

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **037791**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.05.21

(21) Номер заявки
201892178

(22) Дата подачи заявки
2017.05.02

(51) Int. Cl. *G21C 1/22* (2006.01)
G21C 3/24 (2006.01)
G21C 3/54 (2006.01)

(54) ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР НА РАСПЛАВЛЕННОМ ТОПЛИВЕ С ОТРАЖАЮЩИМ НЕЙТРОНЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

(31) 62/330,726

(32) 2016.05.02

(33) US

(43) 2019.05.31

(86) PCT/US2017/030666

(87) WO 2017/192607 2017.11.09

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ТЕРРАПАУЭР, ЭлЭлСи (US)

(56) US-A-2874106
US-A-3136700
US-A-3383285

(72) Изобретатель:

Читэм Джесси Р. Третий, Червински
Кен, Эль-Дашер Бассем С., Керлин
Уилльям М., Петроски Роберт К.,
Уолтер Джошуа К., Эббот Райан, мл.,
Сиснерос Ансельмо Т., мл., Флауэрс
Дэн, 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., Игнатъев
А.В. (RU)

(57) Описаны конфигурации реакторов на расплавленной топливной соли, в которых используются отражающие нейтроны теплоносители или комбинация первичных соляных теплоносителей и вторичных отражающих нейтроны теплоносителей. Описаны также другие конфигурации, в которых циркулируют жидкий отражающий нейтроны материал вокруг активной зоны реактора для управления нейтронно-физических характеристик реактора. Кроме того, описываются конфигурации, в которых для активного охлаждения защитной оболочки реактора используется циркулирующий отражающий нейтроны материал.

B1**037791****037791****B1**

Настоящая заявка подана 2 мая 2017 г. в качестве международной патентной заявки (РСТ), причем приоритет этой заявки заявляется по дате подачи предварительной заявки на патент США № 62/332726 под названием "Усовершенствованные конфигурации реактора на расплавленном топливе", поданной 2 мая 2016 г.

Введение.

Специальная классификация быстрого ядерного реактора, называемая "быстрым реактором-самоедом", включает ядерный реактор, способный генерировать больше делящегося ядерного топлива, чем он потребляет. То есть баланс нейтронов достаточно высок, чтобы воспроизводить больше делящегося ядерного топлива (например, плутония-239) из сырья для воспроизводства топлива ядерного реактора (например, урана-238), чем сгорает в реакции деления. В принципе, реактор-самоед может приближаться к скорости извлечения энергии в 100% воспроизводящего материала. Для начала процесса воспроизводства в реактор-самоед сначала должно быть загружено некоторое количество делящегося топлива, такого как обогащенный уран. После этого реакторы-самоеды могут поддерживать производство энергии в течение десятилетий, не требуя заправки и без сопутствующих рисков распространения, присутствующих традиционными ядерным реакторам.

Один тип реактора-самоеда представляет собой реактор на расплавленных солях (MSR). Реакторы на расплавленных солях представляют собой класс реакторов ядерного деления с нейтронами быстрого спектра (быстрыми нейтронами), в которых топливо представляет собой расплавленную солевую жидкость, содержащую смешанное или растворенное ядерное топливо, такое как уран или другие делящиеся элементы. В системе MSR незамедленные быстрые нейтроны, обеспечиваемые солями топлива, обеспечивают хорошие показатели воспроизводства с использованием урано-плутониевого топливного цикла. В отличие от быстрых нейтронов, которые контролируют воспроизводство делящегося топлива из сырья для воспроизводства топлива, тепловые нейтроны контролируют реакцию деления делящегося топлива. Реакция деления, возникающая в результате столкновения теплового нейтрона с нуклидом, может поглощать делящееся топливо в реакции деления, высвобождая быстрые нейтроны, гамма-лучи, большие количества тепловой энергии и удаляя продукты деления, такие как более мелкие элементы ядер. Потребление ядерного топлива упоминается как выгорание или использование топлива. Более высокое выгорание обычно уменьшает количество ядерных отходов, оставшихся после прекращения реакции ядерного деления. Быстрые нейтроны также смягчают отравление ядерного реактора продуктами деления, обеспечивая исключительную производительность без онлайн-регенерации и сопутствующих рисков распространения. Поэтому конструктивные и эксплуатационные параметры (например, компактная конструкция, низкое давление, высокие температуры, высокая плотность мощности) MSR реактора-самоеда обеспечивают возможность рентабельного, глобально масштабируемого решения для получения безуглеродной энергии.

Ядерный реактор на расплавленном топливе с отражающим нейтроны теплоносителем.

Во время работы системы MSR обмен топлива в виде расплавленной соли может обеспечить некоторый контроль реакционной способности и воспроизводства в активной зоне реактора в пределах требуемых рабочих границ путем изменения состава циркулирующего топлива в виде расплавленной соли. В некоторых вариантах выполнения активная зона реактора полностью или частично помещена в сборку отражателя нейтронов, содержащий отражающий нейтроны материал. Раскрытая сборка динамического отражателя нейтронов обеспечивает возможность дополнительного динамического и/или ступенчатого управления реактивностью и скоростью воспроизводства путем регулирования отражательных характеристик сборки отражателя нейтронов для управления спектром нейтронов в активной зоне реактора. Такое управление контролирует реакционную способность и скорость воспроизводства в активной зоне реактора. Состав материалов в сборке динамического отражателя нейтронов может быть изменен путем выборочной установки или удаления материалов, влияющих на спектр нейтронов, таких как нейтронные отражатели, модераторы или поглотители, для динамического управления характеристиками нейтронного спектра, отражающими спектр сборки динамического отражателя нейтронов ("отражательные характеристики"). В качестве альтернативы, эти характеристики отражательной способности могут регулироваться путем изменения температуры, плотности или объема материала в сборке динамического отражателя нейтронов. В некоторых вариантах выполнения сборка динамического отражателя нейтронов может содержать текучий материал отражателя нейтронов, который находится в тепловом контакте с топливом (например, топливом в виде расплавленной соли). Текучий материал отражателя нейтронов может быть выполнен в любой подходящей форме, включая, без ограничения, текучие среды, такие как висмут-свинец, суспензию взвешенных частиц, твердых веществ, таких как порошок, и/или крошку, такую как углеродная крошка. Сборка динамического отражателя нейтронов может выборочно циркулировать или пропускать через сборку один или несколько материалов, поглощающих нейтроны, так что можно выборочно добавлять или удалять из него отражающие материалы. В других вариантах выполнения текучий отражающий нейтроны материал может выделять тепло из топлива в виде расплавленной соли в теплообменнике через первичный или вторичный охлаждающий контур.

Краткое описание чертежей

Фиг. 1 изображает схематический вид иллюстративной сборки отражателя нейтронов в системе быстрого реактора на топливе в виде расплавленной соли.

Фиг. 2 изображает график зависимости отражательной способности от времени в реакторе на топливе в виде расплавленной соли с быстрыми нейтронами одного или нескольких примеров сборки динамического отражателя нейтронов в сравнении с другими конфигурациями сборки отражателя нейтронов.

Фиг. 3 изображает схематический вид иллюстративной сегментированной сборки отражателя нейтронов, окружающего реактор на топливе в виде расплавленной соли с быстрыми нейтронами.

Фиг. 4 иллюстрирует пример ядерного реактора на топливе в виде расплавленной соли, в котором сборка отражателя нейтронов имеет переливной резервуар.

Фиг. 5 изображает схематический вид сверху иллюстративной сборки отражателя нейтронов с множеством гильз.

Фиг. 6 изображает схематический вид сверху иллюстративной сборки отражателя нейтронов с множеством гильз, включая элементы, замедляющие нейтроны.

Фиг. 7 изображает схематический вид сверху иллюстративной активной зоны ядерного реактора на солевом расплаве с быстрыми нейтронами, окруженной сборкой отражателя нейтронов в тепловом сообщении с теплообменниками.

Фиг. 8 изображает схематический вид сверху иллюстративной активной зоны ядерного реактора на солевом расплаве с быстрыми нейтронами, окруженной сборкой отражателя нейтронов, в тепловом сообщении с теплообменниками, включая элементы, замедляющие нейтроны.

Фиг. 9 изображает схематический вид сверху иллюстративной активной зоны ядерного реактора на солевом расплаве с быстрыми нейтронами, окруженной сборкой отражателя нейтронов, в тепловом сообщении с теплообменниками, включая поглощающие нейтроны элементы и элементы объемного смещения.

Фиг. 10 изображает схематический вид сбоку иллюстративной активной зоны ядерного реактора на солевом расплаве с быстрыми нейтронами, окруженной сборкой отражателя нейтронов в тепловом сообщении с ядерным топливом в виде расплавленной соли через кожухотрубный теплообменник.

Фиг. 11 изображает схематический вид сверху вниз иллюстративной активной зоны ядерного реактора на солевом расплаве с быстрыми нейтронами, окруженной сборкой отражателя нейтронов, в тепловом сообщении с расплавленной ядерной топливной солью через кожухотрубный теплообменник.

Фиг. 12 иллюстрирует блок-схему иллюстративного способа динамического смещения спектра в ядерном реакторе на солевом расплаве с быстрыми нейтронами.

Фиг. 13 иллюстрирует блок-схему другого иллюстративного способа динамического смещения спектра в ядерном реакторе на солевом расплаве с быстрыми нейтронами.

Фиг. 14 изображает иллюстрирует блок-схему другого иллюстративного метода динамического смещения спектра в ядерном реакторе на солевом расплаве с быстрыми нейтронами.

Фиг. 15 иллюстрирует блок-схему другого иллюстративного способа динамического смещения спектра в ядерном реакторе на солевом расплаве с быстрыми нейтронами.

Фиг. 16 иллюстрирует блок-схему другого иллюстративного способа динамического смещения спектра в ядерном реакторе на солевом расплаве с быстрыми нейтронами.

Фиг. 17 изображает схематический вид сверху вниз иллюстративной сборки отражателя нейтронов с множеством гильз и сборкой статического отражателя нейтронов.

Фиг. 18 изображает схематический вид сверху вниз иллюстративной активной зоны ядерного реактора на солевом расплаве с быстрыми нейтронами, окруженной сборкой отражателя нейтронов, содержащим внутренний кольцевой канал и наружный кольцевой канал и также содержащим элементы объемного смещения.

Фиг. 19 изображает схематический вид сверху вниз иллюстративной активной зоны ядерного реактора на солевом расплаве с быстрыми нейтронами, окруженной сборкой отражателя нейтронов, включающим в себя внутренний кольцевой канал и наружный кольцевой канал.

Фиг. 20 изображает схематический вид сверху вниз иллюстративной активной зоны ядерного реактора на солевом расплаве с быстрыми нейтронами, окруженной сборкой отражателя нейтронов, содержащим внутренний кольцевой канал и наружный кольцевой канал, причем внутренний кольцевой канал содержит объем топлива в виде расплавленной соли.

Фиг. 21 изображает схематический вид сверху вниз иллюстративной активной зоны ядерного реактора на расплавленных солях с быстрыми нейтронами, окруженной сборкой отражателя нейтронов, содержащим кольцевой канал, содержащий трубки с меняющимися значениями радиуса.

Фиг. 22 изображает вид в разрезе варианта выполнения реактора 2200, использующего отражающий материал.

Фиг. 23 изображает вариант выполнения реактора с теплообменником, имеющим конфигурацию топлива в межтрубном пространстве/первичного теплоносителя в трубном пространстве, используя тот же вид в разрезе половины реактора, что и на фиг. 22.

Фиг. 24 изображает вариант выполнения реактора с охлаждаемым жидким нейтронным отражателем.

Подробное описание

На фиг. 1 изображен схематический вид иллюстративной системы 100 реактора на расплавленных солях (MSR), обеспечивающей открытый топливный цикл реактора-самоеда с выпуском 102 топлива и выпуском 104 топлива. Выпускное отверстие 104 для топлива пропускает расплавленную соль 108 топлива из корпуса 107 реактора через первичный охлаждающий контур к наружному теплообменнику (не показан), который выделяет тепло (например, для использования в паровой турбине) и охлаждает расплавленную топливную соль 108 для возврата в корпус 107 реактора через выпускное отверстие 102 для топлива. Расплавленная топливная соль 108 поступает в корпус 107 через выпускное отверстие 111 для расплавленной топливной соли и вытекает из корпуса 107 через выпускное отверстие 113 для расплавленной топливной соли.

Активную зону 106 реактора охватывает корпус 107 реактора, который может быть выполнен из любого материала, пригодного для использования в ядерных реакторах на расплавленных солях. Например, объемная часть активной зоны 106 реактора может быть образована из одного или нескольких сплавов молибдена, одного или нескольких сплавов циркония (например, Zircaloy), одного или нескольких сплавов ниобия, одного или нескольких сплавов никеля (например, Hastelloy N) или высокотемпературной стали и других подобных материалов. На внутреннюю поверхность 109 активной зоны 106 реактора может быть нанесено покрытие, она может быть гальванизирована или облицована одним или несколькими дополнительными материалами, чтобы обеспечить устойчивость к коррозии и/или к радиационному повреждению.

Активная зона 106 предназначена для поддержания потока расплавленной топливной соли 108, причем такой поток на фиг. 1 обозначен тонкими стрелками с полым кончиком. В одном варианте выполнения корпус 107 реактора, вмещающий активную зону 106, может иметь круглое поперечное сечение при разрезании по вертикали или оси Z (то есть, что дает круглое поперечное сечение в плоскости XY), хотя также предусмотрены и другие поперечные сечения, в частности эллипсоидальные поперечные сечения и многоугольные поперечные сечения.

В рамках операции по запуску реактора система 100 MSR загружается обогащенной топливной загрузкой исходного расплавленного топлива, такого как уран-233, уран-235 или плутоний-239. В одном варианте выполнения уран-235 используется в качестве исходного топлива в виде PuCl_3 , UCl_4 , UCl_3 и/или UF_6 вместе с солью-носителем (например, NaCl , NaF и т.п.). В одном примере исходная смесь расплавленного топлива содержит 12,5 мас.% обогащенного урана, хотя могут быть использованы и другие составы. Исходное расплавленное топливо циркулирует через активную зону 106 системы 100 MSR, воспламеняется за счет критичности или реактивности тепловых нейтронов обогащенного урана. Во время работы исходное расплавленное топливо может быть дополнено процессами "воспроизводства-выгорания", а также экстракцией и добавлением расплавленной топливной соли в различных составах и количествах, в одном подходе, для управления реактивностью активной зоны 106.

Сборка 110 отражателя нейтронов расположена у наружной части активной зоны 106 реактора или вблизи нее, так что сборка 110 отражателя нейтронов окружает по меньшей мере часть области ядерного деления в активной зоне 106 реактора. Сборка 110 отражателя нейтронов может быть выполнена в виде одной непрерывной части или может состоять из многосегментных отражателей, как более подробно описано ниже. Сборка 110 отражателя нейтронов может быть образована из и/или содержать любой материал, подходящий для отражения нейтронов, замедления нейтронов и/или поглощения нейтронов, такой как, например, один или несколько из циркония, стали, железа, графита, бериллия, карбида вольфрама, свинца, свинца-висмута и т.д.

Среди других характеристик сборка 110 подходит для отражения нейтронов, выходящих из активной зоны 106, обратно в расплавленную топливную соль 108 в соответствии с динамическими регулируемыми с шагом характеристиками отражательной способности. Одним из типов динамической регулируемой с шагом характеристики отражения является нейтронное отражение, т.е. упругое рассеяние нейтронов при столкновении с ядрами отражателей. Столкнувшиеся нейтроны рассеиваются, по существу, с той же энергией, с которой они прибыли, но в другом направлении. Таким образом, высокий процент быстрых нейтронов может отражаться обратно в активную зону 106 реактора в виде быстрых нейтронов, где они могут сталкиваться с воспроизводящим ядерным материалом для воспроизводства нового делящегося ядерного материала. Соответственно материал отражателя нейтронов в сборке 110 отражателя нейтронов может усиливать операцию по воспроизводству быстрого реактора-самоеда.

Кроме того или в качестве альтернативы другой динамически регулируемой характеристикой отражения является замедление нейтронов, т.е. неупругое рассеяние нейтронов при столкновении с ядрами замедлителя. Сталкивающиеся нейтроны рассеиваются с меньшей энергией, чем те, с которыми они прибыли (например, быстрый нейтрон рассеивается как нейтрон с тепловым спектром), и в другом направлении. Таким образом, высокий процент быстрых нейтронов может отражаться обратно в активную зону 106 реактора в виде тепловых нейтронов, где они могут сталкиваться с делящимся ядерным материалом, что приводит к реакции деления. Соответственно замедляющий нейтроны материал в сборке 110 может усиливать операцию по выгоранию быстрого реактора-самоеда.

Дополнительно или в качестве альтернативы другой динамически регулируемой характеристикой

отражения является поглощение нейтронов, также известное как захват нейтронов: ядерная реакция, при которой атомное ядро и один или несколько нейтронов сталкиваются и сливаются, образуя более тяжелое ядро. Поглощенные нейтроны не рассеиваются, а остаются частью объединенных ядер, если не выпускаются позднее, например, как часть бета-частицы. Поглощение нейтронов обеспечивает характеристику отражательной способности с нулевым или минимальным отражением. Таким образом, может быть предотвращено рассеяние обратно в активную зону 106 реактора быстрых и тепловых нейтронов, выходящих из активной зоны реактора, для столкновения с делящимся или воспроизводящим материалом. Соответственно поглощающий нейтроны материал в сборке 110 отражателя нейтронов может уменьшать операцию по воспроизводству и операции по выгоранию быстрого реактора-самоеда.

Динамическое управление характеристиками отражения нейтронов в сборке 110 отражателя нейтронов обеспечивает возможность выбора требуемого уровня реактивности в активной зоне 106. Например, расплавленная топливная соль 108 требует минимального уровня контакта тепловых нейтронов, чтобы оставаться критической в активной зоне 106 реактора. Сборка 110 динамического отражателя нейтронов может быть отрегулирована для получения характеристик отражательной способности для поддержания или содействия критичности в расплавленной топливной соли 108 внутри активной зоны 106. В качестве другого примера может быть желательным использовать систему 100 MSR при полной мощности, что могло бы стимулировать повышенное замедление до тепловой энергии нейтронов в активной зоне 106 для увеличения скорости расщепления. Таким образом, характеристики отражательной способности сборки 110 динамического отражателя нейтронов могут быть увеличены для обеспечения большего замедления, пока не будет достигнут требуемый уровень реактивности, представляющий полную мощность для активной зоны 106.

Напротив, поскольку система 100 MSR представляет собой реактор-самоед, может потребоваться динамическое управление скоростью воспроизводства в различных точках в течение жизненного цикла реактора. Например, на раннем этапе жизненного цикла реактора может потребоваться высокая скорость воспроизводства, чтобы увеличить доступность делящегося материала в активной зоне 106. Таким образом, характеристики отражательной способности динамического отражателя нейтронов 110 могут быть скорректированы для обеспечения увеличенного отражения быстрых нейтронов в активную зону 106 для воспроизводства большего количества воспроизводящего материала в делящееся топливо. По мере того как со временем более быстрые нейтроны отражаются в активную зону 106 реактора, быстрые нейтроны могут воспроизводить воспроизводящий материал в делящийся материал до тех пор, пока не будет достигнута требуемая концентрация делящегося материала. Позже в жизненном цикле реактора может потребоваться увеличить выгорание, чтобы обеспечить повышенную мощность за счет увеличения выгорания. Поэтому характеристики отражательной способности сборки 110 динамического отражателя нейтронов можно регулировать для увеличения замедления быстрых нейтронов до тепловых нейтронов для поддержания требуемой скорости выгорания.

Таким образом, реактивностью активной зоны и соотношением воспроизводства и выгорания можно точно управлять во времени, регулируя характеристики отражательной способности сборки 110 динамического отражателя нейтронов. Например, оператор системы 100 MSR может пожелать поддерживать высокий и постоянный профиль выгорания с течением времени. В некоторых вариантах выполнения требуемый профиль выгорания представляет собой профиль выгорания, который остается вблизи максимальной скорости выгорания системы 100 MSR в течение длительного периода времени, например в течение нескольких лет или десятилетий. Для получения такого профиля выгорания характеристики отражательной способности сборки 110 динамического отражателя нейтронов могут выбираться с различными интервалами в течение длительного периода времени. Как и в проиллюстрированном выше примере, на раннем этапе срока службы системы 100 MSR характеристики отражательной способности могут быть выбраны так, чтобы отражать более быстрые нейтроны в активную зону 106 реактора, для воспроизводства воспроизводящего материала в делящийся материал до тех пор, пока не будет достигнута требуемая концентрация делящегося материала. Характеристики отражательной способности могут быть снова скорректированы для увеличения замедления до тепловой энергии, соответствующей концентрации делящегося материала. С течением времени, когда делящийся материал сгорает, характеристики отражательной способности сборки 110 динамического отражателя нейтронов могут быть снова настроены так, чтобы получить большее воспроизводство за счет отражения быстрых нейтронов, уменьшая замедление и/или увеличивая отражение быстрых нейтронов. Эти корректировки могут продолжаться так, что профиль выгорания системы 100 MSR остается высоким, и при этом воспроизводящий материал воспроизводится до делящегося материала со скоростью, достаточной для питания системы 100 MSR в течение длительного периода времени.

Фиг. 2 иллюстрирует график 200 зависимости реактивности от времени MSR с быстрым спектром с одним или несколькими сборками динамического отражателя в сравнении с двумя другими конфигурациями сборки со статическими характеристиками, влияющими на нейтроны. Линия 202 на графике показывает реакционную способность в зависимости от времени для реактора MSR с быстрым спектром со сборкой статического свинцового отражателя нейтронов, окружающим активную зону реактора, причем сборка свинцового отражателя нейтронов имеет тенденцию к упругому рассеянию быстрых нейтронов в

активную зону реактора. Через некоторое время T_0 , когда реактор запускается с первоначальной загрузкой топлива, воспроизводство воспроизводящего топлива может происходить быстро из-за отражения быстрых нейтронов в активную зону реактора. После времени T_1 реактивность на линии 202 графика с течением времени постепенно увеличивается, поскольку воспроизводство увеличивает количество доступного для сгорания делящегося материала, достигая максимума за время, близкое к T_4 . Воспроизводство может замедляться с течением времени с увеличением выгорания, поскольку сырье для производства ядерного топлива, ранее присутствовавшее в активной зоне реактора, превращается в делящийся материал или расщепляется из-за повышенной конкуренции за нейтроны с продуктами деления. Линия 202 графика не показывает постоянный уровень реактивности со временем, поскольку в начале периода в топливной области недостаточно быстрых нейтронов для воспроизводства достаточного количества делящегося материала для обеспечения высокой скорости выгорания. С течением времени все большее количество быстрых нейтронов воспроизводит воспроизводящий материал в делящийся материал, а реактивность увеличивается, но остается ниже максимальной скорости выгорания, на которую способен реактор. Ближе к концу периода, приблизительно во время T_5 , реактивность достигает локального максимума и начинает снижаться по мере того, как запасы воспроизводящего материала начинают снижаться.

Линия 204 графика показывает зависимость реактивности от времени для быстрого MSR реактора со статической конфигурацией графитового замедлителя, причем замедляющая сборка отражателя нейтронов стремится обеспечить активную зону реактора нейтронами, замедленными до тепловой энергии. На линии 204 график реактивности начинается приблизительно во время T_0 на относительно более высоком уровне, чем линия 202 графика, что частично обусловлено замедлением до тепловой энергии, вызванным графитовым замедлителем, увеличивающим вероятность расщепления. Линия 204 графика может значительно уменьшиться вблизи времени T_0 из-за умножения теплового спектра рядом с графитовым отражателем. Реактивность может затем постепенно снижаться с течением времени, как правило, линейно, поскольку тепловые нейтроны сжигают делящееся топливо в активной зоне реактора. Линия 204 графика подобна линии 202 графика в том отношении, что ни одна из них не достигает и не поддерживает максимальную скорость горения, достижимую в активной зоне реактора. Линия 204 графика не достигает максимальной скорости горения реактора, потому что имеется недостаточно быстрых нейтронов для поддержания скорости воспроизводства, достаточно высокой, чтобы поддерживать скорость горения с течением времени, когда время меняется от T_0 до T_5 . В линиях 202 и 204 графика скорость горения не оптимизирована в течение периода времени T_0 - T_5 . Вместо этого каждый график имеет период относительно более высокой скорости горения и период относительно более низкой скорости горения.

Линии 202 и 204 графика показаны в сравнении с линией 206 графика. Линия 206 графика иллюстрирует зависимость реактивности от времени для быстрого реактора MSR со сборкой динамического отражателя нейтронов, начиная с конфигурации с большим замедлением и изменяя ее на конфигурацию с большим отражением, после чего ее динамически контролируют для достижения требуемых условий реактивности в активной зоне реактора. Зависимость реактивности от времени на линии 206 графика начинается относительно высокой после того, как начальная загрузка топлива загружается приблизительно во время T_0 и остается высокой из-за динамически контролируемого характера отражения и замедления до тепловой энергии нейтронов. Вблизи времени T_0 состав материала в сборке отражателя нейтронов регулируется для получения скорости замедления, которая коррелирует с концентрацией делящегося материала, доступного в топливной области в это время. По мере развития выгорания состав материала в сборке отражателя нейтронов корректируется для увеличения отражения быстрых нейтронов и уменьшения замедления, чтобы продолжать подавать в топливную область вновь воспроизведенный делящийся материал, одновременно поддерживая соответствующую величину замедления до тепловой энергии, чтобы удовлетворить текущим условиям в топливной области. Регулировки могут выполняться непрерывно или в виде циклического процесса и продолжаться со временем до достижения времени T_5 . Эффект этих регулировок сборки динамического отражателя нейтронов заключается в поддержании относительно стабильной и высокой реактивности в течение всего периода T_0 - T_5 , что не представляется возможным при использовании статических замедлителей и нейтронных отражателей, таких как представлены соответственно линиями 202 и 204 графика. Тем не менее, та же самая сборка динамического отражателя нейтронов может использоваться для управления реактивностью и другими способами (например, для снижения реактивности и т.п.).

Следует также отметить, что включение поглотителя нейтронов в сборку отражателя нейтронов также может влиять на реактивность в активной зоне реактора. Динамические корректировки среди отражателя нейтронов, замедлителя и поглощающих материалов в сборке отражателя нейтронов могут обеспечить более богатые возможности управления, чем использование только статического отражателя нейтронов.

Фиг. 3 изображает схематический вид сегментированной сборки 300 динамического отражателя нейтронов, окружающей активную зону 301 MSR. Активная зона 301 MSR имеет выпуск 308 для топлива и выпуск 310 для топлива. Выпуск 310 для топлива выпускает расплавленную топливную соль из корпуса 303 реактора через первичный охлаждающий контур к наружному теплообменнику (не показан), который выделяет тепло (например, для использования в паровой турбине) и охлаждает расплавленную

топливную соль для возврата ее в корпус 303 реактора через выпуск 308 для топлива. Расплавленная топливная соль протекает в корпус 303 реактора через впускное отверстие 312 для расплавленной топливной соли и вытекает из корпуса 303 реактора через выпускное отверстие 314 для расплавленной топливной соли.

Сегментированный динамический отражатель 300 нейтронов может частично или по существу окружать активную зону 301 MSR. Например, между сегментами 302, 304, 306 могут иметься зазоры, или же сегменты 302, 304, 306 могут непрерывно окружать активную зону MSR. Несмотря на то, что на фиг. 3 изображены три сегмента сборки 300 динамического отражателя, следует понимать, что сборка динамического отражателя может содержать любое количество сегментов. Сегменты сборки 300 динамического отражателя могут окружать активную зону полностью или частично, окружая активную зону радиально. Сегменты сборки 300 динамического отражателя могут быть, необязательно, размещены выше и/или ниже активной зоны реактора в комбинации с сегментами радиального отражателя или вместо них.

Следует понимать, что в некоторых случаях может оказаться невозможным, чтобы сегментированный динамический отражатель нейтронов полностью окружал активную зону реактора непрерывным или полностью нефрагментированным образом. Например, может быть целесообразным размещать различные структуры и инструменты вокруг активной зоны 301 быстрого MSR реактора с элементами обеспечения, такими как впускной/выпускной трубопровод, кабели питания, кабели для передачи данных и/или другие приборы, элементы управления и вспомогательное оборудование. Эти конструкции и инструменты могут требовать прямого или косвенного доступа к активной зоне реактора, так что сегментам сборки 300 динамического отражателя может быть придана форма или они могут быть размещены для обеспечения доступа. Соответственно в некоторых вариантах выполнения может быть целесообразным обеспечить промежутки между сегментами или устройствами, в которых части области, окружающей активную зону реактора, не охвачены сегментами сборки 300 динамического отражателя.

Некоторые или каждый сегмент 302, 304, 306 сборки 300 динамического отражателя может содержать один или несколько каналов (не показанных на фиг. 3) для пропускания потока отражающего материала. Как используется в этой заявке, термин "каналы" относится не только к трубчатому замкнутому каналу, но и к любому объему, подходящему для протекания отражающего материала. Расходный отражающий материал может включать материалы, которые необязательно могут быть жидкостями, но и материалы, которые могут циркулировать или протекать через сборку так, что можно выборочно добавлять или удалять из него отражающий материал. Примеры подходящих отражающих нейтроны материалов включают текучие среды, суспензию взвешенных частиц и/или твердые вещества, такие как порошок и/или крошка, такая как углеродная крошка и т.п. Сегменты 302, 304, 306 могут содержать один или несколько первых каналов для пропускания текучего отражающего материала в первом направлении, например, вниз вдоль периферии соответствующих сегментов, и один или несколько вторых каналов для пропускания текучего отражающего материала во втором направлении, как например, назад вверх к верхней части сборки 300 динамического отражателя нейтронов. Каналы различных сегментов отражателя могут проточно сообщаться с жидкостью, так что текучий отражающий нейтроны материал протекает между сегментами. В другом одном варианте выполнения сегменты отражателя могут быть физически отделены друг от друга, так что поток отражающего материала втекает только в один и вытекает только из одного сегмента.

В одном варианте выполнения один или несколько проточных каналов в сегментах отражателя могут находиться в тепловом контакте с теплообменником и/или с расплавленной топливной солью, действующей в качестве теплоносителя. Таким образом, текучий отражающий материал может обмениваться теплом с расплавленной топливной солью и переносить тепло через теплообменники во вторичный охлаждающий контур для подачи тепла из реактора в турбину или в другое электрогенерирующее оборудование. Поскольку текучий отражающий материал обменивается теплом с активной зоной реактора через первичный и/или вторичный охлаждающие контуры, температура текучего отражающего материала может колебаться. По мере колебания температуры текучего отражающего материала его плотность может изменяться. Например, в одном варианте выполнения текучий отражающий материал представляет собой расплавленный свинец-висмут, а расплавленный свинец-висмут будет иметь более высокую плотность при более низких температурах. По мере понижения температуры расплавленного свинца-висмута и его плотности число молекул в единице объема свинца-висмута будет возрастать. По мере увеличения количества молекул на единицу объема (т.е. более высокая плотность) вероятность отражения быстрого нейтрона, выходящего из активной зоны реактора, возрастает, повышая, тем самым, эффективную отражательную способность текучего отражающего материала без изменения объема материала. В другом одном варианте выполнения плотность текучего отражающего материала может быть отрегулирована путем введения в текучий отражающий материал неотражающего материала (такого как частицы неотражающего материала, пузырьки газа в жидкости и т.п.). В еще одном варианте выполнения плотность текучего отражающего материала может быть отрегулирована путем регулирования характеристик окружающей среды для испарения текучего отражающего материала в парообразную фазу низкой плотности. Тем самым, состав материала сборок динамического отражателя нейтронов и, следовательно, ее отражательная способность могут быть изменены.

На фиг. 4 изображена система 400 MSR со сборкой 406 динамического текучего отражателя нейтронов, имеющей переливной резервуар 408. Расплавленная топливная соль 402 протекает в восходящем направлении, когда она нагревается реакцией деления во внутренней центральной секции активной зоны реактора, и протекает вниз, когда она остывает вокруг внутренней периферии корпуса 401 реактора. На фиг. 4 полые кончики стрелок указывают на поток расплавленной топливной соли через систему 400 MSR. Составные компоненты расплавленного топлива могут быть хорошо перемешаны быстрым циркуляционным потоком топлива (например, один полный виток циркуляции в секунду). В одном варианте выполнения один или несколько теплообменников 404 расположены на внутренней периферии корпуса 401 реактора для извлечения тепла из потока расплавленного топлива, еще больше охлаждая нисходящий поток, хотя теплообменники могут дополнительно или в качестве альтернативы располагаться и снаружи корпуса 401 реактора.

Система 400 MSR содержит сборки 406 динамического отражателя нейтронов. Рабочие температуры системы 400 MSR могут быть достаточно высокими, чтобы сжижать различные подходящие материалы отражателя нейтронов. Например, свинец и сплава свинец-висмут плавятся при температуре приблизительно соответственно 327 и 200°C, что попадает в рабочий диапазон реактора. В одном варианте выполнения сборки 406 динамического отражателя нейтронов выполнены так, чтобы содержать протекающую и/или циркулирующую фазу текучей среды из выбранных материалов отражателя нейтронов (например, свинец, свинец-висмут и т.п.). На фиг. 4 стрелки со сплошными кончиками указывают на поток отражателя нейтронов. Сборки 406 динамического отражателя нейтронов могут быть сформированы из любого подходящего термостойкого и радиационно-стойкого материала, такого как один из одного или нескольких огнеупорных сплавов, включая, без ограничения, один или несколько никелевых сплавов, молибденовых сплавов (например, сплав TZM), вольфрамовых сплавов, танталовых сплавов, ниобиевых сплавов, сплавов рения, карбида кремния или одного или нескольких других карбидов. В одном варианте выполнения сборки 406 динамического отражателя нейтронов расположены и распределены радиально поперек наружной поверхности секции активной зоны реактора. В вариантах выполнения сборки 406 динамического отражателя нейтронов могут быть сегментированы, как описано выше со ссылкой на фиг. 3. В одном варианте выполнения сборки 406 динамического отражателя нейтронов расположены радиально поперек наружной поверхности секции активной зоны реактора. Сборки 406 динамического отражателя нейтронов могут быть расположены так, чтобы образовывать не фрагментированный объем материала отражателя нейтронов вокруг секции активной зоны реактора. Любое геометрическое расположение и количество сборок 406 динамического отражателя нейтронов пригодны для описанной здесь технологии. Например, сборки 406 динамического отражателя нейтронов могут быть расположены в конфигурации упакованных колец, причем каждый модуль заполняют потоком материала отражателя нейтронов для формирования цилиндрического отражающего нейтроны объема вокруг секции активной зоны реактора. Сборки 406 динамического отражателя нейтронов также могут быть расположены над и под секцией активной зоны реактора.

Состав сборок 406 динамического отражателя нейтронов может быть отрегулирован для изменения характеристик отражения, например, путем регулирования объема текучего отражающего материала в отражателях 406. Один из способов регулировки объема текучего отражающего материала в отражателях 406 заключается в перекачивании материала в динамические отражатели 406 или из них в переливной резервуар 408 через трубопроводный узел 410 и насос 414. Чтобы уменьшить объем текучего отражающего нейтроны материала и, тем самым, уменьшить характеристики отражательной способности отражателей 406, часть текучего отражающего нейтроны материала может накачиваться или перемещаться во вторичный резервуар 408 через трубопроводный узел 410. Клапан 412 и насос 414 могут взаимодействовать для регулирования потока текучего отражающего нейтроны материала через трубопровод 410. Для увеличения объема текучего отражающего нейтроны материала клапан 412 и насос 414 могут взаимодействовать для пропускания текучего отражающего нейтроны материала из переливного резервуара 408 и обратно в отражатели 406 через трубопровод 410. В другом варианте выполнения отражательная способность сборок 406 динамического отражателя нейтронов может регулироваться путем регулирования температуры и, следовательно, плотности текучего отражающего нейтроны материала. Изменения плотности текучего отражающего нейтроны материала изменяют его характеристики отражения нейтронов, поскольку более плотные материалы имеют более высокую массу на единицу объема. Более плотные материалы будут содержать больше молекул на единицу объема и, следовательно, с большей вероятностью отражают нейтроны, потому что любой нейтрон, проходящий через более плотный материал, будет более вероятно ударять по молекуле текучего отражающего нейтроны материала и, таким образом, отражаться. Насос 414 и клапан 412 могут взаимодействовать для увеличения или уменьшения расхода текучего отражающего нейтроны материала в динамические нейтронные отражатели 406 и из них для регулирования температуры отражающего текучего отражающего нейтроны материала. В других вариантах выполнения переливной резервуар 408 может быть заменен другими конфигурациями, такими как замкнутый контур.

Система 400 MSR может содержать узел 416 очистки текучего отражающего нейтроны материала. Узел 416 очистки текучего отражающего нейтроны материала проточно сообщается с трубопроводным

узлом 410 и может располагаться с обеих сторон клапана 412 и насоса 414. Узел 416 очистки текучего отражающего нейтроны материала может фильтровать и/или управлять химией отражающего нейтроны материала. Например, узел 416 очистки текучего отражающего нейтроны материала может удалять кислород, нитриты и другие примеси из отражающего нейтроны материала. В одном варианте выполнения покрытие из нитрита циркония в узле 416 очистки текучего отражающего нейтроны материала выполнено с возможностью управления химией текучего отражающего нейтроны материала. В другом варианте выполнения узла 416 очистки текучего отражающего нейтроны материала может быть использована технология "шлакообразования", при которой узел 416 очистки текучего отражающего нейтроны материала захватывает кислород в виде оксидного материала. Если оксидный материал является расплавленным, то он может разделяться на фазы, а узел 416 очистки текучего отражающего нейтроны материала может удалять оксидный материал из отражающего нейтроны материала, например соскребая оксидный материал. В другом варианте выполнения узел 416 очистки текучего отражающего нейтроны материала выполнен с возможностью обработки водородом отражающего нейтроны материала для удаления содержащегося в нем кислорода.

Состав динамических нейтронных отражателей 406 также может быть скорректирован путем введения текучего замедляющего материала. Текучий замедляющий материал может удерживаться в резервном резервуаре (не показан) и вводиться в динамические нейтронные отражатели 406 через трубопроводный узел 410 и насос 414, проточно сообщаясь с резервным резервуаром текучего замедлителя. Текучий замедляющий материал может циркулировать в динамических отражателях 406 и может быть удален насосом 414 в запасной резервуар через трубопроводный узел 410. В одном варианте выполнения в качестве текучей замедляющей жидкости в динамических нейтронных отражателях 406 может использоваться вода или тяжелая вода. В другом варианте выполнения в качестве текучего замедляющего материала в динамических нейтронных отражателях 406 может использоваться бериллий. В еще одном варианте выполнения в качестве текучего замедляющего материала в динамических нейтронных отражателях 406 и/или в самой топливной соли может быть использован LiF-BeF_2 . Насос 414 может накачивать текучую замедляющую жидкость и/или текучий отражающий нейтроны материал в динамические отражатели 406 и из них непрерывно и/или в периодическом процессе.

Как описано выше, поглощающий нейтроны материал также может быть встроен в сборки 406 динамических нейтронных отражателей, отдельно или в комбинации с различными составами и/или конфигурациями отражающих нейтроны материалов и замедляющих нейтроны материалов.

Фиг. 5 представляет собой схематический вид сверху вниз сборки 500 динамического отражателя нейтронов с множеством гильз 502 огнеупорной оболочки для пропускания через них текучего отражающего нейтроны материала. В одном варианте выполнения сборка 500 текучего отражателя нейтронов, по существу, окружает область 504 ядерного топлива, из которой испускаются быстрые нейтроны 506. На фиг. 5 иллюстративные траектории быстрых нейтронов 506 показаны линиями, заканчивающимися двойными стрелками, такими как линии 508. Иллюстративные быстрые нейтроны 506 неупруго рассеиваются (или отражаются) от текучего отражающего материала и обратно в область 504 ядерного топлива. Конфигурацию отражателя, изображенную на фиг. 5, можно использовать для пошагового изменения спектра нейтронов в области 504 ядерного топлива путем выборочного заполнения каждого из каналов 502 объемом отражающего нейтроны материала.

На фиг. 5 отражающий нейтроны материал протекает вверх через канал 502 огнеупорной оболочки к наблюдателю. В одном варианте выполнения отражающий нейтроны материал может циркулировать в каналах 502 (например, в ячейках, гильзах, трубках и т.п.) с впускными и выпускными портами над областью 504 ядерного топлива, так что нет никакой необходимости в каких-либо приспособлениях или портах под реактором. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал может протекать только в одном направлении, в направлении вверх или вниз, через каналы 502 с одним портом над областью 504 ядерного топлива и другим портом под топливной областью 504. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал может содержать ползаторможенный или ползучий поток через каналы 502. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал может проходить через радиальные впускные и выпускные порты.

Сборка 500 динамического отражателя нейтронов находится в тепловом контакте с теплообменником 510, расположенным на противоположной стороне от топливной области 504. Теплообменник 510 может содержать один или несколько типов циркулирующего через него жидкого теплоносителя. Поскольку отражатель нейтронов 500 обменивается теплом с теплообменником 510, теплообменник 510 может переносить тепло от сборки 500 динамического отражателя нейтронов как часть вторичного охлаждающего контура. Вторичный охлаждающий контур может подавать тепло на оборудование для производства электроэнергии, такое как, например, паровая турбина. В одном варианте выполнения расплавленная топливная соль может протекать вверх через область 504 ядерного топлива и вниз через теплообменник 510, обмениваясь, тем самым, теплом как часть первичного охлаждающего контура. Другими словами, теплообменники могут обмениваться теплом как с расплавленной топливной солью, так и с протекающим в каналах 502 нейтронным отражателем. Скорость потока отражающего нейтроны материала может регулироваться для изменения времени контакта с теплообменниками для изменения тем-

пературы отражающего материала, протекающего в каналах 502. По мере изменения температуры отражающего материала изменяется его плотность. Изменения в плотности отражающего материала изменяют его характеристики отражательной способности нейтронов, поскольку более плотные материалы имеют более высокую массу на единицу объема и поэтому с большей вероятностью отражают нейтроны. Каналы 502 могут быть сформированы в геометрических формах, включая, без ограничения, квадратные, прямоугольные, круглые, круговые, многоугольные и т.д.

Фиг. 6 изображает схематический вид сверху вниз сборки 600 динамического отражателя нейтронов с множеством гильз 602, проводящих текущий отражающий нейтроны материал, и множество гильз 604, содержащих замедляющие нейтроны элементы 606, выборочно вставленные в гильзы 602, 604 в любой требуемой конфигурации, в отношении которой и сколько гильз 602 может принимать замедляющие нейтроны элементы 606. Сборка 600 динамического отражателя нейтронов, по существу, окружает топливную область 608, из которой испускаются быстрые нейтроны 610. На фиг. 6 линии, оканчивающиеся двойными стрелками, такие как линии 612, указывают на быстрые нейтроны. При введении замедляющие нейтроны элементы 606 вытесняют объем текущего отражающего нейтроны материала, изменяя, тем самым, характеристики отражательной способности нейтронов в сборке 600 динамического отражателя нейтронов. Поскольку сборка 600 динамического отражателя нейтронов содержит нейтронно-отражающие и нейтронно-замедляющие материалы, некоторые из быстрых нейтронов отражаются обратно в топливную область 608, и другие быстрые нейтроны 610 ударяются в замедляющие нейтроны элементы 606 и преобразуются в тепловые нейтроны.

На фиг. 6 иллюстративные траектории тепловых нейтронов обозначены линиями, оканчивающимися одиночными стрелками, такими как линия 614. Иллюстративные траектории быстрых нейтронов обозначены линиями, оканчивающимися двойными стрелками. Поскольку сборка 600 динамического отражателя преобразует быстрые нейтроны в тепловые нейтроны, тепловые нейтроны могут отражаться обратно в топливную область 608 протекающим в каналах 602, 604 нейтронным отражателем, или же отражаться другим нейтронным отражателем, расположенным позади динамического отражателя 600 (не показан). Из-за вытеснения части объема текущего отражающего нейтроны материала, полные отражательные характеристики отражателя 600 изменяются, уменьшая, тем самым, скорость воспроизводства в топливной области 608 из-за уменьшения отражения быстрых нейтронов, по сравнению с конфигурацией без замедляющих нейтроны элементов 606 объемного смещения. Конфигурация элементов смещения, показанная на фиг. 6, также увеличивает скорость выгорания в топливной области 608 за счет увеличения нейтронов теплового спектра по сравнению с конфигурацией без элементов смещения. Путем выборочного вставления замедляющих нейтроны элементов 606 объемного смещения в отражатель 600 скорости воспроизводства и выгорания, а также спектр нейтронов в топливной области 608 могут динамически регулироваться. Элементы 606 объемного смещения могут иметь геометрические формы, включая, без ограничения, квадратные, круглые, прямоугольные, круговые, многоугольные формы и т.п.

В одном варианте выполнения полные характеристики отражательной способности отражателя 600 изменяются путем слива из одного или нескольких каналов 602, 604 текущего отражающего нейтроны материала, оставляя при этом пустое пространство в одном или нескольких каналах 602, 604. Для отражателя 600 может быть предусмотрено активное охлаждение путем обеспечения теплового контакта с топливной солью и/или со вторичным теплоносителем.

На фиг. 6 отражающий нейтроны материал, протекающий в каналах 602, протекает вверх к наблюдателю. В одном варианте выполнения отражающий нейтроны материал, протекающий в каналах 602, может циркулировать в каналах 602 с впускными и выпускными портами, расположенными над топливной областью 608, так что никакие детали или отверстия под реактором не нужны. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал, протекающий в каналах 602, может протекать только в одном направлении, в направлении вверх или вниз, через каналы 602 с одним портом, расположенным над топливной областью 608, а с другим портом, расположенным ниже топливной области 608. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал может включать полузаторможенный или ползучий поток через каналы 602. В других вариантах отражающий нейтроны материал может проходить через радиальные впускные и выпускные порты.

Теплообменник 614 может находиться в тепловом контакте с сборкой 600 динамического отражателя для обмена тепла от топливной области 608. В одном варианте выполнения теплообменник 614 расположен рядом с противоположной от топливной области 608 стороной сборки 600 динамического отражателя. Когда отражающий нейтроны материал протекает через гильзы сборки 600 динамического отражателя, он может переносить тепло, выходящее из топливной области 608, в теплообменник 614 для формирования вторичного охлаждающего контура. Вторичный охлаждающий контур может содержать один или несколько вторичных охлаждающих контуров, образованных из трубок. Вторичный охлаждающий контур может содержать любое устройство системы вторичного теплоносителя, известное в данной области техники, которое может быть использовано в реакторе на расплавленных топливных солях. Система вторичного теплоносителя может циркулировать вторичный теплоноситель через одну или несколько трубок и/или сборку для переноса текучей среды одного или нескольких вторичных охлаждающих контуров, чтобы переносить тепло, вырабатываемое активной зоной реактора и принимаемое

теплообменником 614, к расположенным ниже по потоку тепловым электроприводам генерирующих устройств и систем. Система вторичного теплоносителя может содержать несколько параллельных контуров вторичного теплоносителя (например, от 2 до 5 параллельных контуров), каждый из которых переносит выбранную часть вторичного теплоносителя через вторичный охлаждающий контур. Вторичный теплоноситель может включать, но не ограничивается этим, жидкий натрий.

В одном варианте выполнения теплообменник 614 защищен одним или несколькими материалами, эффективными в качестве яда или поглотителя нейтронов для захвата нейтронов, выходящих из топливной области 608, прежде чем нейтроны начнут взаимодействовать с теплообменником 614 и приведут к его радиационному повреждению. В одном варианте выполнения теплообменник 614 содержит один или несколько материалов, эффективных в качестве яда или поглотителя нейтронов. В другом варианте выполнения указанный один или несколько материалов, эффективных в качестве яда или поглотителя нейтронов, включены в сборку 600 динамического отражателя.

Фиг. 7 изображает схематический вид сверху активной зоны быстрого реактора на расплавленных солях ядерного топлива с топливной областью 702, окруженной нейтронным отражателем 700. Сборка 700 отражателя нейтронов содержит отражающий нейтроны материал 704, протекающий через каналы 712. На фиг. 7 отражающий нейтроны материал 704 движется вверх к наблюдателю. В одном варианте выполнения отражающий нейтроны материал 704 может циркулировать в каналах 712 с впускными и выпускными портами над топливной областью 702, так что нет никакой необходимости в приспособлениях или отверстиях под реактором. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал 704 может протекать только в одном направлении, в направлении вверх или вниз, через каналы 712 с одним портом над топливной областью 702 и с другим портом под топливной областью 702. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал 704 может содержать полузаторможенный или ползучий поток через каналы 712. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал 704 может проходить через радиальные впускные и выпускные порты, расположенные между теплообменниками 706.

Текущий материал 704 динамического отражателя нейтронов находится в тепловом контакте с теплообменниками 706. Теплообменники 706 могут содержать один или несколько типов циркулирующего через него жидкого теплоносителя. Поскольку отражающий нейтроны материал 704 обменивается теплом с теплообменниками 706, теплообменники 706 могут переносить тепло от сборки 700 отражателя нейтронов как часть вторичного охлаждающего контура. Вторичный охлаждающий контур может подавать тепло на оборудование для производства электроэнергии, такое как, например, паровая турбина. В одном варианте выполнения расплавленная топливная соль может протекать вверх через топливную область 702 и вниз через теплообменники 706, обмениваясь, тем самым, теплом как часть первичного охлаждающего контура. Другими словами, теплообменники 706 могут обмениваться теплом как с расплавленной топливной солью, так и с текучим отражающим нейтроны материалом 704. Скорость потока отражающего нейтроны материала 704 может регулироваться для изменения времени контакта с теплообменниками 706 для изменения температуры отражающего нейтроны материала 704. Поскольку температура отражающего нейтроны материала 704 изменяется, то соответственно изменяется и его плотность. Изменения в плотности отражающего нейтроны материала 704 изменяют его характеристики отражения нейтронов, поскольку более плотные материалы имеют более высокую массу на единицу объема и, поэтому, с большей вероятностью отражают нейтроны.

Фиг. 7 изображает иллюстративные быстрые нейтроны 710, выходящие из топливной области 702. Быстрые нейтроны обозначены линиями, оканчивающимися двойными стрелками. Иллюстративные быстрые нейтроны 710 могут возникать в топливной области 702 и отражаться отражающим нейтроны материалом 704 и возвращаться в топливную область 702. Иллюстративные быстрые нейтроны 710, отраженные обратно в топливную область 702, могут увеличивать количество делящегося материала в топливной области 702 при контакте с воспроизводящими материалами. Аналогично, на фиг. 7 показаны иллюстративные тепловые нейтроны 714. Иллюстративные тепловые нейтроны 714 обозначены линиями, оканчивающимися одиночными стрелками. Иллюстративные тепловые нейтроны 714 могут отражаться отражающим нейтроны материалом 704 и возвращаться в топливную область 702. Иллюстративные тепловые нейтроны, отраженные в топливную область 702, могут повысить реактивность в топливной области 702 при контакте с расположенным в ней делящимся материалом.

Фиг. 8 изображает схематический вид сверху вниз активной зоны быстрого реактора на расплавленных солях ядерного топлива с топливной областью 802, окруженной сборкой 800 отражателя нейтронов, с отражающим нейтроны материалом 804, находящимся в тепловом контакте с теплообменниками 806. На фиг. 8 отражающий нейтроны материал 804 движется вверх к наблюдателю. В одном варианте выполнения отражающий нейтроны материал 804 может циркулировать в каналах 808 с впускными и выпускными портами над топливной областью 802, так что никакие детали или отверстия под реактором не нужны. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал 804 может протекать только в одном направлении, в направлении вверх или вниз, через каналы 808 с одним портом над топливной областью 802 и другим портом под топливной областью 802. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал 804 может включать полузаторможенный или ползучий поток через каналы 808.

В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал 804 может проходить через радиальные впускные и выпускные порты, расположенные между теплообменниками 806.

Текущий отражающий нейтроны материал 804 находится в тепловом контакте с теплообменниками 806. Теплообменники 806 могут содержать один или несколько типов циркулирующего через них жидкого теплоносителя. Поскольку текущий отражающий нейтроны материал 804 обменивается теплом с теплообменниками 806, то теплообменники 806 могут переносить тепло от сборки 800 отражателя нейтронов как часть вторичного охлаждающего контура. Вторичный охлаждающий контур может подавать тепло на оборудование для производства электроэнергии, такое как, например, паровая турбина. В одном варианте выполнения расплавленная топливная соль может протекать вверх через топливную область 802 и вниз через теплообменники 806, обмениваясь, тем самым, теплом как часть первичного охлаждающего контура. Другими словами, теплообменники 806 могут обмениваться теплом как с расплавленной топливной солью, так и с текучим отражающим нейтроны материалом 804. Скорость потока отражающего нейтроны материала 804 может регулироваться для изменения времени контакта с теплообменниками 806 для изменения температуры отражающего нейтроны материала 804.

Сборка 800 отражателя содержит замедляющие нейтроны элементы 812 объемного смещения, вставленные в проточные каналы 808. При вставлении замедляющих нейтроны элементов 812 объем отражающей жидкости 804 в канале уменьшается. При уменьшенном объеме оставшийся отражающий нейтроны материал 804 в канале имеет измененную характеристику отражения нейтронов и, следовательно, с меньшей вероятностью отражает нейтроны, чем до того, как был вставлен замедляющий нейтроны элемент 812. Наличие замедляющего элемента 812 в области, окружающей топливную область 802, делает замедление нейтронов до тепловой энергии более вероятной, таких как, например, замедленный до тепловой энергии нейтрон 810. Увеличение замедления до тепловой энергии приводит к увеличению выгорания делящегося материала в топливной области 802.

Замедляющие нейтроны элементы 812 объемного смещения могут быть вставлены в каналы 808 по отдельности или в любом количестве элементов. Замедляющие нейтроны элементы 812 объемного смещения могут иметь цилиндрическую форму, квадратную или прямоугольную призматическую форму, форму треугольной призмы, форму многоугольной призмы и тому подобное. В другом варианте выполнения замедляющие нейтроны элементы 812 объемного смещения могут содержать набор элементов (не показаны). Выбор геометрической формы и количества замедляющих нейтроны элементов 812 объемного смещения на канал 808 будет определять соотношение замедляющего материала и отражающего материала в каналах 808. Выборочное вставление замедляющих нейтроны элементов 812 объемного смещения обеспечивает возможность регулировки скорости воспроизводства и реактивности в топливной области 802 и обеспечивает возможность поддержания требуемого уровня выгорания. В одном варианте выполнения скорость выгорания поддерживается в пределах требуемых верхней и нижней границ путем выборочного вставления и удаления, по меньшей мере, подмножества замедляющих нейтроны элементов 812 объемного смещения.

Фиг. 9 изображает схематический вид сверху активной зоны быстрого реактора на расплавленных солях ядерного топлива с топливной областью 902, окруженной сборкой 900 отражателя нейтронов с протекающим через каналы 908 отражающим нейтроны материалом 904. На фиг. 9 отражающий нейтроны материал 904 движется вверх к наблюдателю. В одном варианте выполнения отражающий нейтроны материал 904 может циркулировать в каналах 908 с впускными и выпускными портами над топливной областью 902, так что под реактором не нужны никакие детали или отверстия. В других вариантах выполнения жидкий отражатель 904 нейтронов может протекать только в одном направлении, в направлении вверх или вниз, через каналы 908 с одним портом над топливной областью 902 и другим портом под топливной областью 902. В других вариантах выполнения жидкий отражатель 904 нейтронов может содержать ползаторможенный или ползучий поток через каналы 908. В других вариантах выполнения жидкий отражатель 904 нейтронов может проходить через радиальные впускные и выпускные порты, расположенные между теплообменниками 914.

Текущий отражающий нейтроны материал 904 находится в тепловом контакте с теплообменниками 914. Теплообменники 914 могут содержать один или несколько типов циркулирующего через них жидкого теплоносителя. Поскольку текущий отражающий нейтроны материал 904 обменивается теплом с теплообменниками 914, то теплообменники 914 могут переносить тепло от сборки 900 отражателя нейтронов как часть вторичного охлаждающего контура. Вторичный охлаждающий контур может подавать тепло на оборудование для производства электроэнергии, такое как, например, паровая турбина. В одном варианте выполнения расплавленная топливная соль может протекать вверх через топливную область 902 и вниз через теплообменники 914, обмениваясь, тем самым, теплом как часть первичного охлаждающего контура. Другими словами, теплообменники 914 могут обмениваться теплом как с расплавленной топливной солью, так и с текучим отражающим нейтроны материалом 904. Скорость потока отражающего нейтроны материала 904 может регулироваться для изменения времени контакта с теплообменниками 914 для изменения температуры отражающего нейтроны материала 904. По мере изменения температуры отражающего нейтроны материала 904 изменяется его плотность. Изменения в плотности отражающего нейтроны материала 904 изменяют его характеристики отражения нейтронов, поскольку

более плотные жидкости имеют более высокую массу на единицу объема и, следовательно, с большей вероятностью отражают нейтроны.

Отражательная сборка 900 содержит выборочно вставленные поглощающие нейтроны элементы 906 и выборочно вставленные элементы 910 объемного смещения. Поглощающие нейтроны элементы 906 и элементы 910 объемного смещения могут иметь любую геометрическую форму, совместимую с формой каналов 908. Поглощающие нейтроны элементы 906 и элементы 910 объемного смещения вытесняют объем текучего отражающего нейтроны материала 904 в канале 908, в который они вставлены, снижая, тем самым, отражательную способность нейтронов этого канала. Выборочное вставление поглощающих нейтроны элементов 906 и элементов 910 объемного смещения регулирует отражательную способность нейтронов в активной зоне ядерного реактора путем изменения состава материала в сборке отражателя нейтронов. Для быстрых нейтронов, перемещающихся в элементах 910 объемного смещения, таких как, например, быстрый нейтрон 910, возможны несколько сценариев. Быстрый нейтрон 912 может проходить через элемент 910 (не показан на фиг. 9), быстрый нейтрон 912 может быть отражен оставшимся в канале текучим отражающим нейтроны материалом 904 или быстрый нейтрон 912 может отражаться другой поверхностью (не показана). Иллюстративный быстрый нейтрон 912 с меньшей вероятностью отражается обратно в топливную область 902, когда вставлен элемент 910 объемного смещения, чем когда канал заполнен текучим отражающим нейтроны материалом 904.

Вставление элемента 906 поглощения нейтронов является еще одним способом корректировки отражательной способности нейтронов в активной зоне ядерного реактора путем изменения состава материала в сборке отражателя нейтронов. Когда поглощающий нейтроны элемент 906 вставлен в канал 908, иллюстративный быстрый нейтрон 912 может удариться и поглощаться поглощающим элементом 906. Возможны и другие сценарии. Иллюстративный быстрый нейтрон может отражаться текучим отражающим нейтроны материалом 904, который не был смещен поглощающим элементом 906, или он может выйти из области активной зоны, где он может отражаться или поглощаться другим материалом (не показан). В другом варианте выполнения поглощающие нейтроны элементы 906 могут быть вставлены в канал 908, тогда как текучий отражающий нейтроны материал 904 удаляется из канала.

Следует понимать, что элементы 910 объемного смещения и поглощающие нейтроны элементы 906 могут быть выборочно вставлены в каналы 908 в любой требуемой конфигурации и в любой комбинации с другими элементами, не показанными на фиг. 9, такими как элементы, замедляющие нейтроны. Любое количество элементов 910 объемного смещения и поглощающих нейтроны элементов 906 может быть вставлено в один канал по-отдельности или в комбинации с другими вставляемыми элементами. Элементы 910 объемного смещения и поглощающие нейтроны элементы 906 могут быть вставлены только в некоторые из каналов 908 или только в каналы на части динамического отражателя 900. Может быть желательным сосредоточить местоположение воспроизводства или выгорания в топливной области 902 путем выбора конфигурации вставления, которая концентрирует требуемую активность нейтронов в требуемом месте. Например, повышенное воспроизводство может быть индуцировано в верхней половине топливной области 902 путем выборочного удаления элементов, вставленных в верхнюю половину сборки 900 отражателя, чтобы позволить отражающему нейтроны материалу 904 заполнять каналы 908 на верхней половине сборки 900 отражателя. В другом примере повышенное выгорание может быть индуцировано в нижней половине топливной области 902 путем выборочной установки элементов, замедляющих нейтроны, в каналы 908 на нижней половине сборки 900 отражателя. В еще одном примере реактивность в части топливной области 902 может быть уменьшена путем выборочной установки поглощающих нейтроны элементов 906 в каналы 908, расположенные на требуемой стороне сборки 900 отражателя.

В варианте выполнения, изображенном на фиг. 9, текучий отражающий нейтроны материал 904 в каналах 908 находится в тепловом контакте с теплообменниками 914. Изменение скорости текучего отражающего нейтроны материала 904 в каналах 908 может изменять температуру текучей отражающей жидкости и, следовательно, ее плотность и, следовательно, ее характеристики отражения нейтронов. Изменение плотности текучего отражающего нейтроны материала 904 является еще одним способом корректировки отражательной способности нейтронов в активной зоне ядерного реактора путем изменения состава материала в сборке отражателя нейтронов. Посредством теплообменников 914 текучий отражающий нейтроны материал в каналах 908 является вторичным теплоносителем для топливной области 902, поскольку он может обмениваться теплом с расплавленной топливной солью в топливной области 902 снаружи активной зоны реактора через теплообменники 914.

Фиг. 10 изображает схематический вид сбоку активной зоны быстрого реактора на расплавленных солях ядерного топлива, окруженной сборкой 1000 динамического отражателя нейтронов с отражающим нейтроны материалом 1002, находящимся в тепловом контакте с расплавленной солью 1004 ядерного топлива в кожухотрубном теплообменнике. Текучая отражающая жидкость 1002 протекает через впускные отверстия 1006 и в наружные каналы 1008. Наружные каналы 1008 обеспечивают отражающий нейтроны слой, из которого быстрые нейтроны, выходящие из топливной области 1004, могут отражаться обратно в топливную область 1004. После выхода из наружных каналов 1012 текучая отражающая жидкость 1002 проходит по нижним каналам 1012. Нижние каналы 1012 обеспечивают отражающий нейтро-

ны слой, из которого быстрые нейтроны, выходящие из топливной соли 1004, могут отражаться обратно в топливную соль 1004. После выхода из нижних каналов 1012 текущий отражающий нейтроны материал 1002 протекает вверх через трубки 1014.

Трубки 1014 находятся в тепловом контакте с расплавленной топливной солью 1004, протекающей вниз в каналах 1016, окружающих трубки 1014, в кожухотрубной конфигурации, и, следовательно, функционируют как вторичный теплоноситель для активной зоны реактора. Трубки 1014 могут быть выполнены в виде любого количества трубок любого диаметра и геометрии поперечного сечения. Конфигурация трубок 1014 может быть выбрана для требуемого поверхностного контакта с текучей расплавленной топливной солью 1004 в области 1016 для обеспечения требуемого теплообмена между текучим отражающим нейтроны материалом 1002 и расплавленной топливной солью 1004. После выхода из трубок 1014 текущий отражающий нейтроны материал 1002 входит в верхний канал 1020. Верхний канал 1020 обеспечивает отражающий слой, из которого нейтроны, выходящие из топливной области 1004, могут отражаться обратно в топливную область 1004. Теплообменники (не показаны) могут находиться в тепловом контакте с текучим отражающим нейтроны материалом 1002. В одном варианте выполнения теплообменники могут быть расположены за пределами канала 1008. В другом варианте выполнения теплообменники могут быть расположены над впускным отверстием 1006 или выпускным отверстием 1022 для текучего отражающего нейтроны материала. Благодаря теплообменникам текучий отражающий нейтроны материал 1002 является вторичным теплоносителем для топливной области 1004, поскольку он может обмениваться теплом с расплавленной топливной солью снаружи активной зоны реактора.

Отражательную способность нейтронов в активной зоне ядерного реактора можно регулировать путем изменения состава отражающей жидкости в каналах 1008, 1012, 1020. Например, объем текучего отражающего нейтроны материала 1002 может регулироваться путем прокачки некоторого количества текучего отражающего нейтроны материала 1002 в переливной резервуар 1010 или из него, соответственно увеличивая или уменьшая, тем самым, коэффициент отражения. В другом примере плотность текучего отражающего нейтроны материала 1002 через каналы 1008, 1012, 1020 может регулироваться. Более высокая плотность текучего отражающего нейтроны материала 1002 может приводить к увеличению отражательной способности нейтронов, тогда как более низкая плотность текучего отражающего нейтроны материала 1002 может приводить к уменьшенной отражательной способности нейтронов. Плотность текучего отражающего нейтроны материала 1002 может регулироваться путем изменения температуры. Температура текучего отражающего нейтроны материала 1002 может регулироваться путем изменения скорости потока и, таким образом, времени теплового контакта с расплавленной топливной солью 1004. В качестве альтернативы или дополнительно направление потока текучего отражающего нейтроны материала 1002 может быть изменено на противоположное. Таким образом, текучий отражающий нейтроны материал 1002 может протекать в нисходящем направлении через трубки 1014 и вверх через каналы 1008 в переливной резервуар 1010. Направление потока расплавленной соли 1004 ядерного топлива также может быть изменено на обратное. Таким образом, расплавленная соль 1004 ядерного топлива может протекать в нисходящем направлении в центре области деления и протекать в восходящем направлении вокруг трубок 1014.

Фиг. 11 изображает схематический вид сверху активной зоны быстрого реактора на расплавленных солях ядерного топлива с топливной областью 1102, окруженной сборкой 1100 отражателя нейтронов с отражающим нейтроны материалом 1104, протекающим через каналы 1110 и через трубки 1108 в каналах 1112, причем трубки 1108 находятся в тепловом контакте с расплавленной ядерной топливной солью 1004, протекающей через топливную область 1102 и через каналы 1112 в кожухотрубном теплообменнике. С точки зрения фиг. 11, расплавленная топливная соль течет вверх через топливную область 1102 и вниз по каналам 1112. Текучая отражающая жидкость течет вниз по каналам 1110 и вверх через трубки 1108. В этом варианте выполнения текучая отражающая жидкость 1104 также является вторичным теплоносителем для топлива в топливной области 1102. Трубки 1108 могут принимать различные конфигурации, включая неограниченное количество трубок в каждом канале 1112 или трубки любой геометрической формы. Выбор количества трубок 1108 в канале 1112 и формы трубок 1108 будет определять площадь поверхности, находящейся в контакте с расплавленной топливной солью, протекающей вверх в канале 1112, и изменять количество тепла, обменивающегося между текучей отражающей жидкостью 1104 и расплавленной топливной солью 1102. Несмотря на то, что в канале 1112 на фиг. 11 показана пара трубок 1108, также возможны различные конфигурации. Например, трубки 1108 могут проходить по извилистому пути через каналы 1112, чтобы увеличить площадь поверхности, термически подвергнутую воздействию расплавленной топливной соли. В другом варианте выполнения каналы 1112 могут содержать ряд перегородок, вокруг которых расплавленная топливная соль должна протекать непрямым образом между впускным и выпускным отверстиями. Схема непрямого потока увеличивает тепловой контакт между расплавленной топливной солью и трубками и увеличивает угол между трубками и потоком расплавленной топливной соли для увеличения теплового контакта.

В одном варианте выполнения иллюстративные быстрые нейтроны 1114, выходящие из топливной области 1102, могут быть отражены текучей отражающей жидкостью 1104, содержащейся в трубках

1108, или отражены текучей отражающей жидкостью 1104, содержащейся в каналах 1110, и обратно в топливную область 1102. Быстрые нейтроны, такие как иллюстративный быстрый нейтрон 1116, выходящий из расплавленной топливной соли, протекающей в каналах 1112, также могут отражаться текучей отражающей жидкостью 1104 в трубах 1108 или в каналах 1110 и обратно в топливную область 1102.

Фиг. 12 иллюстрирует блок-схему последовательности операций 1200 смещения динамического спектра в быстром реакторе на расплавленных солях ядерного топлива. Поддерживающая операция 1202 поддерживает реакцию ядерного деления в активной зоне ядерного реактора, окруженной сборкой динамического отражателя нейтронов. Сборка отражателя нейтронов может иметь по меньшей мере один отражающий нейтроны материал. Сборка отражателя нейтронов может окружать активную зону ядерного реактора путем размещения радиально вокруг, выше и/или ниже активной зоны реактора. Сборка отражателя нейтронов может быть выполнена в виде одной непрерывной части, выполнена в виде отдельных частей, распределенных вокруг активной зоны реактора, расположена вокруг активной зоны в виде отдельных частей с промежутками между ними и/или сегментирована на секции правильной или неправильной формы. Сборка отражателя может содержать один или несколько каналов для пропускания текучего отражающего материала. Сборка отражателя может содержать один или несколько уровней каналов, так что текучий отражающий материал протекает в одном направлении на одном уровне и протекает в другом направлении на одном или нескольких других уровнях. Например, сборка отражателя может содержать наружный канал с текучим отражающим материалом, протекающим вниз, и другой, внутренний канал с текучим отражающим материалом, протекающим вверх, чтобы не допускать забивание впускного или выпускного отверстия под активной зоной реактора.

Сборка отражателя может также находиться в тепловом контакте с одним или с несколькими теплообменниками и, следовательно, функционирует как вторичный теплоноситель для активной зоны реактора. В одном варианте выполнения теплообменники термически соединены с каналами для пропускания текучего отражающего материала. В другом варианте выполнения может использоваться кожухотрубный теплообменник, в котором первый канал проводит текучий отражающий материал в первом направлении, а один или несколько дополнительных каналов проводят текучий отражающий материал во втором направлении через одну или несколько трубок, окруженных протекающей расплавленной топливной солью.

Регулирующая операция 1204 регулирует поток быстрых нейтронов и поток тепловых нейтронов в активной зоне ядерного реактора в течение незатухающей реакции ядерного деления путем изменения характеристик отражательной способности отражающего материала в сборке отражателя нейтронов. Изменение характеристик отражательной способности отражающего материала в сборке отражателя нейтронов может включать: любую одну или несколько из модификации объема отражающего материала в сборке отражателя, изменения плотности отражающего материала в сборке отражателя, изменения состава отражающего материала в сборке отражателя, вставки замедляющих нейтроны элементов в сборку отражателя и/или удаления замедляющих нейтроны элементов из сборки отражателя, вставки поглощающих нейтроны элементов в сборку отражателя и/или удаления поглощающих нейтроны элементов из сборки отражателя и/или вставки элементов объемного смещения в сборку отражателя и/или удаления элементов объемного смещения из сборки отражателя.

Фиг. 13 иллюстрирует блок-схему других иллюстративных операций 1300 смещения динамического спектра в быстром реакторе на расплавленных солях ядерного топлива. Поддерживающая операция 1302 поддерживает реакцию ядерного деления в активной зоне ядерного реактора, окруженной сборкой отражателя нейтронов. Сборка отражателя нейтронов может иметь по меньшей мере один отражающий нейтроны материал. Сборка отражателя нейтронов может окружать активную зону ядерного реактора путем размещения радиально вокруг, выше и/или ниже активной зоны реактора. Сборка отражателя нейтронов может быть выполнена в виде одной непрерывной части, выполнена в виде отдельных частей, распределенных вокруг активной зоны реактора, расположена вокруг активной зоны в виде отдельных частей с промежутками между ними и/или сегментирована на секции правильной или неправильной формы. Сборка отражателя может содержать один или несколько каналов для пропускания текучего отражающего материала. Сборка отражателя может содержать один или несколько уровней каналов, так что текучий отражающий материал протекает в одном направлении на одном уровне и протекает в другом направлении на одном или нескольких других уровнях. Например, сборка отражателя может содержать наружный канал с текучим отражающим материалом, протекающим вниз, и другой, внутренний канал с текучим отражающим материалом, протекающим вверх, чтобы не допускать забивание впускного или выпускного отверстия под активной зоной реактора.

Сборка отражателя может также находиться в тепловом контакте с одним или с несколькими теплообменниками и, следовательно, функционирует как вторичный теплоноситель для активной зоны реактора. В одном варианте выполнения теплообменники термически соединены с каналами для пропускания текучего отражающего материала. В другом варианте выполнения может использоваться кожухотрубный теплообменник, в котором первый канал проводит текучий отражающий материал в первом направлении, а один или несколько дополнительных каналов проводят текучий отражающий материал во втором направлении через одну или несколько трубок, окруженных текучей расплавленной топливной

солью.

Регулирующая операция 1304 регулирует поток быстрых нейтронов и поток тепловых нейтронов в активной зоне ядерного реактора в течение незатухающей реакции ядерного деления путем изменения объема отражающего материала в сборке отражателя нейтронов. Объем текучего отражающего материала может быть накачан насосом и клапаном, проточно соединенным с переливным резервуаром. Объем текучего отражающего материала может накачиваться через клапан и в переливной резервуар для уменьшения объема отражающего материала в сборке отражателя и, таким образом, уменьшать поток быстрых и/или тепловых нейтронов, рассеянных в активную зону реактора. И наоборот, объем текучего материала может накачиваться через клапан из переливного резервуара, чтобы увеличивать объем в сборке отражателя и, таким образом, увеличить отражательную способность нейтронов в активной зоне реактора.

В другом одном варианте выполнения изменение состава материала в сборке отражателя нейтронов может включать выборочную установку или удаление элемента объемного смещения в один или несколько каналов, проводящих текучий отражающий материал. В вариантах выполнения элемент объемного смещения может представлять собой элемент замедления нейтронов, элемент поглощения нейтронов или элемент объемного смещения, который не влияет на поток нейтронов (например, полый элемент или элемент, образованный из материалов, не влияющих на нейтроны). Вставление элемента объемного смещения в канал, проводящий отражающий материал, окружающий активную зону реактора, уменьшает объем отражающего материала в канале и, таким образом, изменяет характеристики отражательной способности сборки отражателя за счет уменьшения рассеяния нейтронов, поскольку меньшее количество нейтронов будет с вероятностью рассеяно из-за уменьшенного объема отражающего материала. Удаление элемента объемного смещения из канала, проводящего текучий отражающий материал, окружающий активную зону ядерного реактора, может увеличивать объем текучего отражающего материала и, таким образом, изменять характеристики отражательной способности сборки отражателя за счет увеличения рассеяния нейтронов, поскольку текучий отражающий материал может вернуться к сборке отражателя в пространство, освобожденное извлеченным элементом объемного смещения, что увеличивает вероятность того, что нейтроны, выходящие из активной зоны реактора, будут рассеиваться из-за увеличения объема отражающего материала.

Фиг. 14 иллюстрирует блок-схему других иллюстративных операций 1400 смещения динамического спектра в быстром реакторе на расплавленных солях ядерного топлива. Поддерживающая операция 1402 поддерживает реакцию ядерного деления в активной зоне ядерного реактора, окруженной сборкой отражателя нейтронов. Сборка отражателя нейтронов может иметь по меньшей мере один отражающий нейтроны материал. Сборка отражателя нейтронов может окружать активную зону ядерного реактора путем размещения радиально вокруг, выше и/или ниже активной зоны реактора. Сборка отражателя нейтронов может быть выполнена в виде одной непрерывной части, выполнена в виде отдельных частей, распределенных вокруг активной зоны реактора, расположена вокруг активной зоны в виде отдельных частей с промежутками между ними и/или сегментирована на секции правильной или неправильной формы. Сборка отражателя может содержать один или несколько каналов для пропускания текучего отражающего материала. Сборка отражателя может содержать один или несколько уровней каналов, так что текучий отражающий материал протекает в одном направлении на одном уровне и протекает в другом направлении на одном или нескольких других уровнях. Например, сборка отражателя может содержать наружный канал с текучим отражающим материалом, протекающим вниз, и другой, внутренний канал с текучим отражающим материалом, протекающим вверх, чтобы не допускать забивание впускного или выпускного отверстия под активной зоной реактора.

Сборка отражателя может также находиться в тепловом контакте с одним или с несколькими теплообменниками и, следовательно, функционирует как вторичный теплоноситель для активной зоны реактора. В одном варианте выполнения теплообменники термически соединены с каналами для пропускания текучего отражающего материала. В другом варианте выполнения может использоваться кожухотрубный теплообменник, в котором первый канал проводит текучий отражающий материал в первом направлении, а один или несколько дополнительных каналов проводят текучий отражающий материал во втором направлении через одну или несколько трубок, окруженных текучей расплавленной топливной солью.

Регулирующая операция 1404 регулирует поток быстрых нейтронов и поток тепловых нейтронов в активной зоне ядерного реактора в течение незатухающей реакции ядерного деления путем изменения плотности отражающего материала в сборке отражателя нейтронов. Плотность отражающего материала в сборке отражателя нейтронов может быть изменена путем изменения температуры текучего отражающего нейтроны материала в сборке отражателя. При более высоких температурах текучий отражающий нейтроны материал имеет тенденцию иметь более низкую плотность, а при более низких температурах текучий отражающий нейтроны материал имеет тенденцию иметь более высокую плотность. Изменения в плотности изменяют характеристики отражательной способности сборки отражателя, поскольку быстрые и тепловые нейтроны, выходящие из активной зоны реактора, будут с большей или с меньшей вероятностью рассеиваться материалом отражателя, в зависимости от вероятности столкновения с ядром от-

ражающего материала в сборке отражателя. Одним из способов изменения температуры текучего отражающего нейтроны материала является изменение его скорости потока и, таким образом, времени теплового контакта текучего отражающего материала с расплавленной топливной солью. Более высокая скорость потока может сократить время контакта с горячей топливной солью, снижая, тем самым, температуру текучего отражающего материала и увеличивая плотность текучего отражающего материала. Более низкая скорость потока может оставлять текучий отражающий материал в тепловом контакте с горячей топливной солью в течение относительно длительного периода времени, увеличивая, тем самым, его температуру и снижая плотность текучего отражающего материала.

В другом варианте выполнения для обмена тепла между текучим отражающим материалом и расплавленной топливной солью может использоваться кожухотрубный теплообменник. Кожухотрубный теплообменник может быть выполнен с перегородками для направления расплавленной топливной соли по извилистой траектории вокруг трубок, переносящих текучий отражающий материал. Подвижные перегородки могут увеличивать или уменьшать время теплового контакта между текучим отражающим материалом и расплавленной топливной солью. Как было описано выше, изменение времени теплового контакта между текучим отражающим материалом и расплавленной топливной солью может иметь тенденцию изменять температуру и, следовательно, плотность потока текучего отражающего материала.

Фиг. 15 иллюстрирует блок-схему других иллюстративных операций 1500 смещения динамического спектра в быстром реакторе на расплавленных солях ядерного топлива. Поддерживающая операция 1502 поддерживает реакцию ядерного деления в активной зоне ядерного реактора, окруженной сборкой динамического отражателя нейтронов. Сборка отражателя нейтронов может иметь по меньшей мере один отражающий нейтроны материал. Сборка отражателя нейтронов может окружать активную зону ядерного реактора путем размещения радиально вокруг, выше и/или ниже активной зоны реактора. Сборка отражателя нейтронов может быть выполнена в виде одной непрерывной части, выполнена в виде отдельных частей, распределенных вокруг активной зоны реактора, расположена вокруг активной зоны в виде отдельных частей с промежутками между ними и/или сегментирована на секции правильной или неправильной формы. Сборка отражателя может содержать один или несколько каналов для пропускания текучего отражающего материала. Сборка отражателя может содержать один или несколько уровней каналов, так что текучий отражающий материал протекает в одном направлении на одном уровне и протекает в другом направлении на одном или нескольких других уровнях. Например, сборка отражателя может содержать наружный канал с текучим отражающим материалом, протекающим вниз, и другой, внутренний канал с текучим отражающим материалом, протекающим вверх, чтобы не допускать забивание впускного или выпускного отверстия под активной зоной реактора.

Сборка отражателя может также находиться в тепловом контакте с одним или с несколькими теплообменниками и, следовательно, функционирует как вторичный теплоноситель для активной зоны реактора. В одном варианте выполнения теплообменники находятся в тепловом соединении с каналами для пропускания текучего отражающего материала. В другом варианте выполнения может использоваться кожухотрубный теплообменник, в котором первый канал проводит текучий отражающий материал в первом направлении, а один или несколько дополнительных каналов проводят текучий отражающий материал во втором направлении через одну или несколько трубок, окруженных текучей расплавленной топливной солью.

Регулирующая операция 1504 регулирует поток быстрых нейтронов и поток тепловых нейтронов в активной зоне ядерного реактора в течение незатухающей реакции ядерного деления путем введения в сборку отражателя нейтронов замедляющего нейтроны элемента. Введение замедляющего нейтроны элемента может вводить в сборку отражателя ядро, которое может иметь тенденцию приводить к упругим столкновениям с быстрыми нейтронами. Присутствие этих ядер может рассеивать тепловые нейтроны обратно в активную зону ядерного реактора, увеличивая, тем самым, выгорание. Регулирующая операция 1504 также может влиять на характеристики отражательной способности нейтронов в сборке нейтронного отражения, поскольку замедляющий нейтроны элемент будет вытеснять объем текучего отражающего нейтроны материала из сборки отражателя нейтронов. Уменьшение объема текучего отражающего нейтроны материала будет уменьшать количество упругих столкновений с нейтронами, выходящими из активной зоны ядерного реактора, что уменьшает вероятность рассеяния быстрых нейтронов, выходящих из активной зоны ядерного реактора, обратно в активную зону реактора для воспроизводства воспроизводящего материала в делящийся материал.

Фиг. 16 иллюстрирует блок-схему других иллюстративных операций 1600 смещения динамического спектра в быстром реакторе на расплавленных солях ядерного топлива. Поддерживающая операция 1602 поддерживает реакцию ядерного деления в активной зоне ядерного реактора, окруженной сборкой динамического отражателя нейтронов. Сборка отражателя нейтронов может иметь по меньшей мере один отражающий нейтроны материал. Сборка отражателя нейтронов может окружать активную зону ядерного реактора путем размещения радиально вокруг, выше и/или ниже активной зоны реактора. Сборка отражателя нейтронов может быть выполнена в виде одной непрерывной части, выполнена в виде отдельных частей, распределенных вокруг активной зоны реактора, расположена вокруг активной зоны в виде отдельных частей с промежутками между ними и/или сегментирована на секции правильной

или неправильной формы. Сборка отражателя может содержать один или несколько каналов для пропускания текучего отражающего материала. Сборка отражателя может содержать один или несколько уровней каналов, так что текучий отражающий материал протекает в одном направлении на одном уровне и протекает в другом направлении на одном или нескольких других уровнях. Например, сборка отражателя может содержать наружный канал с текучим отражающим материалом, протекающим вниз, и другой, внутренний канал с текучим отражающим материалом, протекающим вверх, чтобы не допускать забивание впускного или выпускного отверстия под активной зоной реактора.

Сборка отражателя может также находиться в тепловом контакте с одним или с несколькими теплообменниками и, следовательно, функционирует как вторичный теплоноситель для активной зоны реактора. В одном варианте выполнения теплообменники термически соединены с каналами для пропускания текучего отражающего материала. В другом варианте выполнения может использоваться кожухотрубный теплообменник, в котором первый канал проводит текучий отражающий материал в первом направлении, а один или несколько дополнительных каналов проводят текучий отражающий материал во втором направлении через одну или несколько трубок, окруженных протекающей расплавленной топливной солью.

Регулирующая операция 1604 регулирует поток быстрых нейтронов и поток тепловых нейтронов в активной зоне ядерного реактора в течение незатухающей реакции ядерного деления путем удаления замедляющего нейтроны элемента из сборки отражателя нейтронов. Удаление замедляющего нейтроны элемента приводит к уменьшению доступных ядер в сборке отражателя, что может привести к возникновению упругих соударений с быстрыми нейтронами. Уменьшенное присутствие этих ядер будет рассеивать меньше тепловых нейтронов обратно в активную зону ядерного реактора, уменьшая, тем самым, выгорание. Регулирующая операция 1504 также может влиять на характеристики отражательной способности нейтронов в сборке отражателя нейтронов, поскольку удаленный замедляющий нейтроны элемент мог вытеснить объем текучего отражающего нейтроны материала, когда он был вставлен в сборку отражателя нейтронов. Увеличение объема текучего отражающего нейтроны материала может иметь тенденцию к увеличению количества упругих столкновений с нейтронами, выходящими из активной зоны ядерного реактора, что увеличивает вероятность рассеяния быстрых нейтронов, выходящих из активной зоны ядерного реактора, обратно в активную зону реактора для воспроизводства воспроизводящего материала в делящийся материал.

Фиг. 17 изображает схематический вид сверху вниз иллюстративной сборки 1700 отражателя нейтронов. Сборка 1700 отражателя нейтронов содержит два сборочных узла: основной сборочный узел 1712 статического отражателя нейтронов и вспомогательный сборочный узел 1716 динамического отражателя нейтронов. На фиг. 17 иллюстративные пути быстрых нейтронов 1706, 1714 обозначены линиями, оканчивающимися двойными стрелками, такими как линии 1708, показывающие иллюстративные быстрые нейтроны. В одном варианте выполнения сборка 1700 текучего отражателя нейтронов, по существу, окружает область 1704 ядерного топлива, из которой испускаются быстрые нейтроны 1706, 1714.

Основной сборочный узел 1712 статического отражателя нейтронов может содержать отражающий нейтроны материал. Отражающий нейтроны материал, содержащийся в основном сборочном узле 1712 статического отражателя нейтронов, может представлять собой материал из твердого, жидкого или жидкого отражателя нейтронов или их комбинацию. Основной сборочный узел 1712 статического отражателя нейтронов может, по существу, окружать топливную область 1704. В другом варианте выполнения основной сборочный узел 1712 статического отражателя нейтронов может частично окружать топливную область 1704 непрерывным, сегментированным и/или модульным образом. Иллюстративные быстрые нейтроны 1714, выходящие из области 1704 ядерного топлива, неупруго рассеиваются (или отражаются) от основного сборочного узла 1716 статического отражателя нейтронов и обратно в область 1704 ядерного топлива, увеличивая тем самым скорость воспроизводства делящегося топлива в топливной области 1704. Другие иллюстративные быстрые нейтроны, такие как иллюстративные нейтроны 1706, могут проходить через основной сборочный узел 1712 статического отражателя нейтронов и неупруго рассеиваться (или отражаться) от вспомогательного сборочного узла 1716 динамического отражателя нейтронов, как более подробно описано ниже.

Основной сборочный узел 1712 статического отражателя нейтронов может быть расположен вблизи и/или находится в тепловом контакте с областью 1704 ядерного топлива. Благодаря такому расположению основного сборочного узла 1712 статического отражателя нейтронов относительно области 1704 ядерного топлива основной сборочный узел 1712 статического отражателя нейтронов может испытывать высокие уровни воздействия усилий, которые могут вызвать повреждение или износ. Например, основной сборочный узел статического отражателя нейтронов может подвергаться воздействию высоких уровней тепла и различных типов излучения, исходящего из области 1704 ядерного топлива, включая, без ограничения, альфа-частицы, бета-частицы и/или гамма-лучи. Длительное воздействие тепла и/или излучения может привести к тому, что основной сборочный узел 1712 статического отражателя нейтронов будет подвергаться чрезмерному конструктивному ослаблению в течение определенного периода времени. Таким образом, основной сборочный узел 1712 статического отражателя нейтронов может быть выполнен с возможностью удаления из сборки 1700 отражателя нейтронов. Другими словами, основной

сборочный узел статического отражателя нейтронов, или же его модульные части, может быть установлен с возможностью скольжения на корпусе (не показан), чтобы обеспечить возможность выборочной замены сборочного узла, которая может выполняться в соответствии с периодическим техническим обслуживанием или на основе периодической проверки основного сборочного узла 1712 статического отражателя нейтронов.

На фиг. 17 также изображен вспомогательный сборочный узел 1716 динамического отражателя нейтронов. Вспомогательный сборочный узел 1716 динамического отражателя нейтронов может использоваться для пошагового изменения спектра нейтронов в области 1704 ядерного топлива путем выборочного заполнения каждого из каналов 1702 объемом отражающего нейтроны материала. Вспомогательный сборочный узел 1716 динамического отражателя нейтронов может содержать множество огнеупорных гильз 1702 для пропускания через него текучего отражающего нейтроны материала. На фиг. 17 отражающий нейтроны материал течет вверх через огнеупорный канал 1702 к наблюдателю. В одном варианте выполнения отражающий нейтроны материал может циркулировать в каналах 1702 (например, в ячеях, гильзах, трубках и т.п.) с впускными и выпускными портами, расположенными над областью 1704 ядерного топлива, так что под реактором не требуется никаких приспособлений или портов. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал может протекать только в одном направлении в направлении вверх или вниз через каналы 1702 с одним портом, расположенным над областью 1704 ядерного топлива, и другим портом, расположенным под топливной областью 1704. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал может содержать ползаторможенный или ползучий поток через каналы 1702. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал может проходить через радиальные впускные и выпускные порты.

Вспомогательный сборочный узел 1716 динамического отражателя нейтронов находится в тепловом контакте с теплообменником 1710, расположенным на противоположной стороне от топливной области 1704. Следует понимать, что сборка динамического отражателя нейтронов и/или теплообменник могут находиться внутри или быть размещены среди сборки статического отражателя. Теплообменник 1710 может содержать один или несколько типов циркулирующих через него жидкого теплоносителя. Когда вспомогательный сборочный узел 1716 динамического отражателя нейтронов обменивается теплом с теплообменником 1710, теплообменник 1710 может переносить тепло от вспомогательного сборочного узла 1716 динамического отражателя нейтронов, как часть вторичного охлаждающего контура. Вторичный охлаждающий контур может подавать тепло на оборудование для производства электроэнергии, такое как, например, паровая турбина. В одном варианте выполнения расплавленная топливная соль может протекать вверх через область 1704 ядерного топлива и вниз через теплообменник 1710, обмениваясь, тем самым, теплом как часть первичного охлаждающего контура. Другими словами, теплообменники могут обмениваться теплом как с расплавленной топливной солью, так и обмениваться теплом с текучим нейтронным отражателем в каналах 1702. Скорость потока отражающего нейтроны материала может регулироваться для изменения времени контакта с теплообменниками для изменения температуры отражающего материала, текучего в каналах 1702. По мере изменения температуры отражающего материала изменяется его плотность. Изменения в плотности отражающего материала изменяют его характеристики отражения нейтронов, поскольку более плотные материалы имеют более высокую массу на единицу объема и поэтому с большей вероятностью отражают нейтроны.

Фиг. 18 изображает схематический вид сверху активной зоны быстрого реактора на расплавленных солях ядерного топлива с топливной областью 1802, окруженной сборкой 1800 отражателя нейтронов. Сборка отражателя нейтронов содержит внутренний кольцевой канал 1808 и наружный кольцевой канал 1810, окружающий топливную область 1802. Внутренний и наружный кольцевые каналы 1808, 1810 могут содержать отражающие нейтроны материалы соответственно 1804 и 1806. Отражающие нейтроны материалы 1804, 1806 могут быть одинаковыми или отличаться друг от друга с точки зрения их соответствующих характеристик отражения нейтронов или других свойств, которые могут повлиять на работу сборки отражателя нейтронов (вязкость, плотность, удельная теплоемкость и т.д.). Отражающие нейтроны материалы 1804, 1806 могут иметь тенденцию отражать иллюстративные быстрые нейтроны 1812 обратно в топливную область 1802.

Отражающие нейтроны материалы 1804, 1806 могут быть выборочно добавлены, удалены и/или заменены в каналах 1808, 1810, чтобы динамически изменять характеристики отражения нейтронов в сборке 1800 отражателя нейтронов с течением времени. В одном варианте выполнения один или оба отражающих нейтроны материала 1804, 1806 могут быть полностью удалены из своих соответствующих каналов 1808, 1810, чтобы изменить характеристики нейтронного отражения в сборке 1800 отражателя нейтронов. В другом варианте выполнения отражающие нейтроны материалы 1804, 1806 могут представлять собой один и тот же материал. В еще одном варианте выполнения отражающие нейтроны материалы 1804, 1806 могут быть выборочно добавлены, удалены и/или заменены для обеспечения более низкого нейтронного отражения вблизи начала срока службы реактора при большем воспроизводстве воспроизводящего топлива и могут быть выборочно добавлены, удалены и/или заменены для обеспечения большего отражения нейтронов по мере того, как возраст реактора и выгорание начинают доминировать в топливной области 1802. В другом варианте выполнения отражающие нейтроны материалы 1804, 1806

могут быть смешаны внутри одного или обоих каналов 1808, 1810. В еще одном варианте выполнения один или оба отражающих нейтроны материала 1804, 1806 могут быть добавлены с течением времени к каналам 1808, 1810, чтобы изменить соотношение между двумя материалами и, следовательно, отражательную способность сборки. Если в каналах 1808, 1810 смешивают более двух отражающих нейтроны материалов 1804, 1806, то разделительный элемент (не показан) может быть задействован для отделения материалов, если это необходимо, и может работать любым подходящим образом для отделения двух или большего количества отражающих нейтроны материалов, включая один или несколько из подходящих химических, механических, магнитных, электрических процессах, процессах, основанных на времени, процессах, основанных на химических и физических свойствах двух или большего количества отражающих нейтроны материалов. В другом варианте выполнения смешанные отражающие нейтроны материалы 1804, 1806 могут быть разделены посредством операции промывки. В качестве альтернативы отражающие нейтроны материалы 1804, 1806 могут удерживаться в отдельных резервуарах (не показаны) для выборочной подпитки потоков в одном или обоих каналах 1808, 1810.

В одном варианте выполнения отражающие нейтроны материалы 1804, 1806 могут циркулировать в каналах 1808, 1810 с впускными и выпускными портами, расположенными над топливной областью 1802, так что под реактором не требуется никаких приспособлений или портов. В других вариантах выполнения отражающие нейтроны материалы 1804, 1806 могут протекать только в одном направлении, в направлении вверх или вниз, по каналам 1808, 1810 с одним портом, расположенным над топливной областью 1802, и с другим портом, расположенным под топливной областью 1802. В других вариантах выполнения отражающие нейтроны материалы 1804, 1806 могут содержать полузаторможенный или ползучий поток через каналы 1808, 1810. В других вариантах выполнения отражающие нейтроны материалы 1804, 1806 могут проходить через радиальные впускные и выпускные порты.

В другом варианте выполнения каналы 1808, 1810 могут быть выборочно заполнены материалами, которые не являются нейтронными отражателями. В одном примере каналы 1808, 1810 могут быть заполнены замедляющими нейтроны материалами, поглощающими нейтроны материалами или нейтронно-полупрозрачными материалами. В другом варианте выполнения один или оба канала 1808, 1810 могут содержать выборочно вставляемые элементы 1814 объемного смещения. Элементы 1814 объемного смещения могут содержать замедляющие нейтроны материалы, поглощающие нейтроны материалы или нейтронно-полупрозрачные материалы. При введении элементов 1814 объемного смещения объем отражающей жидкости 1804, 1806 в канале, в который был вставлен элемент объемного смещения, уменьшается. При уменьшенном объеме оставшийся в канале отражающий нейтроны материал 1804, 1806 имеет измененную характеристику отражения нейтронов и поэтому с меньшей вероятностью отражает нейтроны, чем до того, как был вставлен элемент 1814 объемного смещения.

Фиг. 19 изображает схематический вид сверху активной зоны быстрого реактора на расплавленных солях ядерного топлива, с топливной областью 1902, окруженной сборкой 1900 отражателя нейтронов. Сборка отражателя нейтронов содержит внутренний кольцевой канал 1908 и наружный кольцевой канал 1910, окружающий топливную область 1902. Внутренний и наружный кольцевые каналы 1908, 1910 могут содержать отражающий нейтроны материал 1904. В одном варианте выполнения отражающий нейтроны материал 1904 может циркулировать в каналах 1908, 1910 с впускными и выпускными портами, расположенными над топливной областью 1902, так что под реактором не требуется никаких приспособлений или портов. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал 1904 может протекать только в одном направлении, в направлении вверх или вниз, по каналам 1908, 1910 с одним портом, расположенным над топливной областью 1902, и с другим портом, расположенным под топливной областью 1902. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал 1904 может содержать полузаторможенный или ползучий поток через каналы 1908, 1910. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал 1904 может проходить через радиальные впускные и выпускные порты.

В одном варианте выполнения отражающий нейтроны материал 1904 может проходить через каналы 1908, 1910 в периоды времени, близкие к началу срока службы реактора с топливной областью 1902. По мере того как реактор с течением временем воспроизводит воспроизводящее топливо, эффективность сборки 1900 отражателя нейтронов может уменьшиться, поскольку запасы воспроизведенного ядерного топлива могут превышать количество, необходимое для загрузки реактора. Поэтому может потребоваться заменить часть отражающего нейтроны материала в части сборки отражателя нейтронов, как показано на фиг. 20, чтобы с течением времени изменить форму сборки 1900 отражателя нейтронов.

Фиг. 20 изображает схематический вид сверху активной зоны быстрого реактора на расплавленных солях ядерного топлива с топливной областью 2002, окруженной сборкой 2000 отражателя нейтронов. На фиг. 20 состав отражающего нейтроны материала внутренних кольцевых каналов 2008 выборочно заменяют дополнительной топливной солью из топливной области 2002. В результате реактор будет испытывать меньшую нейтронную "утечку". Например, быстрые нейтроны 2012 могут продолжать испытывать отражение от отражающего нейтроны материала 2006 в канале 2010. Таким образом, можно начать реакцию деления в активной зоне реактора с меньшим объемом топливной соли в начале срока службы реактора, поскольку больше делящегося топливного материала может быть воспроизведено по мере работы реактора. Дополнительное воспроизведенное топливо может заменить объем отражающего

нейтроны материала в каналах 2008. Это может снизить первоначальные затраты на эксплуатацию реактора и улучшить воспроизводство реактора в будущем, когда воспроизводство является более сложным из-за, по меньшей мере, частично продуктов деления. Отражающие нейтроны материалы 2006 могут, как правило, отражать иллюстративные быстрые нейтроны 2012 назад в топливную соль, независимо от того, приходят ли иллюстративные быстрые нейтроны 2012 из топливной области 2002 или из внутренних кольцевых каналов 2008.

Фиг. 21 изображает схематический вид сверху вниз активной зоны быстрого реактора на расплавленных солях ядерного топлива с топливной областью 2102, окруженной сборкой 2100 отражателя нейтронов. Сборка отражателя нейтронов содержит множество кольцевых каналов 2104, окружающих топливную область 2102. Кольцевые каналы 2104 могут содержать множество трубок 2108, содержащих текучий отражающий нейтроны материал 2106, находящийся в нейтронной связи с топливной областью 2102. В одном варианте выполнения указанное множество трубок 2108 представляет собой цилиндрические трубки. Текучий отражающий нейтроны материал 2106 может циркулировать в трубках 2108 с впускными и выпускными отверстиями, расположенными над топливной областью 2102, так что под реактором не требуется никаких приспособлений или портов. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал 2106 может протекать только в одном направлении, в направлении вверх или вниз, через трубки 2108 с одним портом, расположенным над топливной областью 2102, и другим портом, расположенным под топливной областью 2102. В других вариантах выполнения отражающий нейтроны материал 2106 может содержать полузаторможенный или ползучий поток через трубки 2108. Трубки 2108 расположены так, что радиус всех трубок 2108 не одинаков. Таким образом, в канале 2104 может быть расположено множество трубок 2108 с различными значениями радиуса. В одном варианте выполнения трубки 2108 с изменяющимся радиусом могут пропускать отражающий нейтроны материал в объеме, который занимает площадь поперечного сечения, равную 80% от площади поперечного сечения каналов 2104. Из-за большого количества трубок 2108, изображенных на фиг. 21, и для повышения удобства номера позиций не показаны для каждой трубки. Это описание следует понимать как указание на то, что каждая трубка, показанная в каналах 2104, представляет собой трубку 2108, содержащую отражающий нейтроны материал 2106, даже те трубки, которые не имеют номеров позиций.

Как обсуждалось выше, в некоторых вариантах выполнения отражатели или части отражателей могут быть полностью твердыми при рабочих температурах, например, между 300-350 и 800°C, или могут представлять собой жидкий отражающий материал, заключенный в закрытый контейнер, в котором стенки контейнера являются твердыми при рабочей температуре. Примеры материалов с твердым отражателем включают уран, уран-вольфрам, карбиды урана или урана-вольфрама, а также оксид магния. Примерами материалов отражателей, которые могут быть использованы в качестве жидкого теплоносителя, являются свинец, свинцовые сплавы, эвтектика Pb-Bi, PbO, сплавы железа и урана, включая эвтектику железа и урана, графит, карбид вольфрама, денсаллой (densalloy), карбид титана, обедненные урановые сплавы, тантал-вольфрам и вольфрамовые сплавы. В еще одном варианте выполнения в качестве отражающего материала может использоваться топливная соль. В одном варианте выполнения жидкий теплоноситель содержит материалы, которые являются жидкостями при рабочей температуре реактора и имеют плотность более 10 г/см³. В альтернативном варианте выполнения жидкий теплоноситель содержит материалы, которые являются жидкостями при рабочей температуре реактора и которые имеют другое сечение рассеяния в 0,1 барн или более для нейтронов с энергией 0,001 МэВ.

Как обсуждалось выше, примеры жидких ядерных топлив включают соли, содержащие один или несколько из PuCl₃, UCl₄, UCl₃F, UCl₃, UCl₂F₂, UClF₃, бромидные топливные соли, такие как UBr₃ или UBr₄, и хлориды тория (например, ThCl₄). Кроме того, топливная соль может включать одну или несколько не делящихся солей, таких как, но не ограничиваясь ими, NaCl, MgCl₂, CaCl₂, BaCl₂, KCl, SrCl₂, VCl₃, CrCl₃, TiCl₄, ZrCl₄, ThCl₄, AcCl₃, NpCl₄, AmCl₃, LaCl₃, CeCl₃, PrCl₃ и/или NdCl₃. 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 было прямо сказано, теплообменники обычно будут представлены в этом описании в терминах простых однопроходных, кожухотрубных теплообменников, имеющих набор трубок и с трубными решетками с обоих концов. Однако следует понимать, что в общем случае может быть использована любая конструкция теплообменника, хотя некоторые конструкции могут быть более подходящими, чем другие. Например, в дополнение к кожухотрубным теплообменникам могут также использоваться пластинчатые, кожухопластинчатые, пластинчатые теплообменники с вытравленными каналами и пластинчато-ребристые теплообменники.

Фиг. 22 изображает вид в разрезе варианта выполнения реактора 2200 с использованием циркулирующего отражающего материала. На иллюстрации показана половина реактора 2200 от центра к левому краю защитной оболочки 2218 реактора. Реактор 2200 содержит активную зону 2204, ограниченную верхним отражателем 2208А, нижним отражателем 2208В и внутренним отражателем 2208С. В показанном варианте выполнения нижний отражатель 2208В также проходит в боковом направлении и вверх по

сторонам защитной оболочки 2218 для дополнительной защиты крышки 2238 корпуса. Первичный теплообменник 2210 выполнен с возможностью вмещения потока теплоносителя в межтрубном пространстве (показан пунктиром 2214), причем теплоноситель поступает через впускной канал 2230 для теплоносителя, а нагретый теплоноситель выходит из выпускного канала 2236 для теплоносителя. В показанном варианте выполнения топливо протекает (проиллюстрировано пунктирными линиями 2206) из активной зоны 2204 реактора по верхнему каналу через внутренний отражатель 2208С и в теплообменник 2210 через входную трубную решетку 2232. После прохождения через трубный пучок теперь охлажденное топливо выходит из нижней трубной решетки 2231 и возвращается обратно в активную зону 2204 реактора по нижнему каналу через внутренний отражатель 2208С. Поток топлива приводится в действие насосным узлом 2212, который содержит крыльчатку в топливном контуре (в этом варианте выполнения показан ниже нижней трубной решетки 2231), соединенную валом с двигателем (в этом варианте выполнения расположенным над верхним отражателем 2208А).

На фиг. 22 отражатели 2208А, 2208В, 2208С проточно сообщаются, обеспечивая возможность циркуляции жидкого отражающего материала вокруг активной зоны 2204 реактора. Поток отражающего материала показан на фиг. 22 большими серыми стрелками 2234. В изображенном варианте выполнения отражающий материал протекает через впускное отверстие в крышке 2238 корпуса в реактор 2200 вдоль внутренней поверхности защитной оболочки 2218 реактора, а затем вдоль нижней части защитной оболочки 2218, перед тем как начать подниматься, и делает разворот на 180° для протекания вблизи нижней части активной зоны 2204 реактора. Затем отражающий материал протекает через внутренний отражатель 2208С, затем в верхний отражатель 2208А, из которого он может быть удален через выпускное отверстие в крышке 2238 корпуса или рециркулирован к внутренней поверхности защитной оболочки 2218 реактора.

Циркулирующий отражающий материал на фиг. 22 может использоваться для облегчения охлаждения активной зоны 2204. В этой конфигурации нагретый отражающий материал может быть удален из защитной оболочки 2218 реактора и пропущен через теплообменник (не показан), внешний по отношению к реактору 2200. В одном варианте выполнения для удаления тепла из отражающего материала может также использоваться тот же первичный охлаждающий контур, который удаляет тепло непосредственно из топлива через теплообменник 2210. В альтернативном варианте выполнения отдельная независимая система охлаждения может использоваться для удаления тепла из отражающего материала, который может использовать один и тот же тип теплоносителя в качестве первичного теплоносителя или другой тип теплоносителя. В еще одном варианте выполнения охлаждение отражающего материала может быть включено во вспомогательную систему охлаждения, которая обеспечивает аварийное охлаждение отражающего материала в случае потери потока в первичном охлаждающем контуре.

В показанном варианте выполнения, когда отражающий материал является частью охлаждающего контура, преимуществом конфигурации, показанной на фиг. 22, является то, что защитная оболочка реактора активно охлаждается и защищается от избыточного потока нейтронов. Поскольку охлажденный отражающий материал сначала течет по внутренним поверхностям защитной оболочки 2218 реактора, перед протеканием в места вблизи активной зоны 2204 реактора можно использовать начальную температуру охлаждаемого отражающего материала, чтобы контролировать температуру защитной оболочки 2218.

В еще одном варианте выполнения на наружной поверхности защитной оболочки 2218 может быть предусмотрена охлаждающая рубашка (не показана), которая служит для удаления тепла из циркулирующего отражающего материала на внутренней поверхности защитной оболочки 2218 реактора. Это может быть выполнено в дополнение к или вместо наружного охлаждающего контура для отражающего материала.

Как описано выше, полную отражательную способность конструкции отражателя, показанной на фиг. 22, можно контролировать, контролируя скорость потока отражающего материала через отражатели, а также путем вставления или удаления стержней или других элементов, содержащих замедляющие материалы или материалы с отражательной способностью, отличной от отражательной способности циркулирующего отражающего материала.

Фиг. 23 иллюстрирует вариант выполнения реактора с теплообменником с конфигурацией топлива в межтрубном пространстве/первичного теплоносителя в трубном пространстве, используя тот же вид в поперечном разрезе, показывающий половину реактора, как и на фиг. 22. Активная зона 2304 реактора окружена верхним отражателем 2308А, нижним отражателем 2308В и внутренним отражателем 2308С, который отделяет активную зону реактора от первичного теплообменника 2310. В отражателях 2308А, 2308В, 2308С предусмотрены каналы, которые обеспечивают возможность циркуляции топливной соли (проиллюстрировано пунктирной линией 2306) из активной зоны 2304 реактора через внутренний отражатель 2308С в оболочку первичного теплообменника 2310. Топливо течет через оболочку вокруг набора трубок, перенося, тем самым, тепло к первичному теплоносителю. Охлажденное топливо затем выходит из оболочки и проходит через внутренний отражатель 2308С обратно в нижнюю часть активной зоны 2304 реактора. В оболочке предусмотрены перегородки 2312, чтобы заставить топливную соль следовать по обходному пути вокруг трубок теплообменника для более эффективной теплопередачи.

Теплоноситель протекает через трубное пространство теплообменника 2310, но перед тем, как войти в дно теплообменника, сначала проходит через выпускное отверстие в крышке 2338 корпуса вниз по длине впускного канала 2330 для теплоносителя вблизи части нижнего отражателя 2308В. Первичный теплоноситель поступает в трубки теплообменника 2310, протекая через нижнюю трубную решетку 2331, которая показана как находящаяся на дне активной зоны реактора. Нижняя трубная решетка 2331 может находиться на уровне нижнего отражателя 2308В или ниже уровня нижнего отражателя в зависимости от варианта выполнения. Теплоноситель выходит из трубок теплообменника у верхней трубной решетки 2332, которая на фиг. 23 показана расположенной на некотором расстоянии выше активной зоны 2304 реактора и защитной оболочки 2318 реактора. Поток теплоносителя также проиллюстрирован пунктирной линией 2314.

На фиг. 23 показана область 2334 внутри корпуса теплообменника, которая находится выше уровня соли в активной зоне 2304 реактора. Эта область может быть либо твердой, за исключением проникающих трубок, либо может представлять собой свободное пространство, заполненное инертным газом.

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 обоих впускных каналах для нагретой топливной соли в верхней части активной зоны 2304 реактора или (как более подробно описано ниже) в выпускных каналах для охлажденного топлива на дне активной зоны 2304 реактора. Аналогично, крыльчатка может быть установлена во впускном канале 2330 для теплоносителя, чтобы способствовать регулированию потока первичного теплоносителя.

На фиг. 23 отражатели 2308А, 2308В, 2308С находятся в проточном сообщении, позволяя циркулировать жидкому отражающему материалу вокруг активной зоны 2304 реактора. Поток отражающего материала показан на фиг. 23 большими серыми стрелками 2334. В показанном варианте выполнения отражающий материал поступает в реактор 2300 через выпускное отверстие в крышке 2338 корпуса, а затем вдоль внутренней поверхности стороны защитной оболочки 2318 реактора в канал отражателя. Канал отражателя затем следует по дну защитной оболочки 2318 реактора, перед тем, как совершить разворот и начать подниматься, чтобы протекать рядом с дном активной зоны 2304 реактора. Затем отражающий материал протекает через внутренний отражатель 2308С и в верхний отражатель 2308А, из которого он может быть удален в центральном положении через выпускное отверстие в крышке 2338 корпуса, как показано, или может рециркулировать к внутренней поверхности защитной оболочки 2318 реактора.

Как обсуждено со ссылкой на фиг. 22, циркулирующий отражающий материал, показанный на фиг. 23, может быть использован для облегчения охлаждения активной зоны 2304 реактора. В этой конфигурации нагретый отражающий материал может быть удален из защитной оболочки 2318 реактора и пропущен через теплообменник (не показан) снаружи реактора 2300. Когда отражающий материал является частью охлаждающего контура, преимущество конфигурации, показанной на фиг. 23, заключается в том, что защитная оболочка реактора активно охлаждается и защищается от избыточного потока нейтронов. Поскольку охлажденный отражающий материал сначала протекает по внутренним поверхностям защитной оболочки 2318 реактора, перед тем как протечет в места вблизи активной зоны 2304 реактора, можно использовать начальную температуру охлажденного отражающего материала, чтобы управлять температурой защитной оболочки 2318 реактора.

Как описано выше, полной отражательной способностью конструкции отражателя, показанной на фиг. 23, можно управлять, управляя скоростью потока отражающего материала через отражатели, а также путем вставления или удаления стержней или других компонентов, содержащих замедляющие материалы или материалы с отличной отражательной способностью по сравнению с отражающим материалом.

Как обсуждалось выше, еще один подход к охлаждению реактора заключается в использовании жидкого отражателя в качестве первичного теплоносителя. В этой конструкции первичный теплоноситель выполняет как функцию отражателей, так и функцию первичного охлаждения. В варианте выполнения отражающий материал будет жидким при минимальной рабочей температуре топливной соли (например, между 300 и 800°C) и имеет плотность более 10 г/см³. В альтернативном варианте выполнения отражающий материал может представлять собой материал, имеющий низкое поперечное сечение поглощения нейтроном и высоким поперечным сечением рассеяния нейтронов, и который может подвергаться (n, 2n) реакциям.

Фиг. 24 изображает такой вариант выполнения реактора с охлажденным отражателем. В варианте выполнения половина реактора 2400 показана в поперечном разрезе, как на фиг. 22 и 23. Активная зона 2404 реактора окружена верхним отражателем 2408А, нижним отражателем 2408В. Расплавленный отражающий материал, такой как свинец, протекает через впускной канал для теплоносителя, как показано серой стрелкой 2414, работает как внутренний отражатель 2408С, а также как первичный теплоноситель.

Для циркуляции отражающего материала может быть использована система любого типа. В варианте выполнения, показанном, например, на фиг. 24, во впускном канале для охлажденного материала предусмотрен насос 2413, как описано со ссылкой на фиг. 22. Такой насос 2413 может быть расположен таким образом, чтобы крыльчатка находилась в любом удобном месте в отражающем нейтроны охла-

дающем контуре, чтобы содействовать или осуществлять циркуляцию жидкого отражающего нейтроны теплоносителя.

В показанном варианте выполнения топливо находится в межтрубном пространстве, а отражающий материал, который также является теплоносителем, находится в трубном пространстве. Оболочка и трубки изготовлены из некоторого конструкционного материала, который является твердым при рабочих температурах. Циркуляция топливной соли (проиллюстрировано пунктирной линией 2406) осуществляется из активной зоны 2404 реактора в межтрубное пространство первичного теплообменника 2410 и через него и обратно в дно активной зоны 2404 реактора. В оболочке предусмотрены перегородки 2412, чтобы заставить топливную соль следовать по обходному пути вокруг трубок теплообменника.

Отражатель/теплоноситель протекает через трубное пространство теплообменника 2410, но перед тем, как войти в дно теплообменника, сначала протекает по длине впускного канала для теплоносителя вблизи сторон и дна защитной оболочки 2418 реактора. В варианте выполнения на внутренней поверхности защитной оболочки реактора может образовываться твердый слой отражающего материала, особенно если наружная сторона защитной оболочки 2418 реактора охлаждается. Это приемлемо, если это не мешает потоку отражателя/теплоносителя. Затем отражатель/теплоноситель поступает в трубки теплообменника, протекая через нижнюю трубную решетку 2431, которая показана как расположенная на дне активной зоны 2404 реактора. Отражатель/теплоноситель выходит из трубок теплообменника у верхней трубной решетки 2432, которая на фиг. 24 показана расположенной на некотором расстоянии выше активной зоны 2404 реактора и защитной оболочки 2418 реактора.

На фиг. 24 показана область 2434 внутри корпуса теплообменника, которая находится выше уровня топливной соли в активной зоне 2404 реактора. Эта область может быть заполнена, за исключением проникающих трубок, любым отражающим или замедляющим материалом, например заполнена другим или тем же самым отражающим материалом, что и отражатель/теплоноситель.

На фиг. 24 верхний отражатель 2408А и нижний отражатель 2408В показаны как отличающиеся от циркулирующего отражающего материала/теплоносителя. В альтернативном варианте выполнения верхний отражатель 2408А, нижний отражатель 2408В и внутренний отражатель 2408С могут находиться друг с другом в проточном сообщении, как показано на фиг. 22 и 23. Например, отражающий материал может быть направлен в реактор 2400 вдоль внутренней поверхности стороны защитной оболочки 2418 реактора, как показано на чертеже, но затем направляется вдоль дна защитной оболочки 2418 реактора перед тем, как подняться и совершить разворот, чтобы протекать рядом с дном активной зоны 2404 реактора, как показано на фиг. 23. Отражающий материал также может быть направлен в верхний отражатель 2308А, из которого он может быть удален в центральном положении, как также показано на фиг. 23.

Для содействия циркуляции топливной соли или циркуляции отражателя/теплоносителя может быть предусмотрен насос (не показан) или, по меньшей мере, крыльчатка насоса. Например, крыльчатка может быть установлена в одном или обоих впускном отверстии для подогретой топливной соли первичного теплообменника в верхней части активной зоны 2404 реактора или (как более подробно описано ниже) в выпускном отверстии для охлажденного топлива корпуса первичного теплообменника на дне активной зоны 2404 реактора.

В еще одном варианте выполнения отражающий теплоноситель может проходить через верхний и нижний аксиальные отражатели, чтобы отводить любое тепло, выделяемое в этих отражателях, в циркуляционный контур, который отделен от первичного охлаждающего контура.

В еще одном варианте выполнения конструкции отражателя может быть предусмотрен "боковой экран зоны воспроизводства и выгорания", окружающий основную активную зону. В этом варианте выполнения может быть предусмотрен отражающий "экран", содержащий уран, либо как единственный отражатель, либо как второй отражатель, расположенный внутри (между активной зоной и первичным отражателем) или снаружи первичного отражателя. Уран в отражателе может быть как жидким, так и твердым, и может представлять собой металл на основе урана, оксид урана, соль урана или любое другое соединение урана. Уран в отражателе будет отражать нейтроны, но с течением времени будет порождать плутоний, становясь, таким образом, источником топлива.

Несмотря на прилагаемую формулу изобретения, раскрытое решение также определяется следующими положениями:

1. Ядерный реактор на расплавленном топливе, содержащий защитную оболочку и крышку, активную зону, заключенную внутри защитной оболочки и крышки реактора, причем активная зона реактора имеет верхнюю область и нижнюю область, теплообменник, заключенный внутри защитной оболочки реактора и крышки реактора, причем теплообменник выполнен с возможностью переноса тепла от жидкого топлива в активной зоне реактора к жидкому отражающему нейтроны теплоносителю.

2. Ядерный реактор по п.1, в котором отражающий нейтроны теплоноситель выбран из свинца, сплавов свинца, эвтектики свинца и висмута, оксида свинца, сплавов урана и железа, эвтектики железа и урана, графита, карбида вольфрама, денсаллоя, карбида титана, обедненных урановых сплавов, тантал-вольфрама и сплавов вольфрама.

3. Ядерный реактор по п.1, в котором отражающий нейтроны теплоноситель имеет сечение упругого рассеяния, равное 0,1 барн или более для нейтронов с энергией 0,001 МэВ.

4. Ядерный реактор по п.1, в котором отражающий нейтроны теплоноситель является жидким и имеет плотность более 10 г/см³ при рабочей температуре реактора.

5. Ядерный реактор по п.1, в котором теплообменник представляет собой кожухотрубный теплообменник.

6. Ядерный реактор по п.5, в котором жидкое топливо пропускается через корпус теплообменника, а жидкий отражающий нейтроны теплоноситель пропускается через трубки теплообменника.

7. Ядерный реактор по п.5, в котором жидкое топливо пропускается через трубки теплообменника, а жидкий отражающий нейтроны теплоноситель пропускается через корпус теплообменника.

8. Ядерный реактор по любому из пп.1-7, в котором теплообменник проточно соединен с верхней областью активной зоны реактора верхним каналом и проточно соединен с нижней областью активной зоны реактора нижним каналом, причем активная зона реактора, теплообменник и верхний и нижний каналы образуют топливный контур.

9. Ядерный реактор по любому из пп.1-8, дополнительно содержащий впускное отверстие для жидкого отражающего теплоносителя в крышке реактора, которое проточно соединено с теплообменником и в которое поступает охлажденный жидкий отражающий нейтроны теплоноситель, и выпускное отверстие для жидкого отражающего теплоносителя в крышке реактора, которое проточно соединено с теплообменником и из которого выпускается нагретый жидкий отражающий нейтроны теплоноситель.

10. Ядерный реактор по любому из пп.1-9, дополнительно содержащий впускной внутренний канал для переноса теплоносителя, расположенный внутри и в контакте с первой частью защитной оболочки реактора между впускным отверстием для жидкого отражающего теплоносителя в крышке реактора и теплообменником, причем во впускной канал для переноса теплоносителя поступает охлажденный отражающий нейтроны теплоноситель из впускного отверстия для жидкого отражающего теплоносителя, охлаждая, тем самым, первую часть защитной оболочки реактора.

11. Ядерный реактор по п.10, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть боковой стенки защитной оболочки реактора.

12. Ядерный реактор по п.10, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть нижней стенки защитной оболочки реактора.

13. Ядерный реактор по п.10, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть боковой стенки и часть нижней стенки защитной оболочки реактора.

14. Ядерный реактор по любому из пп.1-13, в котором топливная соль включает одну или несколько из следующих делящихся солей: UF₆, UF₄, UF₃, ThCl₄, UBr₃, UBr₄, PuCl₃, UCl₄, UCl₃, UCl₃F или UCl₂F₂.

15. Ядерный реактор по любому из пп.1-14, в котором топливная соль включает одну или несколько из следующих не делящихся солей: NaCl, MgCl₂, CaCl₂, BaCl₂, KCl, SrCl₂, VCl₃, CrCl₃, TiCl₄, ZrCl₄, ThCl₄, AcCl₃, NpCl₄, AmCl₃, LaCl₃, CeCl₃, PrCl₃ или NdCl₃.

16. Ядерный реактор на расплавленном топливе, содержащий защитную оболочку и крышку, активную зону, заключенную внутри защитной оболочки и крышки реактора, причем активная зона реактора имеет верхнюю область и нижнюю область,

первый теплообменник, заключенный внутри защитной оболочки реактора и крышки реактора, причем теплообменник выполнен с возможностью переноса тепла от жидкого топлива в активной зоне реактора к первичному теплоносителю,

отражатель нейтронов, содержащий, по меньшей мере, некоторое количество отражающей нейтроны жидкости, и

систему циркуляции, которая обеспечивает циркуляцию указанного, по меньшей мере, некоторого количества отражающего нейтроны теплоносителя в нейтронном отражателе.

17. Ядерный реактор по п.16, в котором отражающая нейтроны жидкость выбрана из свинца, сплавов свинца, эвтектики свинца и висмута, оксида свинца, сплавов урана и железа, эвтектики железа и урана, графита, карбида вольфрама, денсаллоя, карбида титана, обедненных сплавов урана, тантал-вольфрама и сплавов вольфрама.

18. Ядерный реактор по пп.16 и 17, в котором отражающая нейтроны жидкость имеет сечение упругого рассеяния, равное 0,1 барн или более для нейтронов с энергией 0,001 МэВ.

19. Ядерный реактор по пп.16-18, в котором отражающая нейтроны жидкость является жидкой и имеет плотность более 10 г/см³ при рабочей температуре реактора.

20. Ядерный реактор по пп.16-19, дополнительно содержащий второй теплообменник, который удаляет тепло от нагретой отражающей нейтроны жидкости и выпускает охлажденную отражающую нейтроны жидкость.

21. Ядерный реактор по п.20, в котором второй теплообменник находится снаружи корпуса реактора.

22. Ядерный реактор по любому из пп.16-21, дополнительно содержащий впускное отверстие для жидкого отражающего теплоносителя в крышке реактора, которое проточно соединено с теплообменником и в которое поступает охлажденная жидкая отражающая нейтроны жидкость, и выпускное отверстие

для жидкого отражающего теплоносителя в крышке реактора, которое проточно соединено с теплообменником и из которого выпускается нагретая жидкая отражающая нейтроны жидкость.

23. Ядерный реактор по любому из пп.16-22, дополнительно содержащий впускной внутренний канал для переноса теплоносителя, расположенный внутри и в контакте с первой частью защитной оболочки реактора между впускным отверстием для жидкого отражающего теплоносителя и выпускным отверстием для жидкого отражающего теплоносителя, причем во впускной канал для переноса теплоносителя поступает охлажденная жидкая отражающая нейтроны жидкость из впускного отверстия для жидкого отражающего теплоносителя, охлаждая, тем самым, первую часть защитной оболочки реактора.

24. Ядерный реактор по п.23, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть боковой стенки защитной оболочки реактора.

25. Ядерный реактор по п.23, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть нижней стенки защитной оболочки реактора.

26. Ядерный реактор по п.23, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть боковой стенки и часть нижней стенки защитной оболочки реактора.

27. Ядерный реактор по любому из пп.16-26, 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 или UCl_2F_2 .

28. Ядерный реактор по любому из пп.16-27, 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 , $CrCl_3$, $TiCl_4$, $ZrCl_4$, $ThCl_4$, $AcCl_3$, $NpCl_4$, $AmCl_3$, $LaCl_3$, $CeCl_3$, $PrCl_3$ или $NdCl_3$.

Очевидно, что описанные здесь системы и способы хорошо адаптированы для достижения упомянутых целей и преимуществ, а также им присущих. Специалисты 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.

Несмотря на то, что различные варианты выполнения описаны для раскрытия настоящего решения, могут быть сделаны различные изменения и модификации, находящиеся в пределах объема, предусмотренного настоящим описанием. Могут быть сделаны многочисленные другие изменения, которые будут понятны специалистам и которые охватываются сущностью изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Ядерный реактор с расплавленным топливом, содержащий защитную оболочку и крышку; активную зону, заключенную внутри защитной оболочки и крышки реактора, причем активная зона реактора содержит топливную область с жидким топливом; теплообменник, заключенный внутри защитной оболочки реактора и крышки реактора, сборку динамического отражателя нейтронов, окружающую топливную область, расположенную в тепловом контакте с теплообменником, расположенным на противоположной от топливной области стороне сборки динамического отражателя, и содержащую циркулирующий в ней жидкий отражающий нейтроны материал, причем сборка динамического отражателя нейтронов выполнена с возможностью введения текучего замедляющего нейтроны материала и/или текучего поглощающего нейтроны материала в жидкий отражающий нейтроны материал для изменения его состава для управления характеристиками отражательной способности сборки динамического отражателя нейтронов, причем теплообменник выполнен с возможностью обмена теплом как с жидким топливом в активной зоне реактора, так и с жидким отражающим нейтроны материалом в сборке динамического отражателя нейтронов.
2. Ядерный реактор по п.1, в котором жидкий отражающий нейтроны материал выбран из свинца, сплавов свинца, эвтектики свинца и висмута, оксида свинца, сплавов урана и железа, эвтектики железа и урана, графита, карбида вольфрама, денсалоа, карбида титана, обедненных урановых сплавов, тантал-вольфрама и сплавов вольфрама.
3. Ядерный реактор по п.1, в котором жидкий отражающий нейтроны материал имеет сечение упругого рассеяния, равное 0,1 барн или более для нейтронов с энергией 0,001 МэВ.
4. Ядерный реактор по п.1, в котором жидкий отражающий нейтроны материал имеет плотность более 10 г/см³ при рабочей температуре реактора.
5. Ядерный реактор по п.1, в котором теплообменник представляет собой кожухотрубный теплообменник.
6. Ядерный реактор по п.5, в котором жидкое топливо пропускается через корпус теплообменника, а жидкий отражающий нейтроны материал пропускается через трубки теплообменника.
7. Ядерный реактор по п.5, в котором жидкое топливо пропускается через трубки теплообменника,

а жидкий отражающий нейтроны материал пропускается через корпус теплообменника.

8. Ядерный реактор по любому из пп.1-7, в котором теплообменник проточно соединен с верхней областью активной зоны реактора верхним каналом и проточно соединен с нижней областью активной зоны реактора нижним каналом, причем активная зона реактора, теплообменник и верхний и нижний каналы образуют топливный контур.

9. Ядерный реактор по любому из пп.1-7, дополнительно содержащий
впускное отверстие для жидкого отражающего нейтроны материала в крышке реактора, проточно соединенное с теплообменником, которое принимает охлажденный жидкий отражающий нейтроны материал; и

выпускное отверстие для жидкого отражающего нейтроны материала в крышке реактора, проточно соединенное с теплообменником, которое выпускает нагретый жидкий отражающий нейтроны материал.

10. Ядерный реактор по п.9, дополнительно содержащий

впускной канал для переноса жидкого отражающего нейтроны материала, расположенный внутри и в контакте с первой частью защитной оболочки реактора между указанным впускным отверстием в крышке реактора и теплообменником, причем впускной канал для переноса жидкого отражающего нейтроны материала принимает охлажденный отражающий нейтроны материал из указанного впускного отверстия, охлаждая, тем самым, первую часть защитной оболочки реактора.

11. Ядерный реактор по п.10, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть боковой стенки защитной оболочки реактора.

12. Ядерный реактор по п.10, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть нижней стенки защитной оболочки реактора.

13. Ядерный реактор по п.10, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть боковой стенки и часть нижней стенки защитной оболочки реактора.

14. Ядерный реактор по любому из пп.1-7, в котором жидкое топливо содержит топливную соль, включающую 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 или UCl_2F_2 .

15. Ядерный реактор по любому из пп.1-7, в котором жидкое топливо содержит топливную соль, включающую одну или несколько из следующих не делящихся солей: $NaCl$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $BaCl_2$, KCl , $SrCl_2$, VCl_3 , $CrCl_3$, $TiCl_4$, $ZrCl_4$, $ThCl_4$, $AcCl_3$, $NpCl_4$, $AmCl_3$, $LaCl_3$, $CeCl_3$, $PrCl_3$ или $NdCl_3$.

16. Ядерный реактор с расплавленным топливом, содержащий
защитную оболочку и крышку;

активную зону, заключенную внутри защитной оболочки и крышки реактора, причем активная зона реактора имеет верхнюю область и нижнюю область и содержит топливную область с жидким топливом; теплообменник, заключенный внутри защитной оболочки реактора и крышки реактора,

сборку динамического отражателя нейтронов, окружающую топливную область, расположенную в тепловом контакте с теплообменником, расположенным на противоположной от топливной области стороне сборки динамического отражателя;

систему циркуляции, которая обеспечивает циркуляцию жидкого отражающего нейтроны материала в сборке динамического отражателя нейтронов вокруг активной зоны реактора,

причем сборка динамического отражателя нейтронов также выполнена с возможностью введения текучего замедляющего нейтроны материала и/или текучего поглощающего нейтроны материала в жидкий отражающий нейтроны материал для изменения его состава для управления характеристиками отражательной способности сборки динамического отражателя нейтронов,

причем сборка динамического отражателя нейтронов выполнена с возможностью изменения скорости потока жидкого отражающего нейтроны материала для изменения времени контакта с теплообменником для изменения температуры отражающего нейтроны материала,

причем теплообменник выполнен с возможностью обмена теплом как с жидким топливом в активной зоне реактора, так и с жидким отражающим нейтроны материалом в сборке динамического отражателя нейтронов для переноса тепла от жидкого отражающего нейтроны материала в системе циркуляции.

17. Ядерный реактор по п.16, в котором жидкий отражающий нейтроны материал выбран из свинца, сплавов свинца, эвтектики свинца и висмута, оксида свинца, сплавов урана и железа, эвтектики железа и урана, графита, карбида вольфрама, денсаллоя, карбида титана, обедненных сплавов урана, тантал-вольфрама и сплавов вольфрама.

18. Ядерный реактор по п.16, в котором жидкий отражающий нейтроны материал имеет сечение упругого рассеяния, равное 0,1 барн или более для нейтронов с энергией 0,001 МэВ.

19. Ядерный реактор по п.16, в котором жидкий отражающий нейтроны материал имеет плотность более 10 г/см³ при рабочей температуре реактора.

20. Ядерный реактор по п.16, дополнительно содержащий второй теплообменник, который удаляет тепло от нагретого жидкого отражающего нейтроны материала и выпускает охлажденный отражающий нейтроны материал.

21. Ядерный реактор по п.20, в котором второй теплообменник находится снаружи корпуса реактора.

22. Ядерный реактор по любому из пп.16-21, дополнительно содержащий впускное отверстие для жидкого отражающего нейтроны материала в крышке реактора, проточно соединенное с теплообменником, которое принимает охлажденный жидкий отражающий нейтроны материал; и

выпускное отверстие для жидкого отражающего нейтроны материала в крышке реактора, проточно соединенное с теплообменником, которое выпускает нагретый жидкий отражающий нейтроны материал.

23. Ядерный реактор по п.22, дополнительно содержащий

впускной канал для переноса жидкого отражающего нейтроны материала, расположенный внутри и в контакте с первой частью защитной оболочки реактора между указанным впускным отверстием и указанным выпускным отверстием, причем впускной канал для переноса жидкого отражающего нейтроны материала принимает охлажденный жидкий отражающий нейтроны материал из указанного впускного отверстия, охлаждая, тем самым, первую часть защитной оболочки реактора.

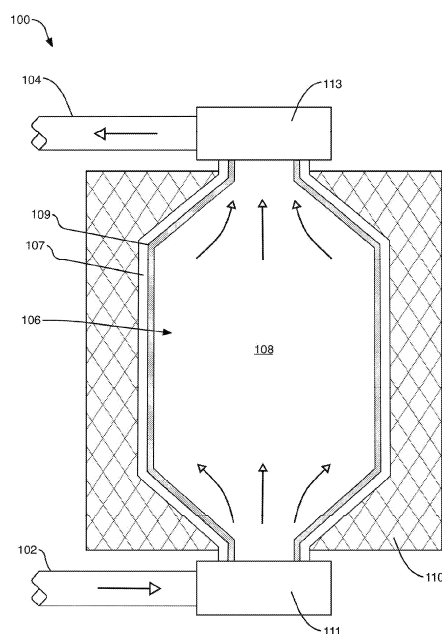
24. Ядерный реактор по п.23, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть боковой стенки защитной оболочки реактора.

25. Ядерный реактор по п.23, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть нижней стенки защитной оболочки реактора.

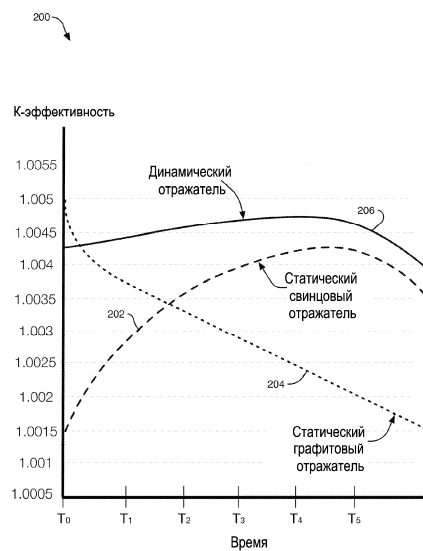
26. Ядерный реактор по п.23, в котором первая часть защитной оболочки реактора содержит по меньшей мере часть боковой стенки и часть нижней стенки защитной оболочки реактора.

27. Ядерный реактор по любому из пп.16-21, в котором жидкое топливо содержит топливную соль, включающую 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 или UCl_2F_2 .

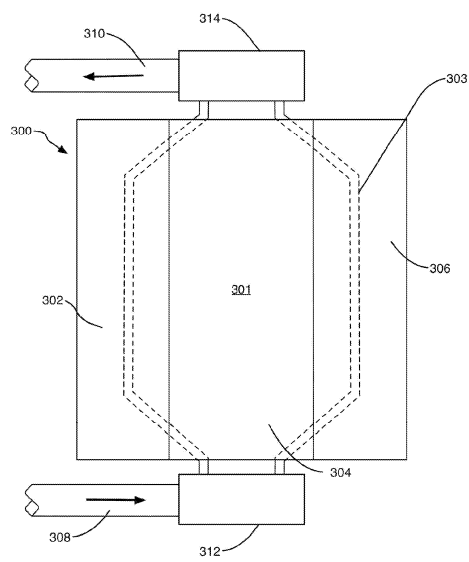
28. Ядерный реактор по любому из пп.16-21, в котором жидкое топливо содержит топливную соль, включающую одну или несколько из следующих не делящихся солей: $NaCl$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $BaCl_2$, KCl , $SrCl_2$, VCl_3 , $CrCl_3$, $TiCl_4$, $ZrCl_4$, $ThCl_4$, $AcCl_3$, $NpCl_4$, $AmCl_3$, $LaCl_3$, $CeCl_3$, $PrCl_3$ или $NdCl_3$.



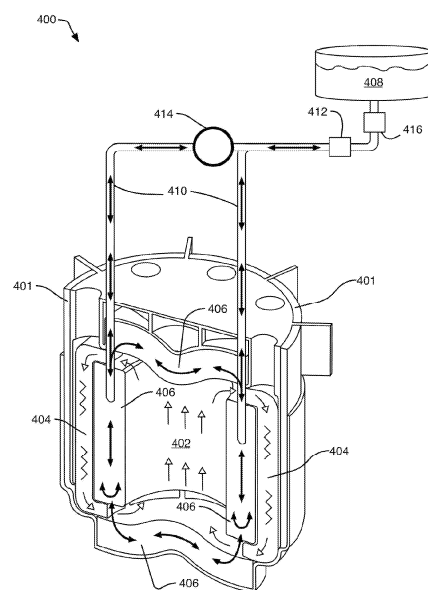
Фиг. 1



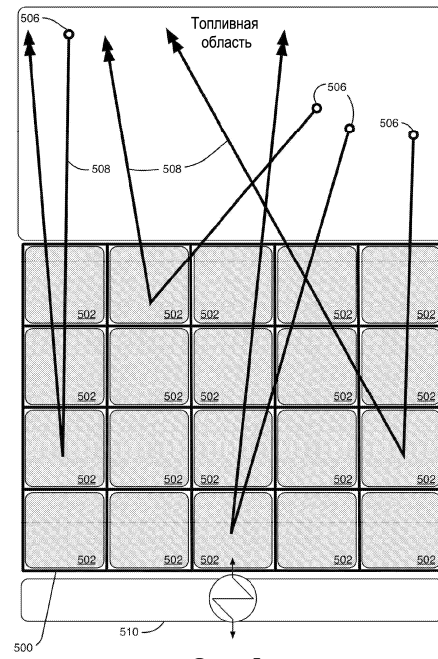
Фиг. 2



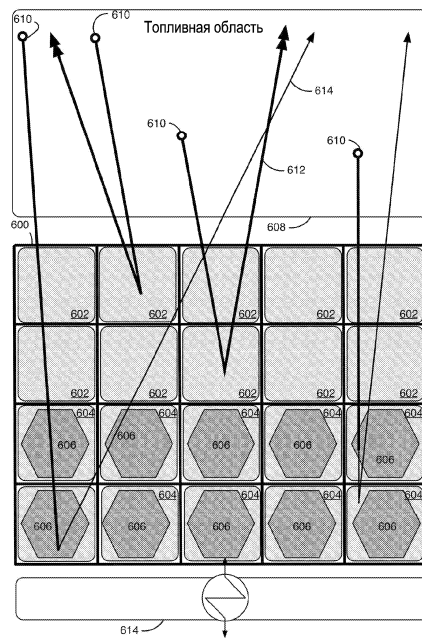
Фиг. 3



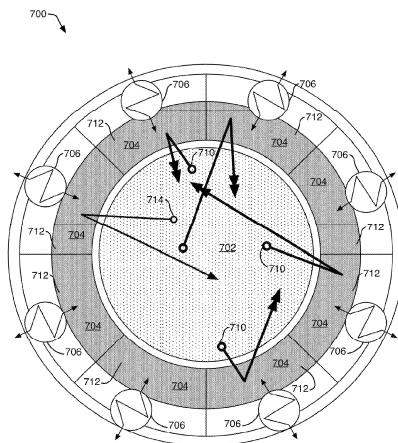
Фиг. 4



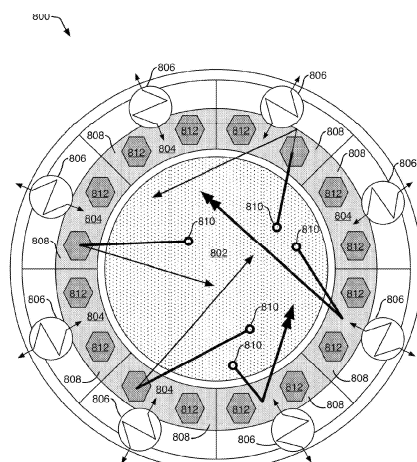
Фиг. 5



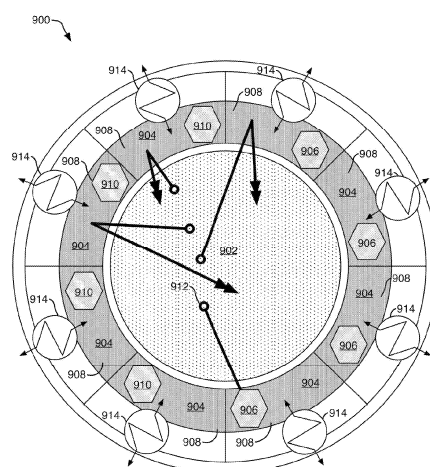
Фиг. 6



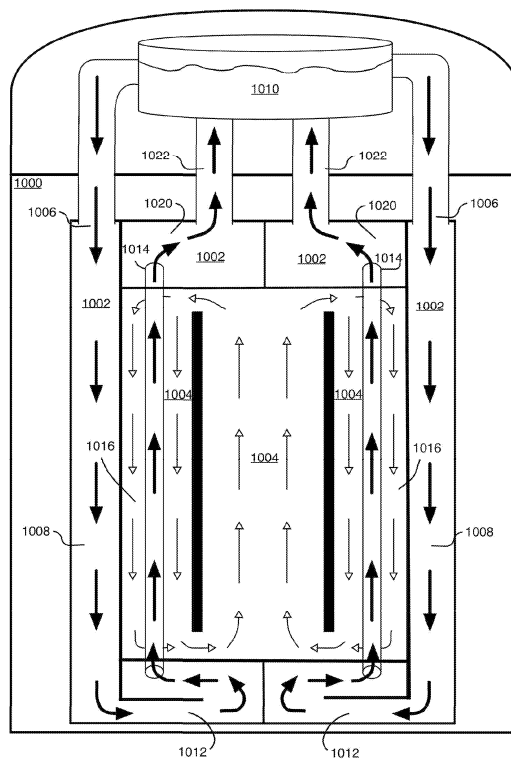
Фиг. 7



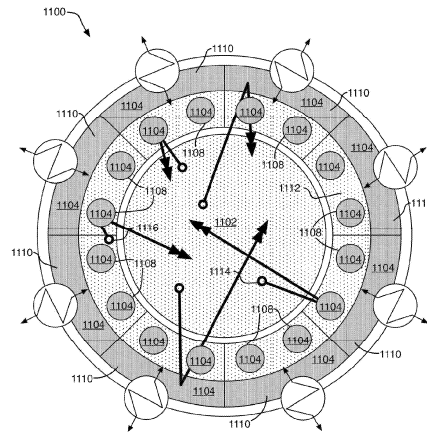
Фиг. 8



Фиг. 9

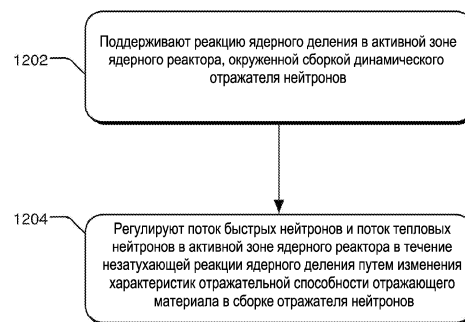


Фиг. 10



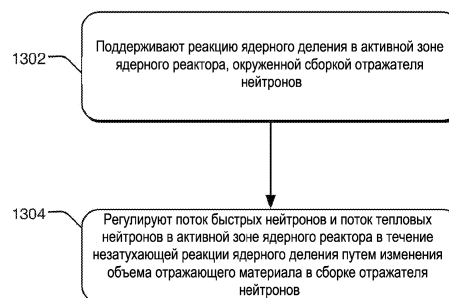
Фиг. 11

1200

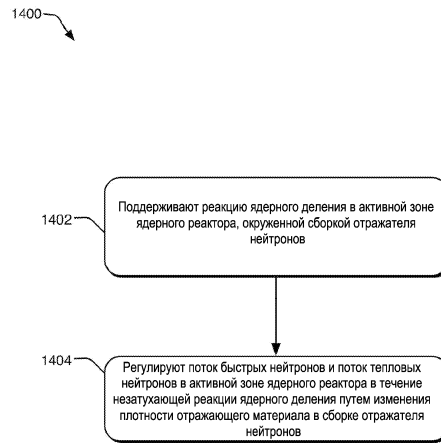


Фиг. 12

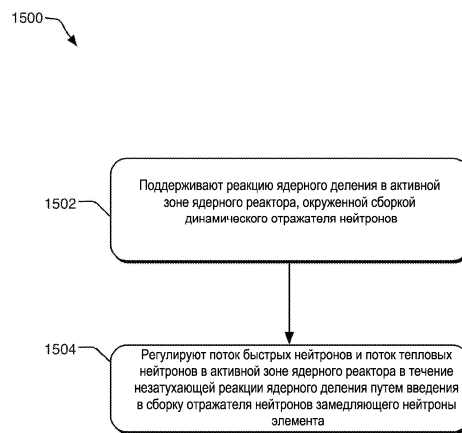
1300



Фиг. 13



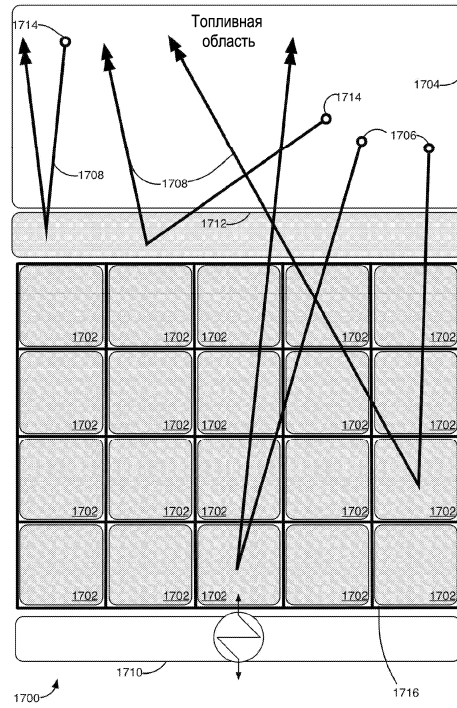
Фиг. 14



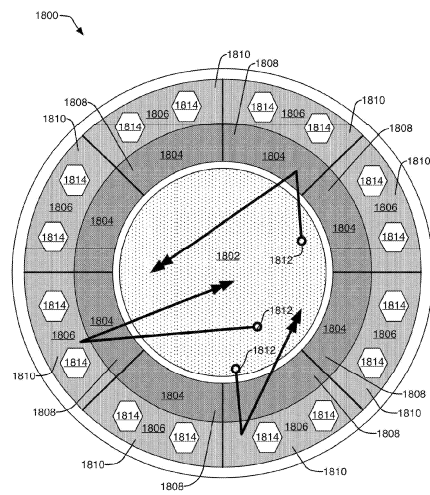
Фиг. 15



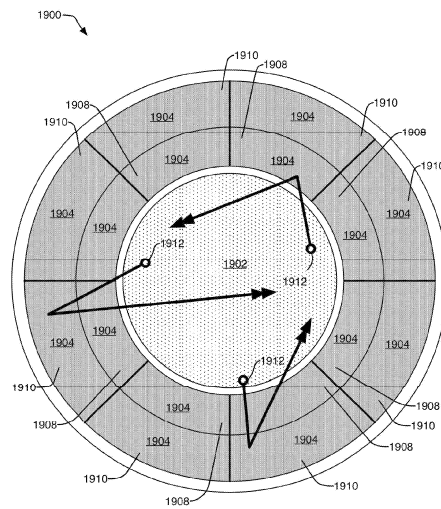
Фиг. 16



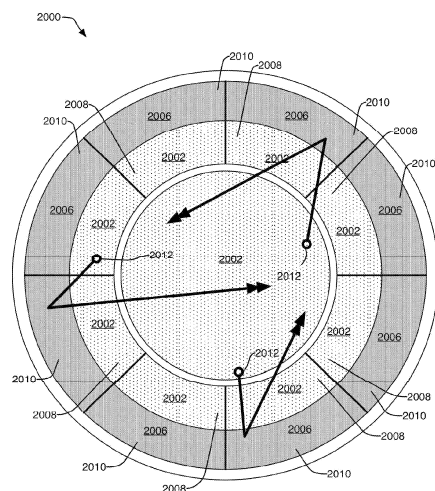
Фиг. 17



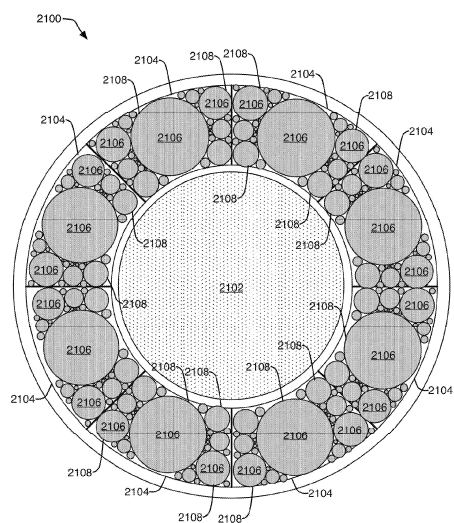
Фиг. 18



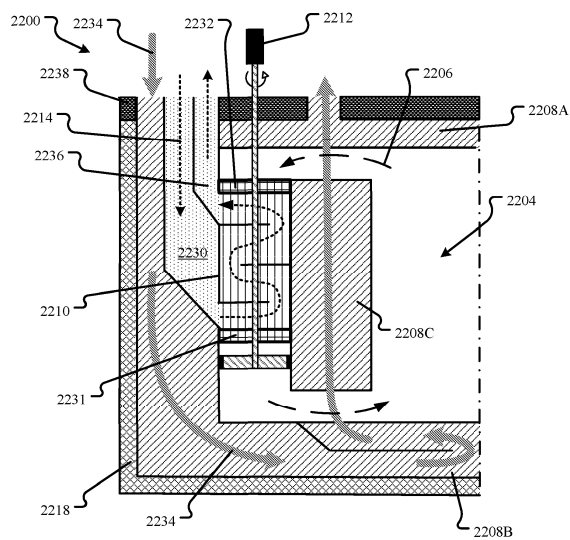
Фиг. 19



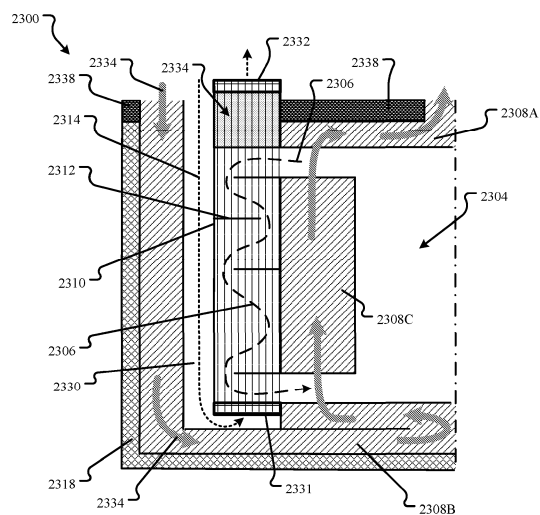
Фиг. 20



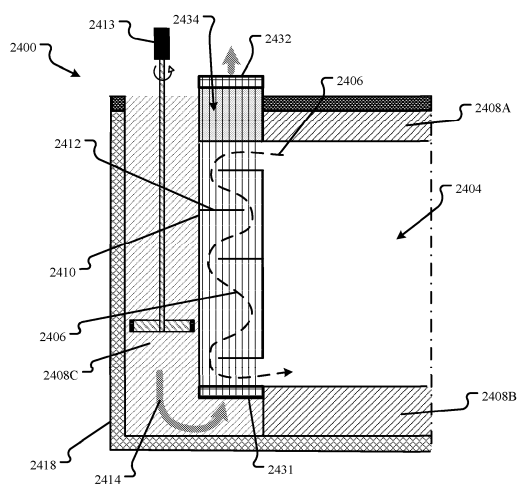
Фиг. 21



Фиг. 22



Фиг. 23



Фиг. 24

