004 реактора, или в охлаждаемом канале для выпуска топлива в нижней части активной зоны 1004 реактора.

[0068] В еще одном варианте выполнения сварные компоненты, такие как трубные решетки 1032, могут быть экранированы от нейтронов листом поглощающего нейтроны материала. Поглощающий нейтроны материал

может быть расположен рядом с трубной решеткой на стороне, обращенной к активной зоне 1004 реактора. Такая комбинация трубной решетки и поглощающего нейтроны материала может использоваться в любом варианте выполнения, описанном выше. Поглощающий нейтроны материал может представлять собой покрытие, дополнительный слой или независимый конструктивный компонент, смежный или отстоящий от трубной решетки.

[0069] Еще один вариант выполнения конструкции теплообменника с U-образными трубками представляет собой повернутый на 90 градусов теплообменник, так что теплоноситель входит и выходит из теплообменника в боковом направлении относительно защитного корпуса.

[0070] На Фиг.11 показан вариант выполнения реактора с теплообменником, имеющим конфигурацию с топливом в межтрубном пространстве и с U-образными трубками, в котором единственная трубная решетка находится внутри реактора, но установлена в боковом направлении в месте, удаленном от активной зоны реактора. В этом варианте выполнения проиллюстрирована половина реактора 1100, как и на Фиг.4А-6. Активная зона 1104 реактора окружена верхним отражателем 1108А, нижним отражателем 1108В и внутренним отражателем 1108С, который отделяет активную зону реактора от первичного теплообменника 1110. Пространства между отражателями 1108А, 1108В, 1108С создают каналы, обеспечивающие циркуляцию топливной соли (проиллюстрированную пунктирной линией 1106) из активной зоны 1104 реактора над внутренним отражателем 1108С, через межтрубное пространство первичного теплообменника 1110, под внутренним отражателем 1108С и обратно в нижнюю часть активной зоны 1104 реактора. Для того, чтобы заставить топливную соль проходить по обходному пути вокруг трубок теплообменника, в оболочке предусмотрены перегородки 1112. Теплоноситель протекает через U-образные трубки теплообменника 1110, так что теплоноситель как входит в трубки, так и выходит из трубок из верхней части реактора 1000. В показанном варианте выполнения теплоноситель поступает в реактор в канал, расположенный рядом с защитным корпусом 1118 и протекает вниз, а затем в поперечном направлении через нижнюю часть трубной решетки 1132 и в теплообменник 1110. Затем теплоноситель выходит из верхней части трубной решетки 1132

и выходит из верхней части защитного корпуса 1118. Поток теплоносителя проиллюстрирован пунктирной линией 1114. Поскольку трубная решетка 1132 находится дальше от активной зоны реактора, по сравнению с описанными выше конструкциями, воздействие излучения уменьшается. Следует отметить, что эта конструкция является также еще одним вариантом выполнения активного охлаждения защитного корпуса, как описано выше.

[0071] В еще одном варианте выполнения U-образные трубки могут быть ориентированы горизонтально (не показаны), в отличие от вертикально ориентированных U-образных трубок, показанных на Фиг.11. Эта ориентация может обеспечить преимущества с точки зрения теплопередачи, одновременно помещая трубные решетки вдали от среды с высоким потоком.

[0072] В одном варианте выполнения трубная решетка 1132 дополнительно защищена от повреждения нейтронами посредством установки второго внутреннего отражателя нейтронов (не показан) между трубной решеткой и топливной солью. В этом варианте выполнения трубки проникают во второй внутренний отражатель нейтронов перед тем, как соприкоснуться с топливной солью. Это служит для дальнейшего отдаления трубной решетки от нейтронов, испускаемых топливной солью. В альтернативном варианте выполнения трубная решетка 1132 отделена от топливной соли замедлителем нейтронов, выполненным из некоторого количества материала, имеющего относительно большое поперечное сечение поглощения нейтронов, такого как стальные сплавы или другие материалы, которые включают Ag, In, Cd, Bo, Co, Hf, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. Например, можно использовать высоколегированную сталь, сплавы Ag-In-Cd, карбид бора, диборид титана, диборид гафния, нитрат гадолиния или любой другой материал, используемый в качестве управляющего стержня или поглотителя нейтронов, который известен теперь или будет разработан позднее. В варианте выполнения отражатель или поглотитель может просто представлять собой покрытие из соответствующего материала на стороне соприкосновения солей с трубной решеткой 1132.

Реактор радиального петлевого типа

[0073] Фиг. 12А и 12В иллюстрируют альтернативную конструкцию реактора, называемую реактором радиального петлевого типа. Фиг.12А

изображает вид сверху реактора 1200, а Фиг.12В изображает вид в разрезе, выполненном вдоль линии А-А, показанной на Фиг.12 А. В показанном варианте выполнения радиального петлевого реактора 1200 активная зона 1204 реактора ограничена верхним отражателем 1208А, нижним отражателем 1208В и боковым или внутренним отражателем 1208С, выполненным в форме трубки. Отражатели 1208 находятся внутри защитного корпуса 1218А активной зоны, которая пронизана восемью выпускными трубками 1209 для нагретой топливной соли, расположенными в верхней части защитного корпуса 1218А, и восемью возвратными трубками 1211 для охлажденного топлива, которые проникают в защитный корпус на уровне нижней части активной зоны 1204 реактора. Каждый набор выпускной трубки 1209, теплообменника 1210 и возвратной трубки 1211 может упоминаться как плечо теплообменника.

[0074] Восемь первичных теплообменников 1210 показаны в диагональной конфигурации вокруг защитного корпуса 1218А активной зоны, несмотря на то, что, в зависимости от варианта выполнения, может использоваться больше или меньше первичных теплообменников 1210. Следует также отметить, что плечи теплообменника могут быть вертикальными или более или менее диагональными, чем показано.

[0075] В показанном варианте выполнения нагретая топливная соль циркулирует из активной зоны 1204 реактора через выпускные трубки 1209 и через теплообменники 1210. Теплообменники охлаждают топливную соль, которая затем возвращается в нижнюю часть активной зоны 1204 реактора через возвратные трубки 1211.

[0076] В показанном варианте выполнения активная зона 2204 реактора имеет цилиндрическую форму, но для улучшения естественной циркуляции топливной соли во время работы эта форма может быть модифицирована по существу в форму усеченного конуса активной зоны реактора или в целом в усеченную форму, как описано выше. Слово «по существу» используется здесь для обозначения того, что форма активной зоны реактора может представлять собой не идеально усеченную форму, имеющую совершенно плоские поверхности для нижней и верхней и совершенно плоские или конические боковые стороны. Например, Фиг.3 и 4 иллюстрируют активные

зоны по существу усеченной формы, даже несмотря на то, что в центре верхней и нижней частей и по бокам активной зоны реактора выполнены выступы для направления потока или другие формы.

[0077] В варианте выполнения (не показан) один или несколько насосов (или по меньшей мере компоненты крыльчатки таких насосов) установлены в одной или обеих из возвратной и выпускной трубок 1211, 1209. В еще одном варианте выполнения (не показан) запорные клапаны также могут быть предусмотрены в одной или обеих из возвратной и выпускной трубок 1211, 1209, а также дренажные краны, чтобы можно было независимо отключить любое из восьми плеч теплообменника от активной зоны 1204 реактора и слить топливную соль для удобства обслуживания. В варианте выполнения (не показан) один или несколько сливных резервуаров могут быть предусмотрены ниже уровня теплообменников, защитного корпуса 1218А активной зоны или плеч теплообменника для приема дренированной топливной соли. В альтернативном варианте выполнения каждое плечо теплообменника может содержать насос во впускной трубке, который откачивает из теплообменника топливную соль, когда она сливается, возвращая топливную соль в активную зону 1204 реактора, а не в дренажный резервуар. Одно из преимуществ этой конструкции заключается в том, что плечи петли и углы теплообменников могут быть отрегулированы для обеспечения дополнительной гибкости для положения топливного насоса (насосы не показаны на чертеже), которые расположены в нижней части теплообменника. Кроме того, валы насоса, проходящие через теплообменники или рядом с ними, или проходки корпуса снизу в этом варианте выполнения не требуются.

[0078] Как показано на Фиг.12D, вторичный защитный корпус 1218В может быть установлен вокруг всей сборки активной зоны реактора, то есть вокруг всех компонентов в топливном контуре реактора 1200. В одном варианте выполнения вторичный защитный корпус имеет объем, достаточный для удержания по меньшей мере всей топливной соли, содержащейся в реакторе. Размер может быть дополнительно увеличен, чтобы обеспечить запас прочности и быть достаточно большим, чтобы удерживать как объем теплоносителя, так и весь объем топливной соли в

реакторе. Защитный корпус может полностью окружать реактор 1200 радиального петлевого типа, как показано, может частично окружать реактор или может просто быть большим резервуаром ниже реактора 1200 достаточного размера. В варианте выполнения первичный теплоноситель циркулирует через первичные теплообменники 1210 сверху вторичного защитного корпуса 1218В.

[0079] Реакторы 1200 радиального петлевого типа допускают, чтобы размер первичных теплообменников 1210 не ограничивался высотой активной зоны 1204 реактора. Кроме того, поскольку теплообменники находятся снаружи защитного корпуса 1218А активной зоны, они могут более легко обслуживаться и контролироваться, а также находятся дальше от активной зоны реактора и, следовательно, получают уменьшенную дозу излучения.

[0080] Несмотря на прилагаемую формулу изобретения, изобретение также определяется следующими положениями:

1. Ядерный реактор на расплавленной соли, содержащий:

активную зону, имеющую в целом форму усеченной фигуры, содержащую делимую топливную соль и имеющую выпускное отверстие для нагретой топливной соли, впускное отверстие для охлажденной топливной соли и тепловой центр, расположенный над впускным отверстием для охлажденной топливной соли, и

по меньшей мере один теплообменник, который принимает нагретую топливную соль через свое впускное отверстие для топливной соли, расположенное ниже выпускного отверстия для нагретой топливной соли активной зоны реактора, передает тепло от топливной соли теплоносителю и выпускает охлажденную топливную соль через свое выпускное отверстие для топливной соли, соединенное с впускным отверстием для охлажденной топливной соли активной зоны реактора,

причем тепловой центр активной зоны реактора находится на уровне ниже выпускного отверстия для топливной соли теплообменника, и

при этом расположение теплового центра вызывает естественную циркуляцию в случае потери принудительного потока, когда реактор находится в критическом состоянии.

2. Ядерный реактор по п.1, в котором активная зона имеет глубину, представляющую собой расстояние между верхним уровнем топливной соли в активной зоне реактора и нижней частью топливной соли в активной зоне реактора, причем в реакторе также соотношение расстояния вниз до выпускного отверстия для топливной соли теплообменника от теплового центра и глубины активной зоны реактора в тепловом центре составляет от 0,1 до 0,45.

3. Ядерный реактор по п.1 или 2, в котором форма активной зоны реактора выбрана из усеченного конуса, усеченной пирамиды, трапецеидальной призмы или гиперболоида.

4. Ядерный реактор по п.1 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 1, также содержащий защитный корпус, содержащий активную зону реактора и указанный по меньшей мере один теплообменник.

5. Ядерный реактор по п.1 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 1, также содержащий по меньшей мере одну крыльчатку, приводимую в действие двигателем, причем крыльчатка расположена в канале между впускным отверстием для топливной соли теплообменника и выпускным отверстием для нагретой топливной соли активной зоны реактора и выполнена с возможностью подачи потока топливной соли в теплообменник.

6. Ядерный реактор по п.1 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 1, в котором расположение теплового центра вызывает естественную циркуляцию в случае потери принудительного потока, когда реактор находится в состоянии докритичности.

7. Ядерный реактор по п.1 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 1, также содержащий по меньшей мере одну направляющую поток перегородку, выполненную с возможностью направления потока топливной соли между активной зоной реактора и указанным по меньшей мере одним теплообменником.

8. Ядерный реактор по п.1 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 1, также содержащий верхний отражатель нейтронов, ограничивающий верхнюю часть активной зоны реактора, нижний отражатель нейтронов, ограничивающий нижнюю часть активной зоны

реактора, и по меньшей мере один внутренний отражатель нейтронов, ограничивающий стороны активной зоны реактора, причем указанный по меньшей мере один внутренний отражатель находится между указанным по меньшей мере одним теплообменником и активной зоной реактора.

9. Ядерный реактор по п.8, в котором выпускное отверстие для нагретой топливной соли активной зоны реактора представляет собой проход между верхним отражателем нейтронов и указанным по меньшей мере одним внутренним отражателем нейтронов.

10. Ядерный реактор по п.8 или 9, в котором впускное отверстие для охлажденной топливной соли активной зоны реактора представляет собой проход между нижним отражателем нейтронов и указанным по меньшей мере одним внутренним отражателем нейтронов.

11. Ядерный реактор по п.1 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 1, в котором указанный по меньшей мере один теплообменник представляет собой кожухотрубный теплообменник, в котором топливная соль протекает по его трубкам.

12. Ядерный реактор по п.п.1-10, в котором указанный по меньшей мере один теплообменник представляет собой кожухотрубный теплообменник, в котором топливная соль протекает через его корпус.

13. Ядерный реактор по п.4 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 4, в котором поступающий охлажденный теплоноситель охлаждает первую часть защитного корпуса до того, как теплоноситель втекает в указанный по меньшей мере один теплообменник.

14. Ядерный реактор по п.4 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 4, в котором охлажденная топливная соль, выпускаемая из выпускного отверстия для топливной соли теплообменника, охлаждает вторую часть защитного корпуса перед поступлением в активную зону реактора через впускное отверстие для охлажденной топливной соли активной зоны реактора.

15. Способ активного охлаждения защитного корпуса и топливной соли в ядерном реакторе на расплавленной топливной соли, включающий:

обеспечение протекания первичного теплоносителя в защитный корпус вблизи первой части защитного корпуса, охлаждая, тем самым, указанную

первую часть;

обеспечение протекания первичного теплоносителя в теплообменник, находящийся внутри защитного корпуса и на расстоянии от него, причем теплообменник выпускает охлажденную топливную соль;

перенаправление выпускаемой охлажденной топливной соли через канал вблизи второй части защитного корпуса, охлаждая, тем самым, указанную вторую часть; и

перенаправление охлажденной топливной соли через канал вблизи отражателя нейтронов, охлаждая, тем самым, отражатель нейтронов;

причем охлажденный отражатель нейтронов расположен смежно с третьей частью защитного корпуса, так что охлаждение отражателя нейтронов опосредованно охлаждает указанную третью часть.

16. Способ по п.15, в котором при обеспечении протекания первичного теплоносителя в защитный корпус также пропускают теплоноситель через впускной проход для теплоносителя внутри защитного корпуса, термически соединенный с первой частью защитного корпуса.

17. Способ по п.15 или 16, в котором при обеспечении протекания первичного теплоносителя в защитный корпус также пропускают теплоноситель через впускной проход для теплоносителя внутри защитного корпуса к впускному отверстию для теплоносителя теплообменника, расположенному рядом с выпускным отверстием для охлажденной топливной соли теплообменника.

18. Способ по п.15 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 15, в котором при обеспечении протекания первичного теплоносителя в защитный корпус также пропускают теплоноситель через впускной проход для теплоносителя внутри защитного корпуса, термически соединенный с первой частью защитного корпуса.

19. Способ по п.15 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 15, в котором топливная соль представляет собой смесь по меньшей мере одной делящейся соли и по меньшей мере одной не делящейся соли.

20. Способ по п.15 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 15, в котором топливная соль включает одну или несколько из следующих делящихся солей: UF_6 , UF_4 , UF_3 , $ThCl_4$, UBr_3 , UBr_4 , $PuCl_3$, UCl_4 , UCl_3 , UCl_3F и

UCl_2F_2 .

21. Способ по п.15 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 15, в котором топливная соль включает одну или несколько из следующих не делящихся солей: NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , BaCl_2 , KCl , SrCl_2 , VCl_3 , CrCl_3 , TiCl_4 , ZrCl_4 , ThCl_4 , AcCl_3 , NpCl_4 , AmCl_3 , LaCl_3 , CeCl_3 , PrCl_3 и/или NdCl_3 .

22. Способ по п.15 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 15, в котором топливная соль представляет собой смесь UCl_4 , UCl_3 и одного или обоих из NaCl и MgCl_2 .

23. Реактор на расплавленном топливе, содержащий:

верхний отражатель нейтронов, ограничивающий верхнюю часть активной зоны реактора,

нижний отражатель нейтронов, ограничивающий нижнюю часть активной зоны реактора,

по меньшей мере один внутренний отражатель нейтронов, ограничивающий боковые стороны активной зоны реактора,

по меньшей мере один теплообменник, который принимает нагретую топливную соль в свое впускное отверстие для топливной соли, расположенное ниже выпускного отверстия для нагретой топливной соли активной зоны реактора, передает тепло от топливной соли теплоносителю и выпускает охлажденную топливную соль через свое выпускное отверстие для топливной соли, проточно соединенное с впускным отверстием для охлажденной топливной соли активной зоны реактора,

причем указанный по меньшей мере один теплообменник содержит сварной компонент, отделенный от топливной соли одним из следующего: верхним отражателем нейтронов, нижним отражателем нейтронов, внутренним отражателем нейтронов или замедлителем нейтронов.

24. Ядерный реактор по п.23, в котором сварной компонент представляет собой трубную решетку.

25. Ядерный реактор по п.24, в котором сварной компонент представляет собой трубную решетку, через которую теплоноситель выходит из указанного по меньшей мере одного теплообменника, при этом трубная решетка отделена от топливной соли верхним отражателем нейтронов.

26. Ядерный реактор по п.24, в котором сварной компонент

представляет собой трубную решетку, через которую теплоноситель входит в указанный по меньшей мере один теплообменник, при этом трубная решетка отделена от топливной соли нижним отражателем нейтронов.

27. Ядерный реактор по п.24, в котором сварной компонент представляет собой трубную решетку, через которую теплоноситель входит в указанный по меньшей мере один теплообменник и выходит из него.

28. Ядерный реактор по п.27, в котором трубная решетка, через которую теплоноситель входит в указанный по меньшей мере один теплообменник и выходит из него, расположена над активной зоной реактора.

29. Ядерный реактор по п.27 или 28, в котором трубная решетка, через которую теплоноситель входит в указанный по меньшей мере один теплообменник и выходит из него, отделена от топливной соли верхним отражателем нейтронов.

30. Ядерный реактор по п.27 или 28, в котором трубная решетка, через которую теплоноситель входит в указанный по меньшей мере один теплообменник и выходит из него, отделена от топливной соли поглотителем нейтронов.

31. Реактор радиального петлевого типа на расплавленной соли, содержащий:

защитный корпус активной зоны реактора,

один или несколько отражателей, установленных в защитных корпусах активной зоны реактора, причем указанный один или несколько отражателей ограничивают объем активной зоны реактора в защитном корпусе активной зоны реактора, и

множество плеч теплообменника, которые отделены друг от друга снаружи защитного корпуса активной зоны реактора и каждое из которых имеет выпускную трубу реактора, выполненную с возможностью приема нагретой топливной соли из объема активной зоны реактора, теплообменник, который переносит тепло от нагретой топливной соли первичному теплоносителю, создавая, тем самым, охлажденную топливную соль, и впускную трубу реактора, выполненную с возможностью возврата охлажденной топливной соли в объем активной зоны реактора.

32. Реактор по п.31, дополнительно содержащий делимую топливную

соль в объеме активной зоны реактора.

33. Реактор по п.30 или 31, также содержащий вторичный защитный корпус, вмещающий защитный корпус активной зоны реактора и указанное множество плеч теплообменника, причем вторичный защитный корпус ограничивает объем, достаточный для удерживания по меньшей мере всей топливной соли, содержащейся в защитном корпусе активной зоны реактора и в указанном множестве плеч теплоносителя.

34. Реактор по п.30 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 30, также содержащий по меньшей мере одну крыльчатку в по меньшей мере одном из указанного множества плеч теплообменника, выполненную с возможностью подачи потока топливной соли через указанное по меньшей мере одно из множества плеч теплообменника.

35. Реактор по п.30 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 30, также содержащий крыльчатку в каждом из указанного множества плеч теплообменника, выполненную с возможностью подачи потока топливной соли через плечо теплообменника.

36. Реактор по п.30 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 30, в котором теплообменник представляет собой кожухотрубный теплообменник.

37. Реактор по п.36, в котором первичный теплоноситель циркулирует через межтрубное пространство теплообменника.

38. Реактор по п.36, в котором топливная соль циркулирует через межтрубное пространство теплообменника.

39. Реактор по п.30 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 30, в котором топливная соль включает одну или несколько из следующих делящихся солей: UF_6 , UF_4 , UF_3 , $ThCl_4$, UBr_3 , UBr_4 , $PuCl_3$, UCl_4 , UCl_3 , UCl_3F и UCl_2F_2 .

40. Реактор по п.30 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 30, в котором топливная соль включает одну или несколько из следующих не делящихся солей: $NaCl$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $BaCl_2$, KCl , $SrCl_2$, VCl_3 , $CrCl_3$, $TiCl_4$, $ZrCl_4$, $ThCl_4$, $AcCl_3$, $NpCl_4$, $AmCl_3$, $LaCl_3$, $CeCl_3$, $PrCl_3$ и/или $NdCl_3$.

41. Реактор по п.30 или по любым пунктам, которые зависят от пункта 30, в котором топливная соль представляет собой смесь UCl_4 , UCl_3 и одного

или обоих из NaCl и MgCl₂.

[0081] Очевидно, что описанные здесь системы и способы хорошо адаптированы для достижения упомянутых целей и преимуществ, а также им присущих. Специалисты в данной области техники поймут, что способы и системы в этом описании могут быть реализованы многими способами и, как таковые, не должны ограничиваться приведенными выше иллюстративными вариантами выполнения и примерами. В этом отношении любое количество признаков различных вариантов выполнения, описанных здесь, может быть объединено в один вариант выполнения, при этом возможны альтернативные варианты выполнения, имеющие меньшее или большее количество признаков, чем признаки, описанные в настоящем документе.

[0082] Несмотря на то, что различные варианты выполнения были описаны для целей настоящего описания, могут быть сделаны различные изменения и модификации, которые находятся в пределах объема, предусмотренного настоящим описанием.

[0083] Могут быть сделаны многочисленные другие изменения, которые будут понятны специалистам и которые охватываются сущностью изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Ядерный реактор на расплавленной соли, содержащий:

активную зону, имеющую в целом форму усеченной фигуры, содержащую делимую топливную соль и имеющую выпускное отверстие для нагретой топливной соли, впускное отверстие для охлажденной топливной соли и тепловой центр, расположенный над впускным отверстием для охлажденной топливной соли, и

по меньшей мере один теплообменник, который принимает нагретую топливную соль через свое впускное отверстие для топливной соли, расположенное ниже выпускного отверстия для нагретой топливной соли активной зоны реактора, передает тепло от топливной соли теплоносителю и выпускает охлажденную топливную соль через свое выпускное отверстие для топливной соли, соединенное с впускным отверстием для охлажденной топливной соли активной зоны реактора,

причем тепловой центр активной зоны реактора находится на уровне ниже выпускного отверстия для топливной соли теплообменника, и

при этом расположение теплового центра вызывает естественную циркуляцию в случае потери принудительного потока, когда реактор находится в критическом состоянии.

2. Ядерный реактор по п.1, в котором активная зона реактора имеет глубину, которая представляет собой расстояние между верхним уровнем топливной соли в активной зоне реактора и нижней частью топливной соли в активной зоне реактора, причем в реакторе соотношение расстояния теплового центра вниз от выпускного отверстия для топливной соли теплообменника и глубины активной зоны реактора в тепловом центре составляет от 0,1 до 0,45.

3. Ядерный реактор по п.1 или 2, в котором форма активной зоны реактора выбрана из усеченного конуса, усеченной пирамиды, трапецеидальной призмы или гиперboloида.

4. Ядерный реактор по п.1, содержащий защитный корпус, содержащий активную зону реактора и указанный по меньшей мере один теплообменник.

5. Ядерный реактор по п.1, содержащий по меньшей мере одну крыльчатку, приводимую в действие двигателем, причем крыльчатка расположена в канале между впускным отверстием для топливной соли

теплообменника и выпускным отверстием для нагретой топливной соли активной зоны реактора и выполнена с возможностью подачи потока топливной соли в теплообменник.

6. Ядерный реактор по п.1, в котором расположение теплового центра вызывает естественную циркуляцию в случае потери принудительного потока, когда реактор находится в состоянии докритичности.

7. Ядерный реактор по п.1, содержащий по меньшей мере одну направляющую поток перегородку, выполненную с возможностью направления потока топливной соли между активной зоной реактора и указанным по меньшей мере одним теплообменником.

8. Ядерный реактор по п.1, содержащий верхний отражатель нейтронов, ограничивающий верхнюю часть активной зоны реактора, нижний отражатель нейтронов, ограничивающий нижнюю часть активной зоны реактора, и по меньшей мере один внутренний отражатель нейтронов, ограничивающий стороны активной зоны реактора, причем указанный по меньшей мере один внутренний отражатель нейтронов находится между указанным по меньшей мере одним теплообменником и активной зоной реактора.

9. Ядерный реактор по п.8, в котором выпускное отверстие для нагретой топливной соли активной зоны реактора представляет собой проход между верхним отражателем нейтронов и указанным по меньшей мере одним внутренним отражателем нейтронов.

10. Ядерный реактор по п.8 или 9, в котором впускное отверстие для охлажденной топливной соли активной зоны реактора представляет собой проход между нижним отражателем нейтронов и указанным по меньшей мере одним внутренним отражателем нейтронов.

11. Ядерный реактор по п.1, в котором указанный по меньшей мере один теплообменник представляет собой кожухотрубный теплообменник, в котором топливная соль протекает по его трубкам.

12. Ядерный реактор по п.1, 2, 3-9 или 11, в котором указанный по меньшей мере один теплообменник представляет собой кожухотрубный теплообменник, в котором топливная соль протекает через его корпус.

13. Ядерный реактор по п.4, в котором поступающий охлажденный

теплоноситель охлаждает первую часть защитного корпуса до того, как теплоноситель втекает в указанный по меньшей мере один теплообменник.

14. Ядерный реактор по п.4, в котором охлажденная топливная соль, выпускаемая из выпускного отверстия для топливной соли теплообменника, охлаждает вторую часть защитного корпуса перед поступлением в активную зону реактора через впускное отверстие для охлажденной топливной соли активной зоны реактора.

15. Способ активного охлаждения защитного корпуса и топливной соли в ядерном реакторе на расплавленной топливной соли, включающий:

обеспечение протекания первичного теплоносителя в защитный корпус вблизи первой части защитного корпуса, охлаждая, тем самым, указанную первую часть,

обеспечение протекания первичного теплоносителя в теплообменник, находящийся внутри защитного корпуса и на расстоянии от него, причем теплообменник выпускает охлажденную топливную соль,

перенаправление выпускаемой охлажденной топливной соли через канал вблизи второй части защитного корпуса, охлаждая, тем самым, указанную вторую часть, и

перенаправление охлажденной топливной соли через канал вблизи отражателя нейтронов, охлаждая, тем самым, отражатель нейтронов,

причем охлажденный отражатель нейтронов расположен смежно с третьей частью защитного корпуса, так что охлаждение отражателя нейтронов опосредованно охлаждает указанную третью часть.

16. Способ по п.15, в котором при обеспечении протекания первичного теплоносителя в защитный корпус также пропускают теплоноситель через впускной проход для теплоносителя внутри защитного корпуса, термически соединенный с первой частью защитного корпуса.

17. Способ по п.15 или 16, в котором при обеспечении протекания первичного теплоносителя в защитный корпус также пропускают теплоноситель через впускной проход для теплоносителя внутри защитного корпуса к впускному отверстию для теплоносителя теплообменника, расположенному смежно с выпускным отверстием для охлажденной топливной соли теплообменника.

18. Способ по п.15 или 16, в котором при обеспечении протекания первичного теплоносителя в защитный корпус также пропускают теплоноситель через впускной проход для теплоносителя внутри защитного корпуса, термически соединенный с первой частью защитного корпуса.

19. Способ по п.15 или 16, в котором топливная соль представляет собой смесь по меньшей мере одной делящейся соли и по меньшей мере одной не делящейся соли.

20. Способ по п.15 или 16, в котором топливная соль включает одну или несколько из следующих делящихся солей: UF_6 , UF_4 , UF_3 , $ThCl_4$, UBr_3 , UBr_4 , $PuCl_3$, UCl_4 , UCl_3 , UCl_3F и UCl_2F_2 .

21. Способ по п.15 или 16, в котором топливная соль включает одну или несколько из следующих не делящихся солей: $NaCl$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $BaCl_2$, KCl , $SrCl_2$, VCl_3 , $CrCl_3$, $TiCl_4$, $ZrCl_4$, $ThCl_4$, $AcCl_3$, $NpCl_4$, $AmCl_3$, $LaCl_3$, $CeCl_3$, $PrCl_3$ и/или $NdCl_3$.

22. Способ по п.15 или 16, в котором топливная соль представляет собой смесь UCl_4 , UCl_3 и одного или обоих из $NaCl$ и $MgCl_2$.

23. Реактор на расплавленном топливе, содержащий:

верхний отражатель нейтронов, ограничивающий верхнюю часть активной зоны реактора,

нижний отражатель нейтронов, ограничивающий нижнюю часть активной зоны реактора,

по меньшей мере один внутренний отражатель нейтронов, ограничивающий боковые стороны активной зоны реактора, и

по меньшей мере один теплообменник, который принимает нагретую топливную соль через свое впускное отверстие для топливной соли, расположенное ниже выпускного отверстия для нагретой топливной соли активной зоны реактора, передает тепло от топливной соли теплоносителю и выпускает охлажденную топливную соль через свое выпускное отверстие для топливной соли, проточно соединенное с впускным отверстием для охлажденной топливной соли активной зоны реактора,

причем указанный по меньшей мере один теплообменник содержит сварной компонент, отделенный от топливной соли одним из следующего: верхним отражателем нейтронов, нижним отражателем нейтронов,

внутренним отражателем нейтронов или замедлителем нейтронов.

24. Ядерный реактор по п.23, в котором сварной компонент представляет собой трубную решетку.

25. Ядерный реактор по п.24, в котором сварной компонент представляет собой трубную решетку, через которую теплоноситель выходит из указанного по меньшей мере одного теплообменника, при этом трубная решетка отделена от топливной соли верхним отражателем нейтронов.

26. Ядерный реактор по п.24, в котором сварной компонент представляет собой трубную решетку, через которую теплоноситель входит в указанный по меньшей мере один теплообменник, при этом трубная решетка отделена от топливной соли нижним отражателем нейтронов.

27. Ядерный реактор по п.24, в котором сварной компонент представляет собой трубную решетку, через которую теплоноситель входит в указанный по меньшей мере один теплообменник и выходит из него.

28. Ядерный реактор по п.27, в котором трубная решетка, через которую теплоноситель входит в указанный по меньшей мере один теплообменник и выходит из него, расположена над активной зоной реактора.

29. Ядерный реактор по п.27 или 28, в котором трубная решетка, через которую теплоноситель входит в указанный по меньшей мере один теплообменник и выходит из него, отделена от топливной соли верхним отражателем нейтронов.

30. Ядерный реактор по п.27 или 28, в котором трубная решетка, через которую теплоноситель входит в указанный по меньшей мере один теплообменник и выходит из него, отделена от топливной соли поглотителем нейтронов.

31. Реактор радиального петлевого типа на расплавленной соли, содержащий:

защитный корпус активной зоны реактора,

один или несколько отражателей, установленных в защитных корпусах активной зоны реактора, причем указанный один или несколько отражателей ограничивают объем активной зоны реактора в защитном корпусе активной зоны реактора, и

множество плеч теплообменника, которые отделены друг от друга

снаружи защитного корпуса активной зоны реактора и каждое из которых имеет выпускную трубу реактора, выполненную с возможностью приема нагретой топливной соли из объема активной зоны реактора, теплообменник, который переносит тепло от нагретой топливной соли первичному теплоносителю, создавая, тем самым, охлажденную топливную соль, и выпускную трубу реактора, выполненную с возможностью возврата охлажденной топливной соли в объем активной зоны реактора.

32. Реактор по п.31, дополнительно содержащий делимую топливную соль в объеме активной зоны реактора.

33. Реактор по п.30 или 31, содержащий вторичный защитный корпус, вмещающий защитный корпус активной зоны реактора и указанное множество плеч теплообменника, причем вторичный защитный корпус ограничивает объем, достаточный для удерживания по меньшей мере всей топливной соли, содержащейся в защитном корпусе активной зоны реактора и в указанном множестве плеч теплоносителя.

34. Реактор по п.30 или 31, содержащий по меньшей мере одну крыльчатку в по меньшей мере одном из указанного множества плеч теплообменника, выполненную с возможностью подачи потока топливной соли через указанное по меньшей мере одно из множества плеч теплообменника.

35. Реактор по п.30 или 31, содержащий крыльчатку в каждом из указанного множества плеч теплообменника, выполненную с возможностью подачи потока топливной соли через плечо теплообменника.

36. Реактор по п.30 или 31, в котором теплообменник представляет собой кожухотрубный теплообменник.

37. Реактор по п.36, в котором первичный теплоноситель циркулирует через межтрубное пространство теплообменника.

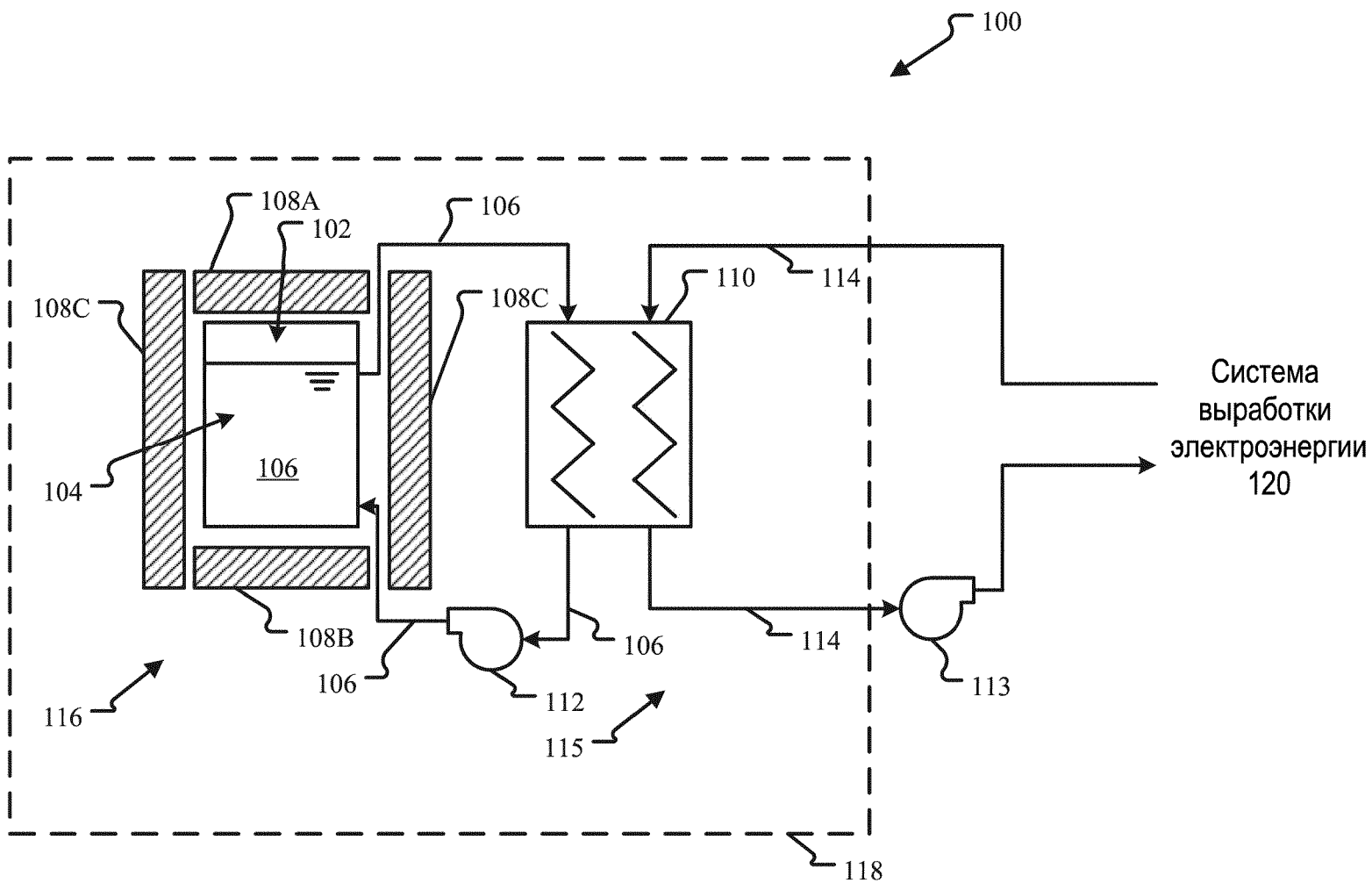
38. Реактор по п.36, в котором топливная соль циркулирует через межтрубное пространство теплообменника.

39. Реактор по п.30, в котором топливная соль включает одну или несколько из следующих делящихся солей: UF_6 , UF_4 , UF_3 , ThCl_4 , UBr_3 , UBr_4 , PuCl_3 , UCl_4 , UCl_3 , UCl_3F и UCl_2F_2 .

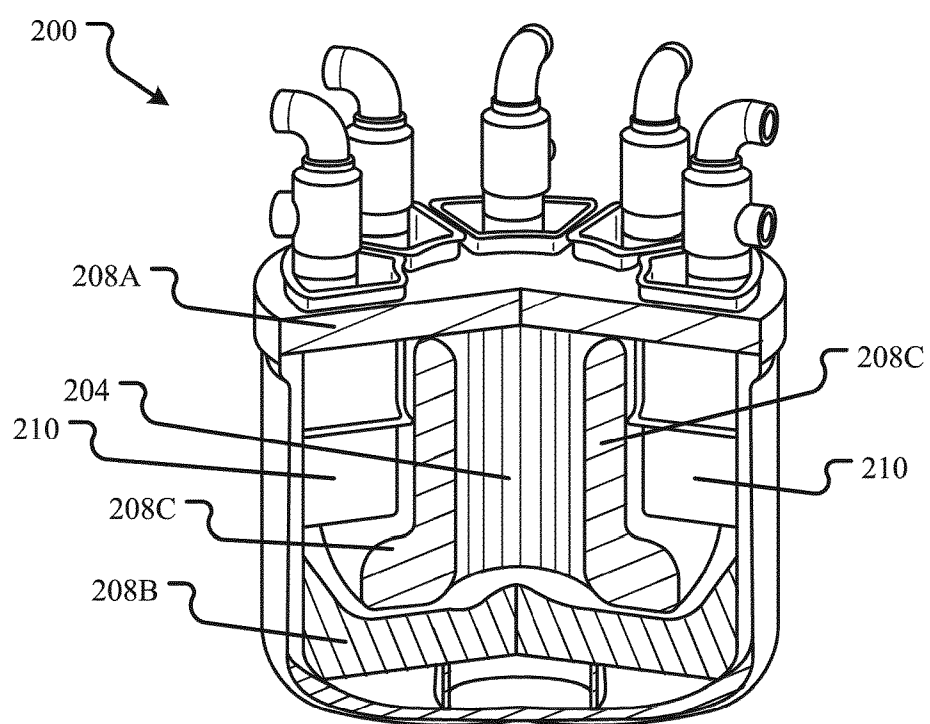
40. Реактор по п.30, в котором топливная соль включает одну или

несколько из следующих не делящихся солей: NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , BaCl_2 , KCl , SrCl_2 , VCl_3 , CrCl_3 , TiCl_4 , ZrCl_4 , ThCl_4 , AcCl_3 , NpCl_4 , AmCl_3 , LaCl_3 , CeCl_3 , PrCl_3 и/или NdCl_3 .

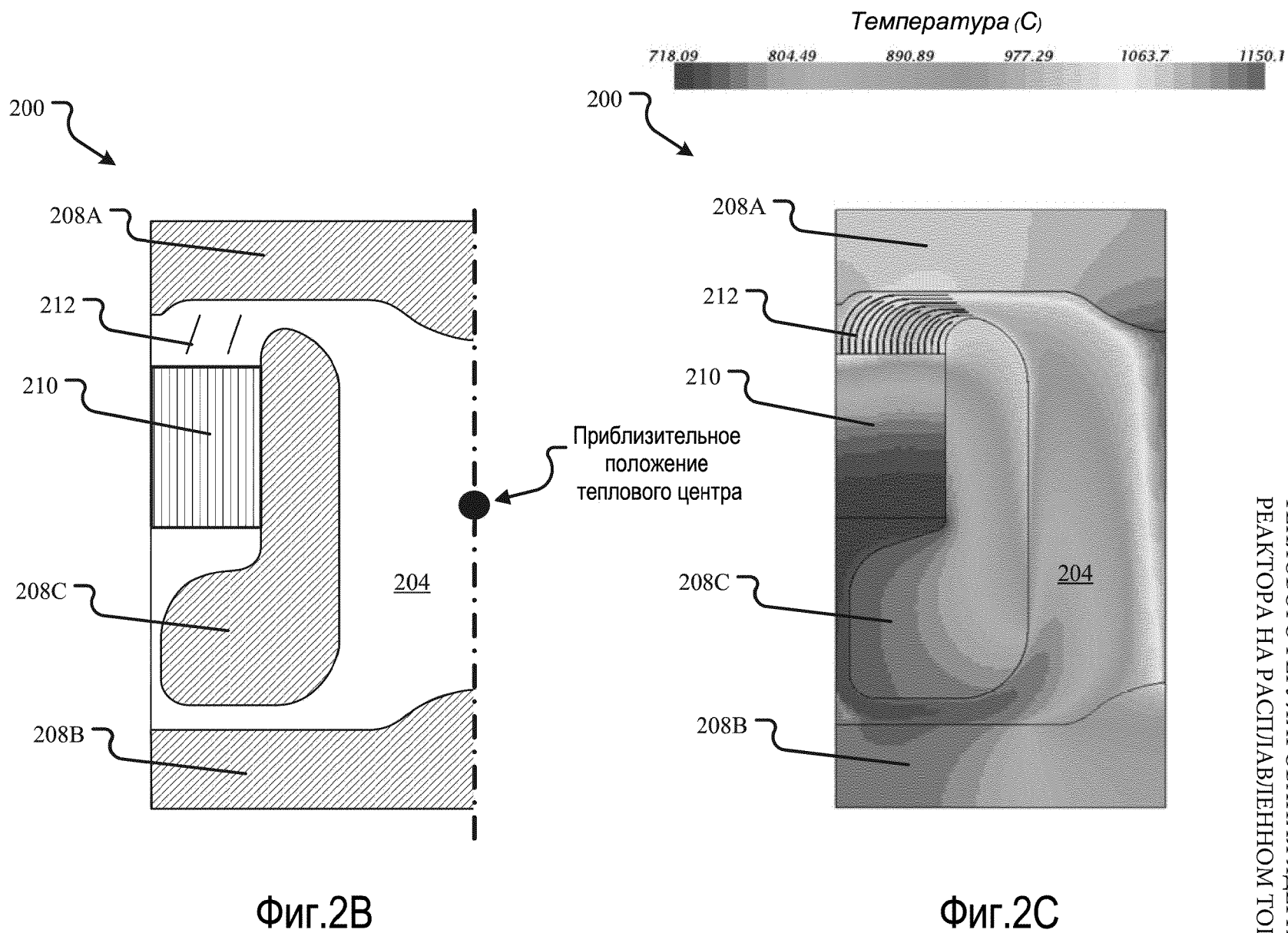
41. Реактор по п.30, в котором топливная соль представляет собой смесь UCl_4 , UCl_3 и одного или обоих из NaCl и MgCl_2 .



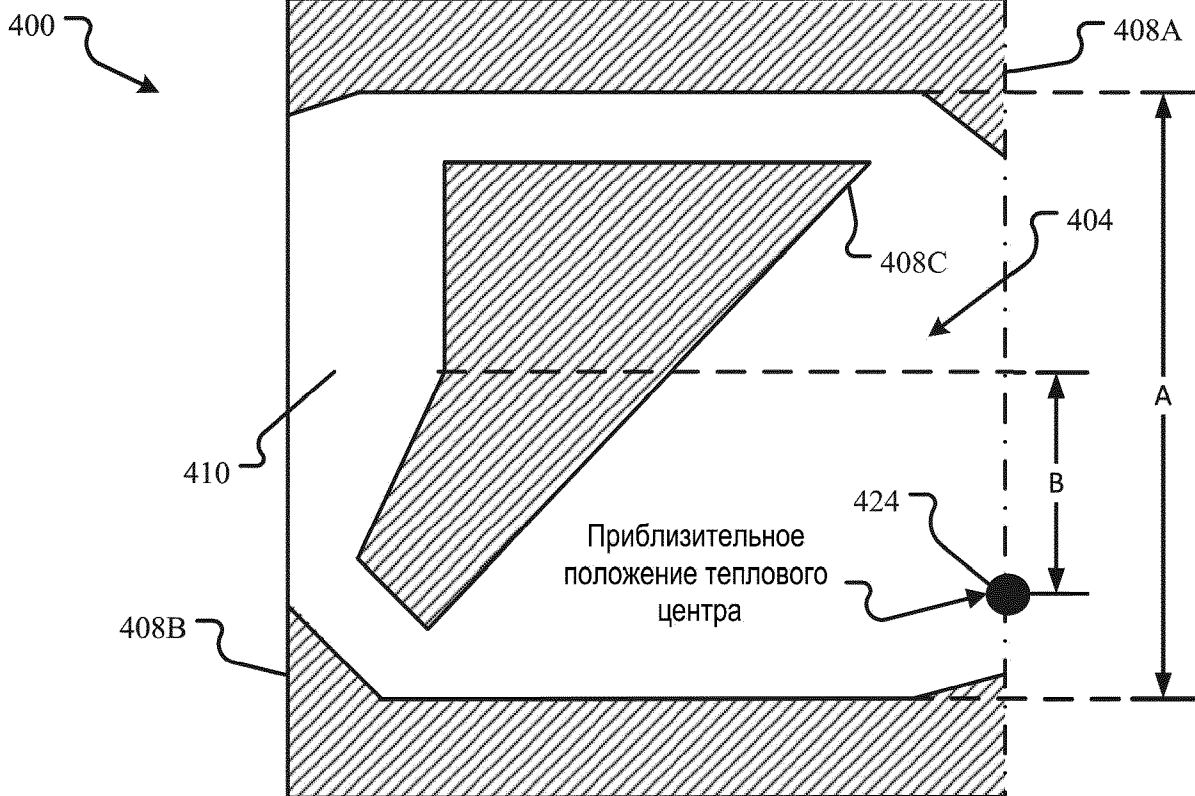
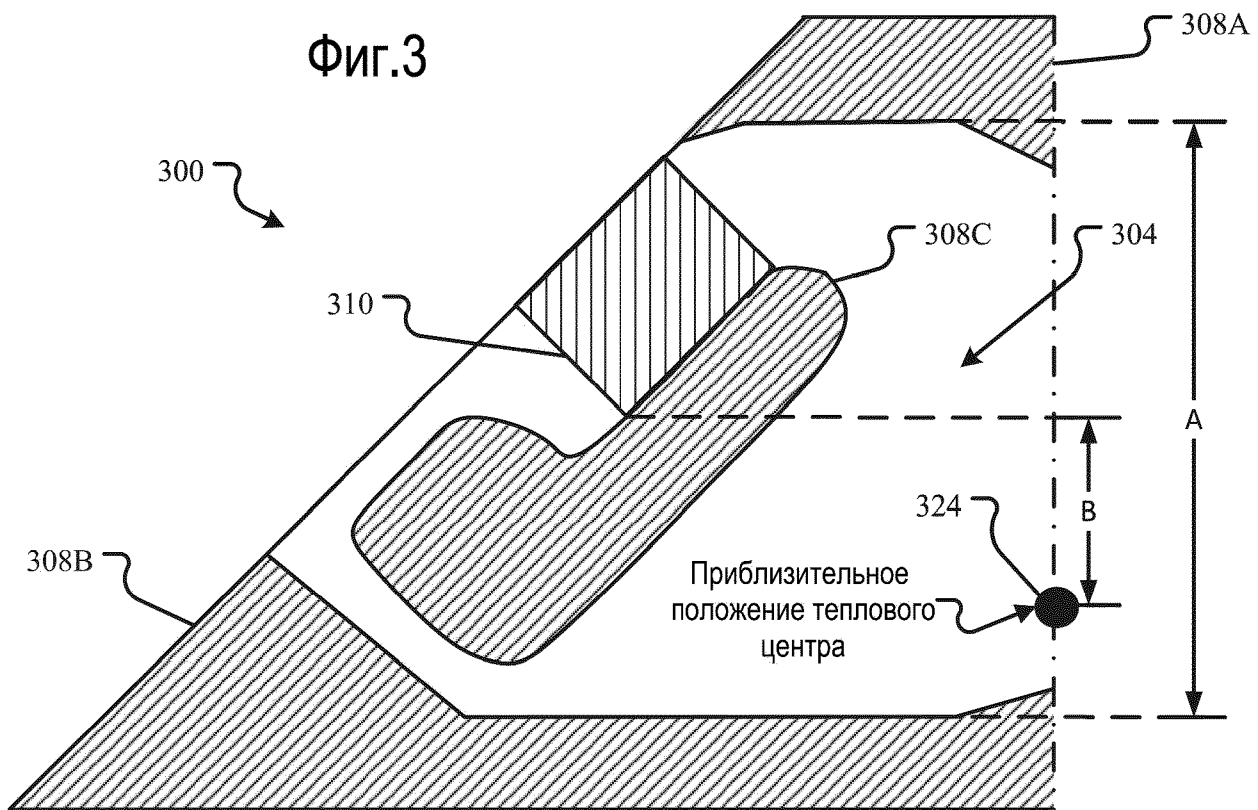
Фиг.1



Фиг.2А



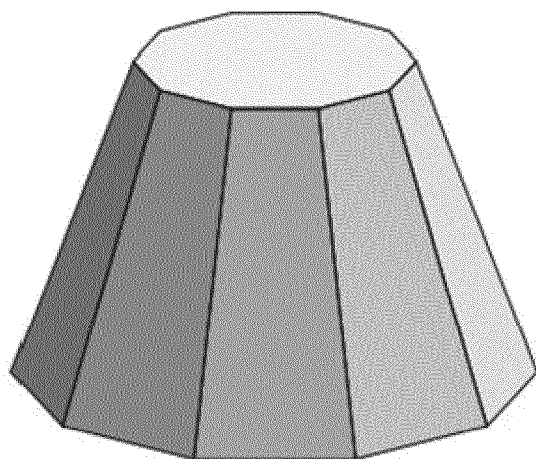
Фиг.3



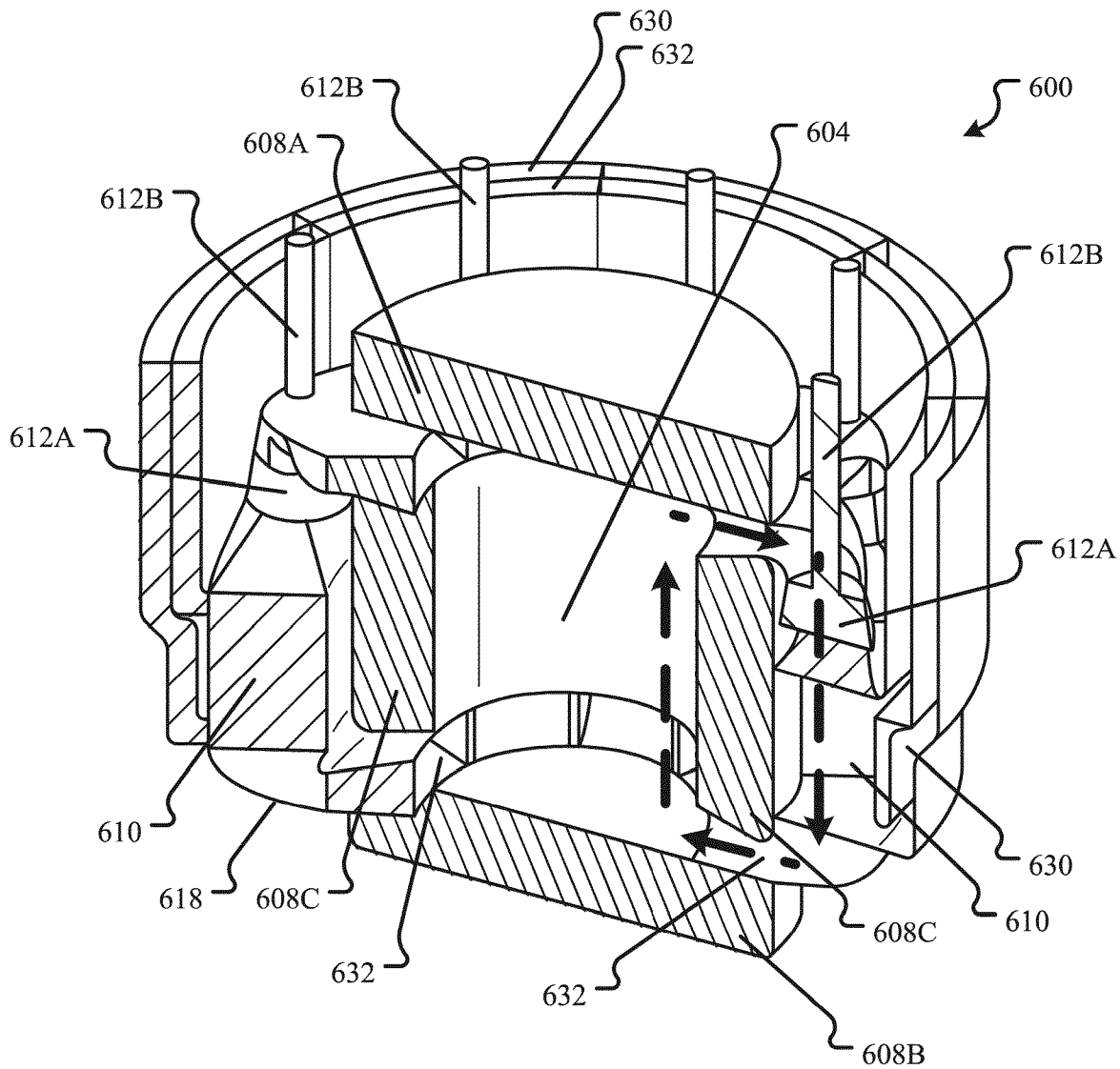
Фиг.4

5/13

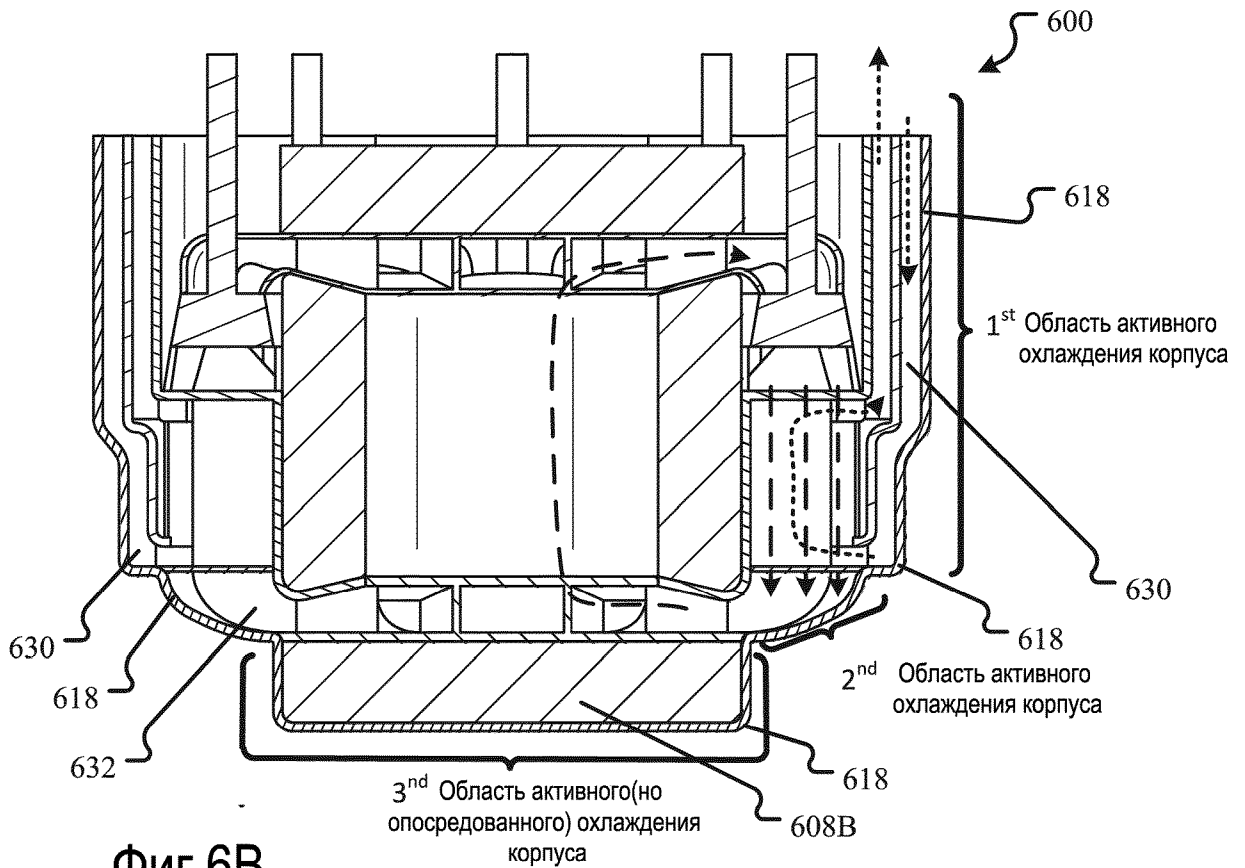
УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ КОНФИГУРАЦИЯ
ТЕПЛОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНОГО
РЕАКТОРА НА РАСПЛАВЛЕННОМ ТОПЛИВЕ



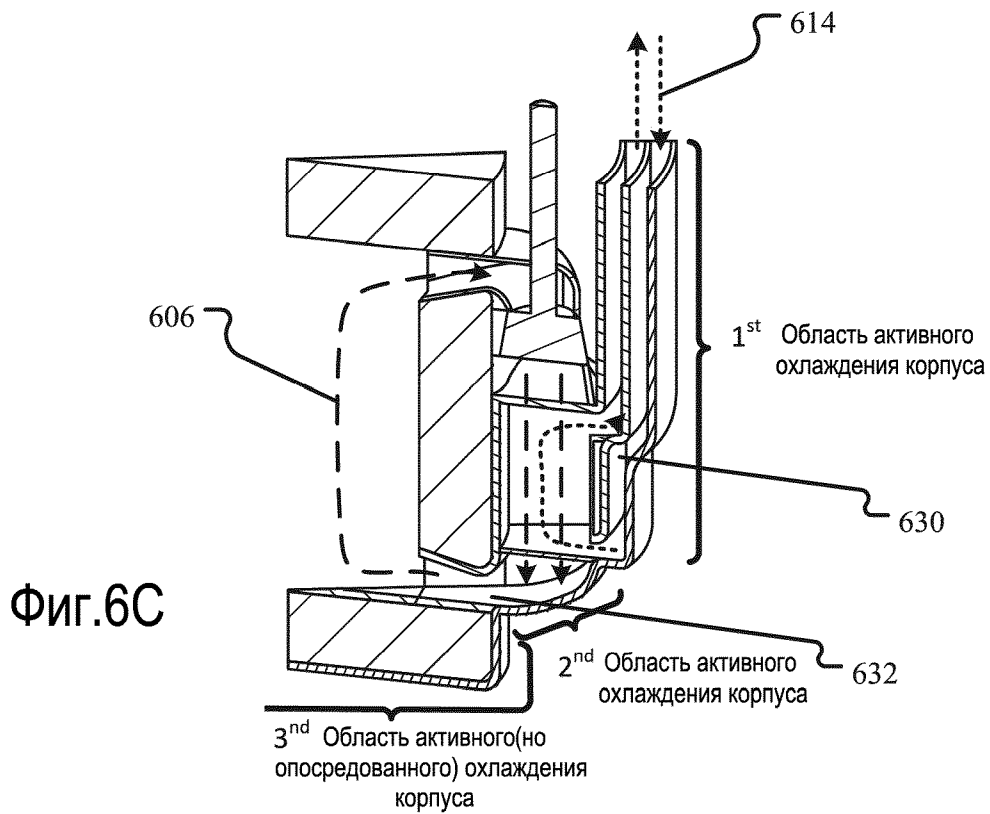
Фиг.5



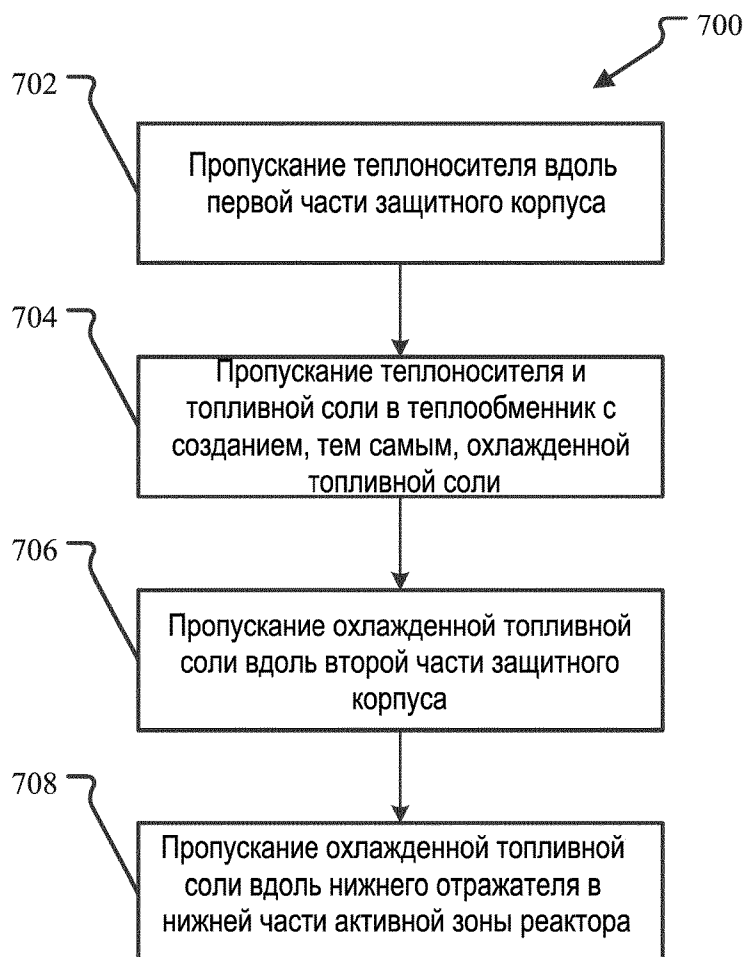
Фиг.6А



Фиг.6В

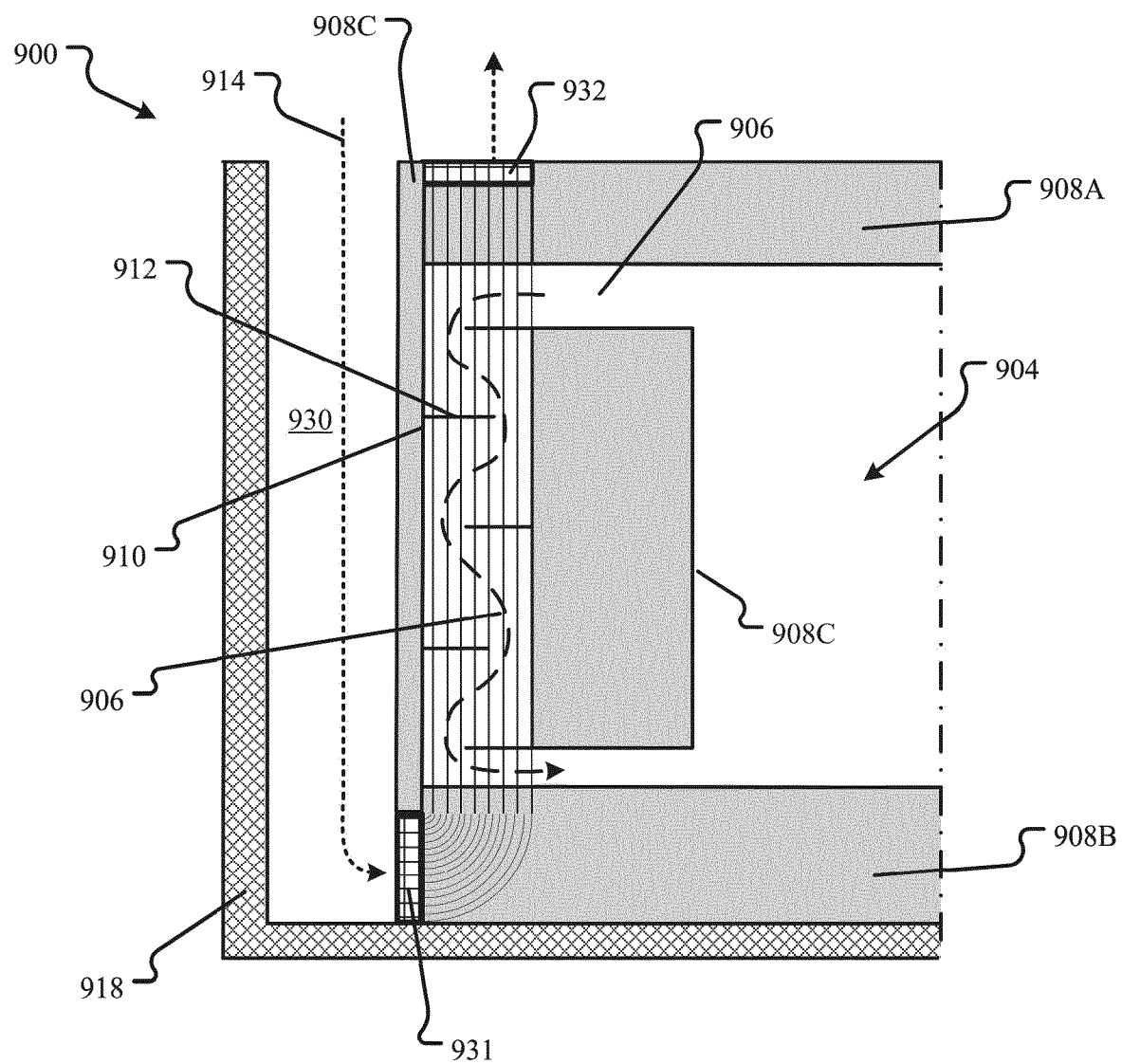


Фиг.6С

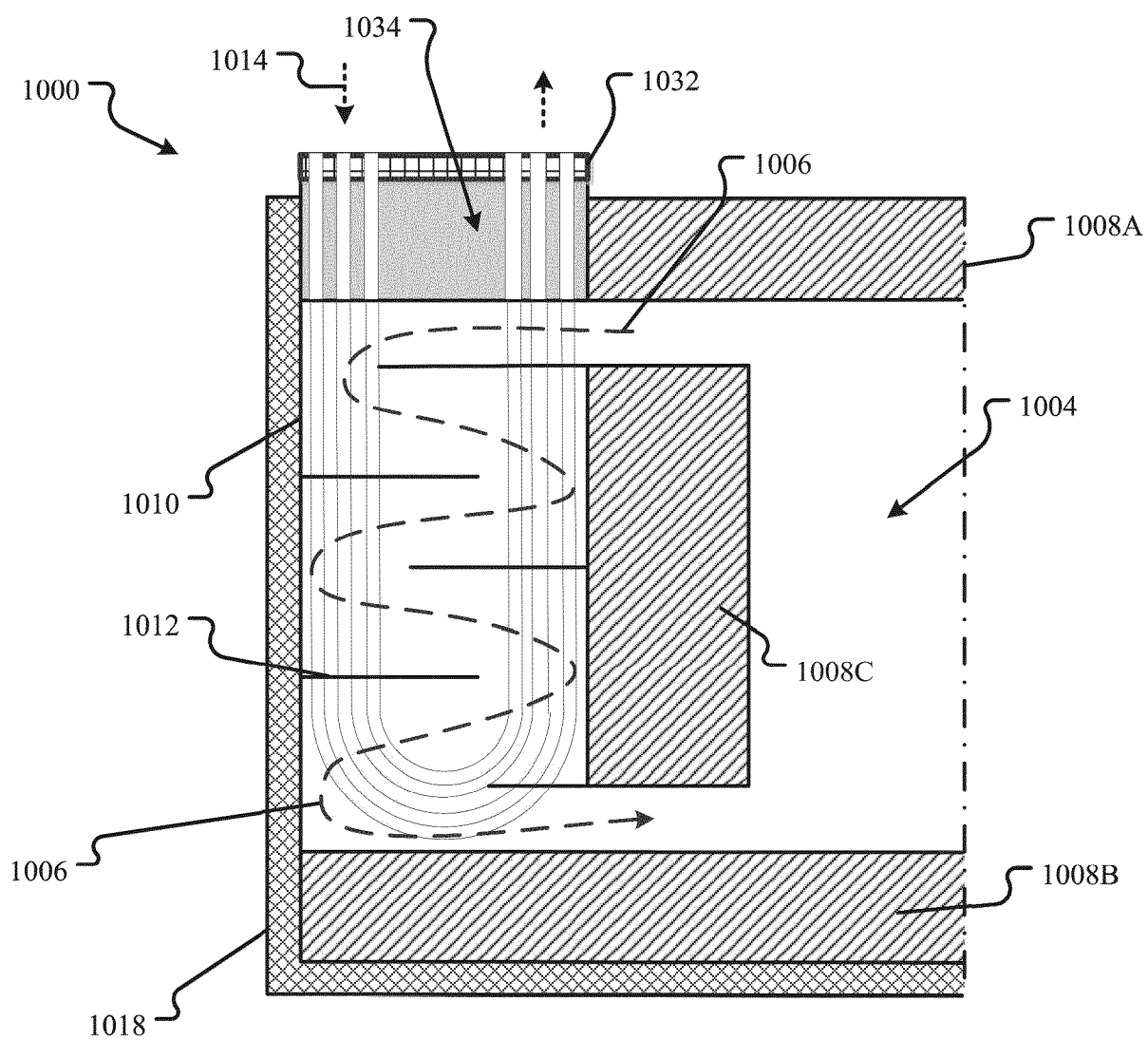


Фиг.7

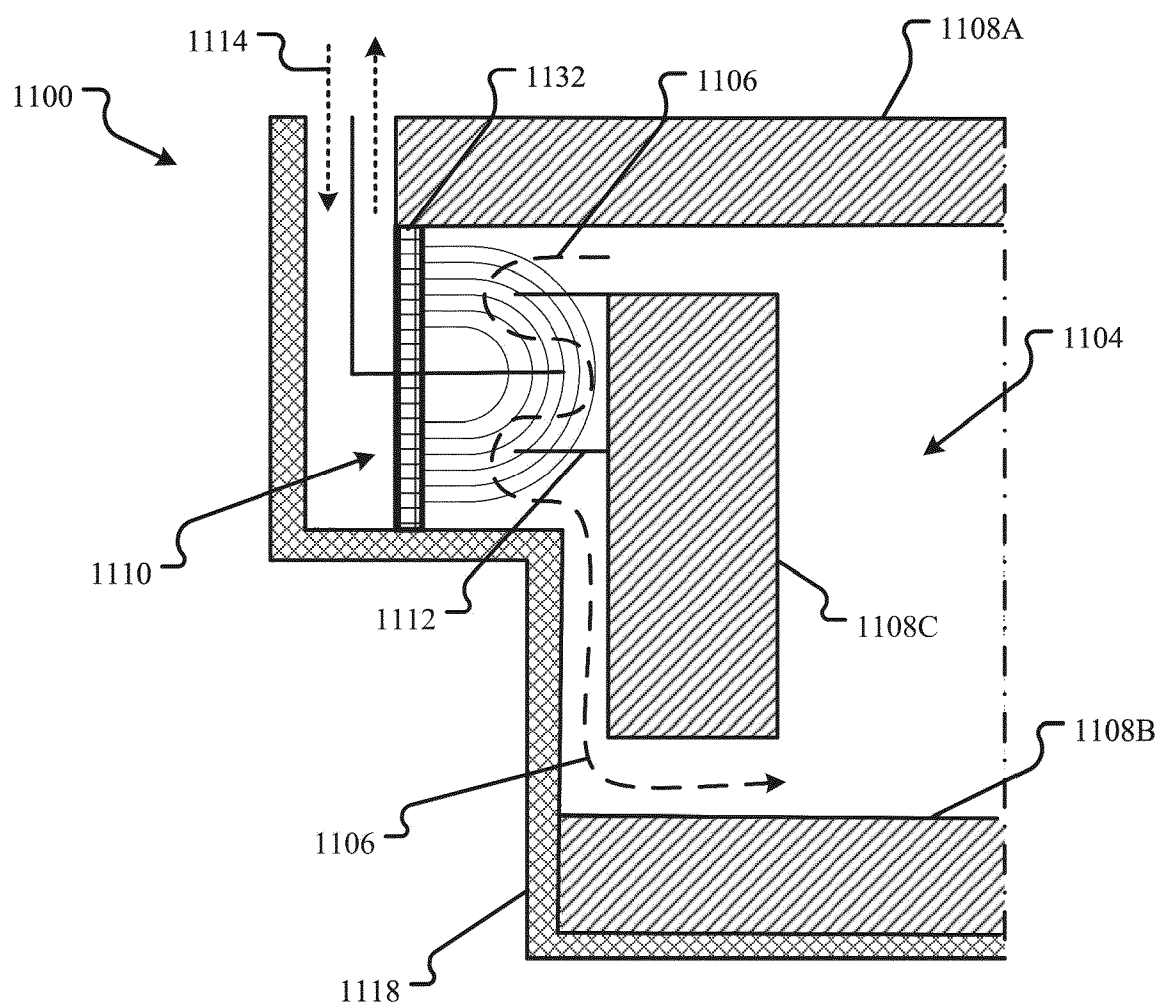




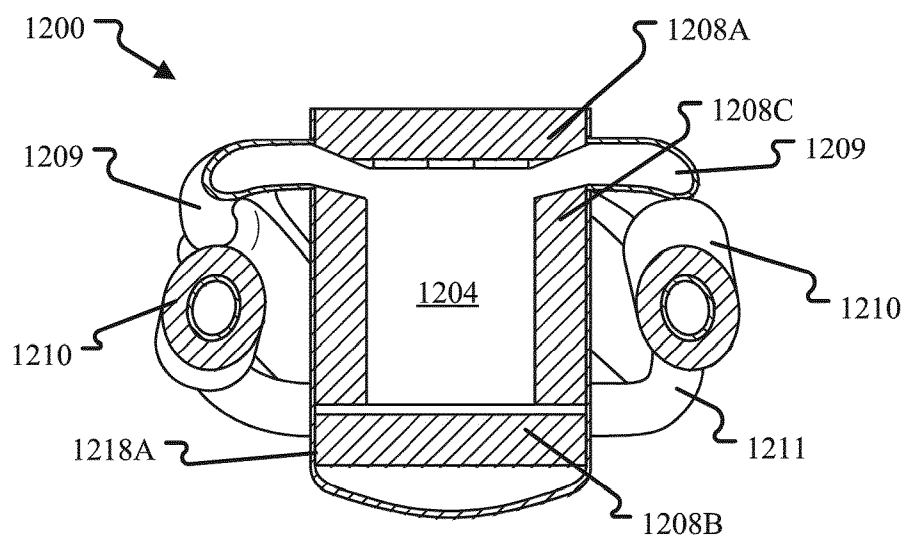
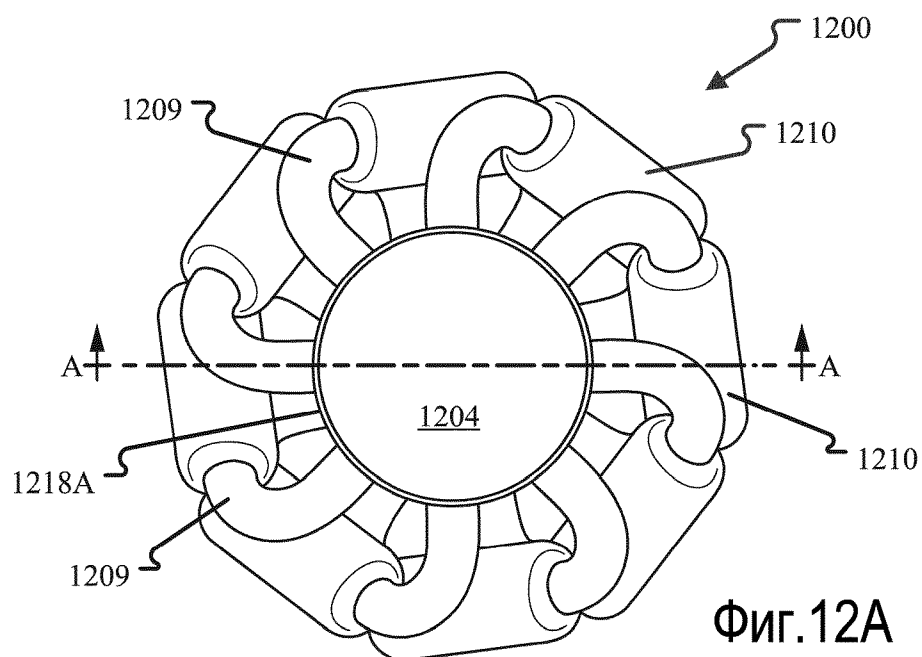
Фиг.9



Фиг.10



Фиг.11



Фиг.12В