

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **037489**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.04.02

(21) Номер заявки
201892168

(22) Дата подачи заявки
2017.05.02

(51) Int. Cl. **G21C 3/54 (2006.01)**
G21C 1/22 (2006.01)
G21C 17/06 (2006.01)

(54) **СОЛИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

(31) **62/330,695**

(32) **2016.05.02**

(33) **US**

(43) **2019.05.31**

(86) **PCT/US2017/030672**

(87) **WO 2017/192611 2017.11.09**

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

(72) Изобретатель:
**Червински Кен, Эль-Дашер Бассем С.,
Керлин Уилльям М., Крамер Кевин,
Латковски Джеффри Ф., Петроски
Роберт К., Уолтер Джошуа К.,
Сиснерос Ансельмо Т., м.л., Келлехер
Брайан К. (US)**

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

(56) **US-A1-2016189806**
GB-A-2508537

(57) В изобретении описаны соли ядерного топлива, применимые в некоторых конструкциях реакторов на расплавленных солях, и связанные с ними системы и способы. Описаны двойные, тройные и четверные хлористые топливные соли урана, а также других делящихся элементов. Кроме того, описаны топливные соли UCl_xF_y , а также бромистые соли. В этом изобретении также представлены способы и системы для получения таких топливных солей, для создания солей, которые снижают коррозию элементов реактора, и для создания топливных солей, которые не пригодны для применения в средствах вооружения.

037489
B1

037489
B1

Данная заявка подана в виде международной патентной заявки РСТ 2 мая 2017 г. и по ней испрашивается приоритет по дате предварительной заявки US 62/330695, поданной 2 мая 2016 г., которая включена в данный документ посредством ссылки.

Введение

Использование расплавленного топлива в ядерном реакторе для производства энергии обеспечивает значительные преимущества по сравнению с твердым топливом. Например, реакторы на расплавленном топливе в общем обеспечивают более высокие плотности энергии по сравнению с твердотопливными реакторами, при этом ограничивая процессы производства топлива, которые являются необходимыми в конструкции твердых топлив. Реакторы на расплавленном топливе также могут обеспечить более высокий уровень выгорания топлива в данном реакторе, даже в системах, не включающих очистку соли.

Расплавленное топливо на основе фторидной соли, подходящее для использования в ядерных реакторах, было разработано с использованием тетрафторида урана (UF_4), смешанного с другими фторидными солями. Например, топливная соль на основе UF_4 может содержать смесь LiF , BeF_2 , ThF_4 и UF_4 . Следует отметить, что в таком семействе составов топливных солей на основе UF_4 содержание тяжелых металлов может составлять приблизительно от 40 до 45 мас.%, и соли могут иметь температуру плавления приблизительно $500^\circ C$.

Соли ядерного топлива

В этом изобретении описывают конкретные воплощения тройных солей хлорида урана, применимых в качестве ядерного топлива в определенных конструкциях реактора на расплавленных солях. Когда в данной патентной заявке описывают широкий диапазон двойных, тройных и четверных топливных солей хлорида урана, а также другие родственные технологии, это изобретение направлено на воплощения топливных солей, которые определены как особенно подходящие для определенных конструкций реактора.

В одном аспекте топливные соли этого изобретения включают тройные топливные соли UCl_3 , UCl_4 и $NaCl$, имеющие температуру плавления менее $600^\circ C$, содержащие от 1 до 50 моль.% UCl_4 , имеющие плотность урана более $1,5 \text{ г/см}^3$ и удельную теплоемкость более $600 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ C)$. Воплощения топливных солей могут иметь температуры плавления менее $600^\circ C$, $550^\circ C$, $500^\circ C$, $450^\circ C$, $400^\circ C$ или даже $350^\circ C$. Воплощения топливных солей могут иметь плотность урана более $1,5 \text{ г/см}^3$, $1,6 \text{ г/см}^3$, $1,7 \text{ г/см}^3$, $1,8 \text{ г/см}^3$, $1,9 \text{ г/см}^3$, 2 г/см^3 или даже $2,1 \text{ г/см}^3$. Воплощения топливных солей могут иметь удельную теплоемкость более $600 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ C)$, $700 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ C)$, $800 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ C)$ или даже $900 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ C)$.

Воплощения топливных солей также могут содержать пониженное количество UCl_4 (относительно 17 UCl_3 -71 UCl_4 -12 $NaCl$). Помимо описанных выше свойств, такие воплощения топливных солей могут содержать менее 50 моль.% UCl_4 , менее 40 моль.%, 30 моль.%, 20 моль.%, 15 моль.% или даже менее 10 моль.% UCl_4 . Воплощения топливных солей урана содержат UCl_4 в количестве от 1 до 50 моль.% UCl_4 . Воплощения топливных солей содержат UCl_3 в количестве от 1 до 33 моль.% UCl_3 . Воплощения топливных солей содержат мольную долю $NaCl$, в которой делящаяся топливная соль составляет от 40 до 66 моль.% $NaCl$.

Таким образом, в одном аспекте изобретения предложена ядерная реакторная установка для выработки энергии из ядерной реакции, содержащая

активную зону реактора, содержащую делящуюся урановую хлористую топливную соль, включающую от 1 до 50 моль.% UCl_4 , от 1 до 33 моль.% UCl_3 , от 40 до 66 моль.% $NaCl$ и имеющую температуру плавления менее $600^\circ C$, и

теплообменник, выполненный для переноса тепла из топливной соли к теплоносителю.

В предпочтительном воплощении указанная делящаяся урановая хлористая топливная соль представляет собой 30% UCl_3 , 10% UCl_4 , 60% $NaCl$, в еще одном варианте она представляет собой 30% UCl_3 , 11% UCl_4 , 59% $NaCl$.

В еще одном воплощении указанная делящаяся урановая хлористая топливная соль имеет теплоемкость более $600 \text{ Дж/(кг}\cdot^\circ C)$.

Предпочтительно температура плавления делящейся урановой хлористой топливной соли составляет от 338 до $550^\circ C$.

В еще одном воплощении указанная делящаяся урановая хлористая топливная соль представляет собой смесь хлористых солей, в которой хлорид-ионы в хлористых солях имеют первое отношение ^{37}Cl к общему количеству Cl , причем первое отношение отлично от природного отношения ^{37}Cl к общему количеству Cl . Предпочтительно 25% или более хлорид-ионов в смеси хлористых солей являются ^{37}Cl .

В еще одном воплощении указанная делящаяся урановая хлористая топливная соль представляет собой смесь UCl_4 , UCl_3 , $NaCl$ и одного или более из UCl_3F , UCl_2F_2 , $UClF_3$, $PuCl_3$, $ThCl_4$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $BaCl_2$, KCl , $SrCl_2$, VCl_3 , $CrCl_3$, $TiCl_4$, $ZrCl_4$, $ThCl_4$, $AcCl_3$, $NpCl_4$, $AmCl_3$, $LaCl_3$, $CeCl_3$, $PrCl_3$ и/или $NdCl_3$.

В еще одном воплощении указанная делящаяся урановая хлористая топливная соль представляет собой смесь UCl_4 , UCl_3 , $NaCl$ и по меньшей мере одного лантанида, причем делящаяся топливная соль имеет показатель качества менее 1,0.

В еще одном воплощении изобретения контактирующие с солью элементы реактора снабжены об-

лицовкой из никеля или никелевого сплава.

В еще одном воплощении мольная доля UCl_4 в указанной делящейся урановой хлористой топливной соли составляет от 2 до 30 моль.% UCl_4 , предпочтительно составляет от 5 до 20 моль.% UCl_4 , более предпочтительно от 8 до 12 моль.% UCl_4 .

В еще одном аспекте изобретения предложена делящаяся урановая топливная соль, содержащая

от 1 до 50 моль.% UCl_4 ;

от 1 до 33 моль.% UCl_3 ;

от 40 до 66 моль.% $NaCl$;

причем делящаяся топливная соль имеет температуру плавления менее $600^\circ C$.

Эти и различные другие признаки, а также преимущества, которые характеризуют описанные в данном документе системы и способы, станут ясными из прочтения следующего подробного описания и обзора связанных с ним чертежей. Дополнительные признаки поясняют в последующем описании, и они частично станут ясными из описания или их можно изучить при практическом применении данной технологии. Преимущества и признаки технологии реализуют на практике и их достигают с помощью структуры, конкретно указанной в описании и формуле изобретения, а также на приложенных чертежах.

Необходимо понимать, что как вышеизложенное общее описание, так и последующее подробное описание являются пояснительными и предназначены для предоставления дополнительного объяснения заявленного изобретения.

Краткое описание чертежей

Нижеследующие чертежи, которые образуют часть этой заявки, представляют собой иллюстрацию описываемой технологии, и их не нужно понимать как ограничивающие каким-либо образом область защиты заявленного изобретения, которая должна основываться на приложенной формуле изобретения.

На фиг. 1A-1G в общем описаны новые воплощения ядерного реактора на расплавленных солях для работы в режиме бегущей волны на быстрых нейтронах,

на фиг. 2 - различные конфигурации ядерного реактора на расплавленных солях,

на фиг. 3 - воплощение способа создания топлива, спроектированного для конкретного реактора,

на фиг. 4 - тройная фазовая диаграмма, рассчитанная для топливных солей UCl_3 - UCl_4 - $NaCl$,

на фиг. 5 - смоделированный k_{eff} в зависимости от времени для большей активной зоны реактора, показанного на фиг. 1A-1F, с использованием композиции 66 $NaCl$ -34 UCl_3 ,

на фиг. 6 - технологическая схема, представляющая пример операций, относящихся к загрузке топлива в быстрый ядерный реактор на расплавленных солях в соответствии с одним или более воплощениями настоящего изобретения,

на фиг. 7 - поперечное сечение захвата (n, γ) для основных изотопов Cl и Br ,

на фиг. 8 - результаты моделирования для кривой размножения и выгорания для воплощения бромистой топливной соли 17 UBr_3 -71 UBr_4 -12 $NaBr$ и обогащения 19,99% ^{235}U ,

на фиг. 9 - воплощение способа изготовления содержащей UCl_4 топливной соли,

на фиг. 10 - воплощение согласованного способа изготовления содержащей UCl_4 топливной соли на основе способа фиг. 9,

на фиг. 11 - схематическое изображение контактирующих корпусов реакторов и их соединения, подходящие для применения при воплощении способа фиг. 10,

на фиг. 12 - воплощение способа снижения коррозии в ядерном реакторе с использованием расплавленного ядерного топлива,

на фиг. 13 перечислены некоторые сплавы с потенциальной применимостью в качестве материалов, контактирующих с топливной солью, в ядерном реакторе на расплавленных солях,

на фиг. 14 показан способ эксплуатации ядерного реактора на расплавленных солях,

на фиг. 15 - воплощение способа создания топливной соли, которая имеет ограниченное применение в средствах вооружения путем добавления одного или более радиоактивного изотопа,

на фиг. 16 - воплощение способа изготовления UCl_4 с использованием хлорида аммония. В показанном воплощении способа создают смесь твердого UO_2 и NH_4Cl при приготовлении урана,

на фиг. 17 - воплощение способа изготовления UCl_3F ,

на фиг. 18 - воплощение другого способа изготовления UCl_3F ,

на фиг. 19 - воплощение системы доочистки для доочистки топлива, в которой используют сливной бак,

на фиг. 20 - воплощение системы обработки отходящих газов, подходящей для использования при обработке газообразных продуктов деления, вырабатываемых реактором на расплавленных солях, например, в качестве системы обработки отходящих газов на фиг. 19,

на фиг. 21 - воплощение способа доочистки топливной соли на основе систем, описанных на фиг. 19 и 20,

на фиг. 22 - тройная фазовая диаграмма для топливных солей UCl_3 - UCl_4 - $NaCl$, где указано положение на диаграмме воплощения изготовленной топливной соли.

Подробное описание

В этом изобретении описаны воплощения солей ядерного топлива, применимых в определенных

конструкциях реактора на расплавленных солях и относящиеся к ним системы и способы. Описаны двойные, тройные и четверные хлоридные топливные соли урана, а также другие делящиеся элементы. Помимо этого описаны топливные соли UCl_xF_y , а также бромистые топливные соли. В этом описании также представлены способы и системы для изготовления таких топливных солей, для создания солей, которые снижают коррозию элементов реактора, и для создания топливных солей, которые не подходят для применения в средствах вооружения.

Настоящее изобретение относится к топливу быстрого ядерного реактора на бегущей волне, на расплавленных солях и способам изготовления, управления и применения топлива.

Большинство исторических и современных исследований, относящихся к ядерным реакторам деления на расплавленных солях, направлены на фтористые соли урана и тория. Расплавленные хлориды значительно отличаются от фтористых солей из-за нескольких ключевых аспектов. Во-первых, хлориды могут быть в некоторой степени менее замедляющими, чем фториды, в особенности, если хлориды обогащены изотопом ^{37}Cl . Во-вторых, хлориды предоставляют возможность использования очень высоких концентраций тяжелых металлов в смесях с разумными температурами плавления. Это является аспектом, который обеспечивает использование смесей хлористых солей урана в спектре быстрых нейтронов. Фтористые соли обычно содержат не более 10-12 моль.% тяжелого металла. Исторически предложенные смеси фтористых солей обычно имели молярные концентрации, составляющие 63-72 моль.% LiF (обогащенный до 99,997% 7Li), 16-25 моль.% BeF_2 , 6,7-11,7 моль.% ThF_4 и только 0,3 моль.% UF_4 (тяжелый металл составляет 40-45 мас.%). Такие соли плавилась при $500^\circ C$. Напротив, одно предложенное здесь воплощение хлористой соли имеет состав 17 UCl_3 -71 UCl_4 -12 $NaCl$ (62 мас.% тяжелого металла), и он также плавится при $500^\circ C$, как обсуждают более подробно ниже.

В некоторых воплощениях топлива по настоящему изобретению можно обеспечить равновесное или квазиравновесное поведение размножения и выгорания, при этом в других воплощениях обеспечивают неравновесное поведение размножения и выгорания без регенерации топливной соли. Это существенно, потому что в предшествующих конструкциях реакторов на расплавленных солях нельзя было достичь равновесного поведения размножения и выгорания без химического разделения топливной соли в реакторе, связанного с необходимостью постоянной химической регенерации топливной соли. Например, в настоящем изобретении описаны, но оно не ограничено этим, расплавленные хлористые топливные соли, подходящие для использования в реакторе на быстрых нейтронах, показывающем равновесное, квазиравновесное и/или неравновесное поведение размножения и выгорания. В воплощениях может требоваться небольшая регенерация или не требоваться никакой регенерации, и небольшая регенерация, которую можно использовать, может быть только физической регенерацией (например, физическим отделением побочных продуктов, в частности, с помощью барботажа газа и/или фильтрования). Различные воплощения расплавленной топливной соли по настоящему изобретению могут включать смеси первой соли хлорида урана, второй соли хлорида урана и/или дополнительных солей хлорида металла. В некоторых воплощениях настоящего изобретения обеспечивают расплавленную топливную соль, имеющую содержание тетрахлорида урана (UCl_4) более 5 моль.%, что способствует достижению высокого содержания тяжелых металлов в расплавленной топливной соли (например, более 61 мас.%), при этом поддерживая работоспособные температуры плавления. Включающие UCl_4 воплощения можно образовать посредством смеси UCl_4 и трихлорида урана (UCl_3) и/или дополнительного хлорида металла (например, $NaCl$), так что достигают требуемого содержания тяжелых металлов и температур плавления (например, $330-800^\circ C$).

Из-за высокого уровня делящегося содержимого, достигаемого посредством расплавленных солей по настоящему изобретению, и легкости доступа к расплавленной топливной соли, требуется обеспечить меры, препятствующие быстрому размножению по отношению к топливу по настоящему изобретению. В некоторых воплощениях настоящего изобретения обеспечивают расплавленную топливную соль, в которую предварительно вводят (т.е. вводят до начала работы) один или более выбранных лантанидов для увеличения активности исходной соли. Помимо этого, если их затем не отделяют, лантаниды действуют как поглотитель нейтронов в топливе и, таким образом, уменьшают приемлемость содержащего лантанидами топлива для средств вооружения.

Реакторы на расплавленных солях.

До более подробного обсуждения воплощений топливных солей будет полезно краткое обсуждение общих компонентов реакторов на расплавленных топливных солях для применения воплощений топливных солей. Фиг. 1A-1F в общем описывают новое воплощение ядерного реактора 100 на расплавленных солях для работы в режиме бегущей волны на быстрых нейтронах. Фиг. 2 описывает другую конфигурацию ядерного реактора 200 на расплавленных солях. Они представляют собой только примеры для обеспечения контекста обсуждения воплощений топлива, описываемых в данном документе, и читатель должен понимать, что потенциально любой ядерный реактор на расплавленных солях можно приспособить для применения описанных ниже воплощений топлива. Хотя различные фтористые соли можно использовать в ядерных реакторах на расплавленных солях так, как описано ниже, топливные соли на основе фторидов обычно показывают значительно более низкие концентрации тяжелых металлов, чем те, которых можно достичь с топливными солями на основе хлоридов и на основе хлоридов и фторидов, описан-

ных в настоящем изобретении.

На фиг. 1 показан упрощенный схематический вид быстрого ядерного реактора 100 на расплавленных солях согласно одному или более воплощений настоящего изобретения. В одном воплощении реактор 100 содержит активную зону 102 реактора. Активная зона 102 реактора (которую также можно назвать "корпусом реактора") содержит вход 104 для топлива и выход 106 для топлива. Вход 104 для топлива и выход 106 для топлива расположены так, что при эксплуатации через активную зону 102 реактора устанавливается поток расплавленной топливной соли 108. Например, вход 104 для топлива и/или выход 106 для топлива могут состоять из конических секций, действующих как сужающиеся или расширяющиеся сопла соответственно. В связи с этим, расплавленное топливо 108 перетекает через объем активной зоны 102 реактора от входа 104 к выходу 106 активной зоны 102 реактора. Хотя на фиг. 1А поток текучего топлива показан стрелками, нужно понимать, что направление потока можно изменить надлежащим образом для других конфигураций реактора и установки. Конкретно, на фиг. 1А показан поток текучего топлива 108 "снизу вверх" в центральной области активной зоны, а альтернативные устройства могут создавать и/или поддерживать поток текучего топлива сверху вниз в центральной области активной зоны.

Активная зона 108 реактора может иметь любую форму, подходящую для установления критичности в расплавленной топливной соли 108 внутри активной зоны 102 реактора. В качестве неограничивающего примера, реактор 100 может содержать, но не ограничиваться этим, удлиненную активную зону, как показано на фиг. 1А. Кроме того, активная зона 108 реактора может иметь любую форму поперечного сечения. В качестве неограничивающего примера активная зона 108 реактора может иметь, однако необязательно имеет, круговое поперечное сечение, эллипсоидальное поперечное сечение или многоугольное поперечное сечение.

Размеры активной зоны 102 реактора выбирают так, чтобы в расплавленной топливной соли 108 достигалась критичность при протекании через активную зону 102 реактора. Критичность относится к состоянию работы, при котором ядерное топливо поддерживает цепную реакцию деления, т.е. скорость производства нейтронов в топливе, по меньшей мере, равна скорости, с которой нейтроны потребляются (или теряются). Например, в случае удлиненной активной зоны, длину и площадь поперечного сечения удлиненной активной зоны можно выбирать для установления критичности в активной зоне 102 реактора. Следует отметить, что конкретные размеры, необходимые для установления критичности, по меньшей мере, зависят от типа делящегося материала, воспроизводимого материала и/или соли-носителя, содержащихся в реакторе 100. Принципы ядерных реакторов на расплавленных солях описаны в US 12/118118 от Leblanc, поданной 9 мая 2008 г., которая включена в данный документ во всей своей полноте.

Активную зону 102 реактора образуют из любого материала, подходящего для использования в ядерных реакторах на расплавленных солях. Например, объемную часть активной зоны 102 реактора можно образовать, но она не обязательно образована, из одного или более молибденовых сплавов, одного или более циркониевых сплавов (например, ZIRCALOY™), одного или более ниобиевых сплавов, никеля, одного или более никелевых сплавов (например, HASTELLOY™ N) или высокотемпературной ферритной, мартенситной или нержавеющей стали и т.п. Также следует отметить, что внутреннюю поверхность можно покрыть, плакировать или футеровать одним или более дополнительным материалом для обеспечения стойкости к коррозии и/или радиационному повреждению, как обсуждают подробнее далее в данном документе.

В показанном воплощении реактор 100 содержит первый контур 110, который забирает тепло из активной зоны 102 реактора и передает это тепло теплоносителю 126 второго контура во втором контуре 120 через теплообменник 119. В показанном на фиг. 1А воплощении расплавленную топливную соль 108 используют в качестве теплоносителя 118 первого контура. Охлаждения достигают путем протекания расплавленной топливной соли 108, нагретой происходящей цепной реакцией, из активной зоны 102 реактора и протекания более холодной расплавленной топливной соли 108 в активную зону 102 реактора со скоростью, необходимой для поддержания температуры активной зоны 102 реактора в пределах ее рабочего диапазона. В этом воплощении первый контур 110 приспособлен для поддержания расплавленной топливной соли 108 в субкритическом состоянии вне активной зоны 102 реактора.

Первый контур 110 может содержать одну или более петель 112 теплоносителя первого контура, образованных трубопроводом 114. Первый контур 110 может иметь любую известную в уровне техники компоновку первого контура, подходящую для практической реализации в контексте расплавленной топливной соли. В первом контуре 110 топливо 108 может циркулировать через один или более трубопроводов 114 и/или агрегатов для перекачки текучей среды одной или более петель 112 теплоносителя первого контура для передачи тепла, вырабатываемого активной зоной 102 реактора, в расположенные ниже по потоку устройства и системы выработки электроэнергии с тепловым приводом. Для простоты на фиг. 1А показана одна петля 112 теплоносителя первого контура. Однако здесь понятно, что первый контур 110 может содержать множество параллельных петель теплоносителя первого контура (например, 2-5 параллельных петель), причем каждая несет выбранную часть запаса расплавленной топливной соли че-

рез первый контур.

В альтернативном воплощении (пример которого показан на фиг. 1G и 2) первый контур 110 можно выполнить так, что теплоноситель 118 первого контура (отличный от расплавленной топливной соли 108) поступает в активную зону 102 реактора (например, в основной корпус). В этом воплощении топливная соль 108 не покидает активную зону реактора, или основной корпус, но скорее теплоноситель 118 первого контура, протекает в активную зону 102 реактора для поддержания температуры активной зоны в требуемом интервале. Следует отметить, что в этом воплощении реактор 100 может содержать дополнительный теплообменник (не показан) в активной зоне 102 реактора или основном корпусе. В этом воплощении второй контур 120 может быть необязательным, используемую тепловую энергию можно получить непосредственно из первого контура 110. В этом воплощении теплоноситель первого контура может представлять собой хлористую соль с подходящей температурой плавления. Например, соль может быть смесью хлорида натрия и хлорида магния.

В воплощении, показанном на фиг. 1A, первый контур 110 содержит один или более насосов 116. Например, один или более насосов 116 можно соединить по текучей среде с первым контуром 110 так, что один или более насосов 116 перекачивают теплоноситель 118 первого контура, в этом случае расплавленное топливо 108, через первый контур/контур активной зоны реактора. Один или более насосов 116 могут включать любой известный в уровне техники насос для теплоносителя/топлива. Например, один или более насосов 116 для текучей среды могут включать, но не ограничены перечисленным, один или более механических насосов, соединенных по текучей среде с петлей 112 теплоносителя первого контура. В качестве другого примера один или более насосов 116 для текучей среды могут включать, но не ограничены перечисленным, один или более электромагнитных (ЭМ) насосов, соединенных по текучей среде с петлей 112 теплоносителя первого контура.

На фиг. 1A дополнительно показано, что реактор 100 содержит второй контур 120, термически связанный с первым контуром 110 посредством одного или более теплообменников 110. Второй контур 120 может содержать одну или более петель 122 теплоносителя второго контура, образованных трубопроводом 124. Второй контур 120 может иметь любую известную в уровне техники компоновку второго контура, подходящую для практической реализации в контексте расплавленной топливной соли. Во втором контуре 120 теплоноситель 126 второго контура может циркулировать через один или более трубопроводов 124 и/или агрегатов для перекачки текучей среды одной или более петель 122 теплоносителя второго контура для передачи тепла, выработанного активной зоной 102 реактора и полученного через теплообменник 119 первого контура, в расположенные ниже по потоку устройства и системы выработки электроэнергии с тепловым приводом. Для простоты на фиг. 1A показана одна петля 124 теплоносителя второго контура. Однако здесь понятно, что второй контур 120 может содержать множество параллельных петель теплоносителя второго контура (например, 2-5 параллельных петель), причем каждая несет выbranную часть теплоносителя второго контура через второй контур. Следует отметить, что теплоноситель второго контура может включать любой известный в уровне техники теплоноситель второго контура. В качестве примера теплоноситель второго контура может включать, но не ограничивается этим, жидкий натрий.

Дополнительно следует отметить, что хотя это и не показано на фиг. 1A, реактор 100 может содержать любое количество дополнительных или промежуточных нагревающих/охлаждающих контуров и/или контуров теплоносителя. Такие нагревающие/охлаждающие контуры можно предоставить для различных целей помимо поддержания активной зоны 102 реактора в интервале рабочих температур. Например, можно предоставить третий нагревающий контур для активной зоны 102 реактора и первого контура 110 для обеспечения нагрева холодного реактора, содержащего затвердевшую топливную соль, до рабочей температуры, при которой соль является расплавленной и текучей.

Как показано, также можно использовать другие вспомогательные элементы 127 в петле 112 теплоносителя первого контура. Такие вспомогательные элементы 127 могут включать один или более фильтров или осадительных камер для удаления частиц, которые выпадают в осадок из теплоносителя 118 первого контура в течение работы. Для удаления нежелательных жидкостей из теплоносителя 118 первого контура вспомогательные элементы 127 могут включать любую систему жидкость-жидкостной экстракции, такую как одна или более ступеней прямоточных или противоточных смесителей/отстойников, ионообменная технология или система абсорбции газа. Для удаления газа вспомогательные элементы 127 могут включать любую подходящую технологию газожидкостной экстракции, такую как камера мгновенного испарения, система дистилляции или устройство для десорбции газа. Некоторые дополнительные воплощения вспомогательных элементов 127 обсуждают более подробно ниже.

Здесь следует отметить, что использование различных металлических солей, таких как соли хлоридов металлов, в реакторе 100 может со временем вызывать коррозию и/или радиационное разрушение. Можно принять множество мер для ослабления воздействия коррозии и/или радиационного разрушения на целостность различных контактирующих с солью элементов (например, активной зоны 102 реактора, трубопровода 114 первого контура, теплообменника 119 и т.п.) реактора 100, которые вступают в непосредственный или опосредованный контакт с топливной солью или ее излучением.

В одном воплощении скорость потока топлива через один или более элементов реактора 100 огра-

ничивают до выбранной скорости топливной соли. Например, один или более насосов 116 могут перекачивать расплавленное топливо 108 через петлю 112 теплоносителя первого контура реактора 100 с выбранной скоростью топливной соли. Следует отметить, что в некоторых случаях скорость потока ниже определенного уровня может оказывать вредное воздействие на рабочие характеристики реактора, включая процесс размножения и управление реактором. В качестве неограничивающего примера, общий запас топливной соли в петле 112 первого контура (и других частях первого контура 110) может превышать требуемый уровень в случае более низких пределов скоростей, так как площадь поперечного сечения соответствующего трубопровода петли 112 первого контура повышается по мере того, как скорость потока снижается, для поддержания надлежащего объемного расхода через петлю 112 первого контура. Как таковые очень низкие пределы скорости (например, 1 м/с) приводят к большим объемам топливной соли вне активной зоны и могут отрицательно воздействовать на процесс размножения реактора 100 и управление реактором. Кроме того, скорость потока выше определенного уровня может вредно воздействовать на рабочие характеристики реактора и продолжительность срока службы из-за эрозии и/или коррозии внутренних поверхностей петли 112 первого контура и/или активной зоны 102 реактора. Как таковые подходящие рабочие скорости топливной соли могут обеспечить баланс между пределами скорости, требуемыми для минимизации эрозии/коррозии, и пределами скорости, требуемыми для управления запасами топливной соли вне активной зоны. Например, в случае расплавленной хлористой топливной соли скорость топливной соли можно регулировать от 2 до 20 м/с, например, но не ограничиваясь этим, 7 м/с.

На фиг. 1В и 1С показан упрощенный схематический вид быстрого ядерного реактора 100 на расплавленных солях с защитным слоем 128, расположенным на одной или более внутренних поверхностях реактора 100, согласно одному или более воплощению настоящего изобретения.

В одном воплощении защитный слой 128 расположен на одной или более поверхностях реактора 100, обращенных к топливной соли 108 реактора 100. Защитный слой 128 может обеспечить стойкость к коррозии и/или радиационному разрушению одной или более обращенных к реакторной соли поверхностей реактора 100. Для целей настоящего изобретения под материалом, стойким к коррозии и/или радиационному разрушению, понимают любой материал, показывающий стойкость к коррозии и/или радиационному разрушению выше, чем у нижележащей поверхности реактора 100 без покрытия.

Защитный слой 128 может содержать любой известный в уровне техники материал, подходящий для придания внутренней поверхности реактора коррозионной и/или радиационной стойкости к соответствующей соли ядерного топлива. Таким образом, материал защитного слоя 128 может изменяться в зависимости от используемой соли 108. В одном воплощении защитный слой 128 содержит один или более тугоплавких металлов. Например, защитный слой 128 может содержать, но не ограничен перечисленным, один или более металлов из ниобия, молибдена, тантала, вольфрама или рения. В другом воплощении защитный слой 128 содержит один или более тугоплавких сплавов. Например, защитный слой 128 может содержать, но не ограничен перечисленным, один или более сплавов из молибденового сплава (например, сплав титана, циркония и молибдена (ТЦМ)), вольфрамового сплава, тантала, ниобия или рения. В другом воплощении защитный слой 128 содержит никель и/или один или более никелевых сплавов. В другом воплощении защитный слой 128 содержит карбид, например, но не ограничен этим, карбид кремния.

В одном воплощении защитный слой 128 образован путем нанесения на внутреннюю поверхность одной или более частей реактора 100 (например, трубопровода 114 или петли 112 первого контура) покрытия из выбранного защитного материала. В другом воплощении защитный слой 128 содержит одно или более покрытий из выбранного защитного материала, расположенных на внутренней поверхности одной или более частей реактора 100. В еще одном воплощении объемный материал из различных компонентов можно образовать с одним или более описанных выше защитных материалов. Например, трубопровод 114 петли 112 теплоносителя первого контура может включать, но не ограничен этим, трубопровод ТЦМ.

В одном воплощении, показанном на фиг. 1В, внутренняя, обращенная к соли поверхность активной зоны 102 реактора содержит защитный слой 128. Например, корпус активной зоны 102 реактора можно образовать из стали или циркониевого сплава, с покрытием из тугоплавкого сплава, никеля или никелевого сплава, расположенным на внутренней, обращенной к соли поверхности активной зоны 102 реактора, с образованием защитного слоя 128. Например, активная зона 102 реактора может содержать, но не ограничена перечисленным, защитный слой 128 на основе молибдена, имеющий толщину приблизительно 5-7 мм, с корпусом активной зоны 102 реактора, имеющим толщину стенки приблизительно 9-11 см.

Аналогично, как показано на фиг. 1С, обращенная к соли поверхность трубопровода 114 петли 112 теплоносителя первого контура (которая может быть внутренней и/или внешней поверхностью трубопровода или других элементов) содержит защитный слой 128. Например, покрытие из тугоплавкого сплава или никелевого сплава можно расположить на обращенной к соли поверхности трубопровода 114 петли 112 теплоносителя первого контура с образованием защитного слоя 128.

На фиг. 1D показан схематический вид блока 130 отражателя реактора 100. Блок 130 отражателя

подходит для отражения нейтронов, испускаемых из активной зоны 102 реактора, обратно в топливную соль 108. В одном воплощении блок 130 отражателя расположен на внешней поверхности активной зоны 102 реактора так, что блок 130 отражателя окружает по меньшей мере часть активной зоны 102 реактора. В показанном воплощении нейтроны, отраженные назад в активную зону 102 реактора блоком 130 отражателя, могут вносить вклад в поддержание критичности в активной зоне 102 реактора и/или размножение делящегося топлива из воспроизводящихся материалов. Путем понижения таких потерь нейтронов можно уменьшить количество необходимой для критичности топливной соли и, следовательно, размер активной зоны 102 реактора. Блок 130 отражателя может быть выполнен из любого известного в уровне техники материала, подходящего для отражения нейтронов. Например, блок отражателя может содержать, но не ограничен перечисленным, один или более материалов из циркония, стали, железа, графита, бериллия, карбида вольфрама, свинца, сплава свинца и висмута и подобных материалов.

На фиг. 1E и 1F показан блок 130 отражателя, выполненный из множества отражательных модулей 132, согласно одному или более воплощений настоящего изобретения. Следует отметить, что при некоторых рабочих температурах ядерного реактора 100 по настоящему изобретению множество отражающих нейтроны материалов переходит в жидкое состояние. Например, свинец и сплав свинца и висмута являются материалами, которые обеспечивают хорошие характеристики отражения нейтронов. Однако свинец плавится при приблизительно 327°C, при этом сплавы свинца и висмута обычно имеют температуры плавления ниже 200°C. Как отмечено в других частях этой заявки, реактор 100 может работать в температурном интервале от приблизительно 330 до 800°C, выше температур плавления свинца и сплавов свинца и висмута. В одном воплощении отражательные модули 132 содержат контейнер отражателя для вмещения жидкой фазы выбранного отражающего нейтроны материала 133, как показано на фиг. 1E и 1F. Отражательные модули 132 могут быть выполнены из любого известного в уровне техники материала, и его можно выбирать с учетом любой одной или более конструктивных функций, включая стойкость к температуре, стойкость к коррозии, отсутствие способности к реакции с другими компонентами и/или топливом, стойкость к радиации, несущую конструкцию, массу и т.п. В некоторых случаях один или более контейнеров отражателей могут быть выполнены из материала, который, по существу, прозрачен для нейтронов, с материалом отражателя внутри контейнера, и/или один или более контейнеров отражателей могут быть выполнены из материала, который является тугоплавким. Например, отражательные модули 132 (такие как контейнеры отражателей) могут быть выполнены из одного или более тугоплавких сплавов, одного или более никелевых сплавов или одного или более карбидов или графитовых соединений. Например, материал, используемый для образования отражательных модулей 132 и/или контейнеров отражателей, может содержать, но не ограничивается перечисленным, любой из одного или более компонентов или сочетаний одного или более молибденовых сплавов (например, сплав ТЦМ), одного или более вольфрамовых сплавов, одного или более танталовых сплавов, одного или более ниобиевых сплавов, одного или более рениевых сплавов, одного или более никелевых сплавов, карбида кремния или графитовых соединений и т.п. Отражательный модуль может включать (либо содержать, либо состоять из) один или более замедлителей, которые могут существовать при рабочих температурах (например, графит и/или свинец), и его можно считать уравновешивающим более сильный замедлитель (например, графит) и более слабый замедляющий материал (например, свинец) и его можно использовать для определения общего спектра отраженных нейтронов.

В одном воплощении отражательные модули 132 расположены на внешней поверхности активной зоны 102 реактора и распределены по внешней поверхности активной зоны 102 реактора. Как показано в примерах на фиг. 1E и 1F, отражательные модули 132 расположены азимутально на всей внешней поверхности активной зоны 102 реактора. Каждый отражательный модуль 132 содержит некоторый объем отражающей нейтроны жидкости (например, свинца, сплава свинца и висмута и т.п.). В связи с этим, отдельные отражательные модули 132 можно расположить с образованием непрерывного объема отражающей нейтроны жидкости 133 активной зоны 102 реактора. Хотя на фиг. 1E и 1F показано азимутальное расположение отражательных модулей 132, такую конфигурацию нельзя понимать как ограничивающую. Здесь следует отметить, что любое геометрическое расположение и количество отражательных модулей 132 подходит для практического применения в случае реактора 100 по настоящему изобретению. Например, хотя это и не показано, ряд отражательных модулей 132 может принимать конфигурацию уложенных в стопку колец, где каждый модуль представляет собой кольцо, заполненное выбранной отражающей нейтроны жидкостью. В связи с этим ряд модулей 132 можно уложить в стопку так, чтобы образовать отражающий нейтроны объем вокруг активной зоны 102. Объем может иметь сферическую форму, цилиндрическую форму, может быть прямоугольной, шестиугольной, восьмиугольной, треугольной, пятиугольной или другой призмой или в другом случае представлять собой объем с любой формой поперечного сечения. В одном воплощении в отражателе используют покрытие толщиной 12,7 мм (1/2 дюйма) HASTELLOY™-M, или покрытие SiC, или все внешние поверхности и внутренний корпус имеют покрытие из одинакового материала толщиной 2 см. Необходимо понимать, что форму отражательных модулей можно образовать, исходя из конкретной конструкции активной зоны, и она может включать любую соответствующую форму, включая трапециевидную, прямоугольную, шестиугольную, круглую, эллипсоидальную, и даже может включать нерегулярные формы.

На фиг. 1G показано воплощение ядерной энергетической установки для выработки энергии из ядерной реакции с использованием быстрого реактора на расплавленных хлоридах (БРРХ). Для применения в энергетической установке вырабатываемое БРРХ тепло превращают в электрическую энергию с помощью оборудования для преобразования энергии. В показанном воплощении использовали оборудование для преобразования энергии с циклом Ренкина с водой (паром) в качестве рабочей текучей среды. Эффективность преобразования установки с циклом Ренкина по большей части определяется температурой (и давлением) поступающего в турбину пара, где более высокие температуры соответствуют более высокой эффективности. Рабочая характеристика связана с давлением пара, а также с температурой, и в установках с циклом Ренкина наивысшей эффективности используют сверхкритический и ультрасверхкритический пар.

Система преобразования энергии включает все системы, которые приходят в контакт с рабочей текучей средой системы преобразования энергии. В случае показанной паровой установки с циклом Ренкина она включает парогенератор 152, турбинную систему 154, петлю 162 циркуляции воды, содержащую один или более насосов 156 для циркуляции воды и охлаждающую башню 158, оборудование 160 электрогенератора и управляющую систему 162. Кроме того, показаны система 166 хранения топлива для хранения свежей топливной соли и система 168 хранения продуктов реакции для получения и безопасного содержания использованной топливной соли. Как показано на фиг. 1G, система преобразования энергии начинается с передачи тепла первого контура рабочей текучей среде энергетического цикла через теплообменник (например, парогенератор 152). Моделирование системы включало упрощенные модели петли 114 соли первого контура и парогенератора 152 с более подробным анализом компонентов системы с циклом Ренкина. Хотя для целей моделирования использовали паровую турбину с циклом Ренкина, также возможны тепловые машины на основе других циклов, такие как газовые турбины замкнутого цикла (например, воздуха, гелия или CO_2) на основе цикла Брайтона.

Входные параметры в используемую при моделировании систему преобразования энергии поступают от массового расхода теплоносителя первого контура, температур и давлений в подающем трубопроводе и в обратном трубопроводе. Затраты и характеристику энергетического цикла оценивают для различных расчетных уровней выхода тепловой энергии, составляющих 600 МВт, 1200 МВт, 1800 МВт, 2400 МВт и 3000 МВт. Для базовых условий конструкции реактора соль первого контура поставляют в парогенератор 152 при 612°C и возвращают из парогенератора при 498°C . Анализ включал моделирование работы для условий свежего пара при 580°C , 30 МПа (300 бар) и условий пара для вторичного перегрева при 600°C , 7 МПа (70 бар), хотя работа при более высокой и более низкой температуре и давлении может оказывать влияние на затраты и рабочие характеристики.

При анализе использовали комплексы программного обеспечения STEAMPRO™ и THERMOFLEX™ от Themoflow, Inc. для предоставления данных о затратах и рабочих характеристиках для энергетического цикла в установившемся режиме работы. В анализе использовали стандартные термодинамические модели для компонентов турбинной системы 154, соединенные с запатентованными моделями для конкретных компонентов в энергетическом цикле. Для отвода тепла полагают доступным большой объем воды, подобный реке или озеру (т.е. не моделировали никаких охлаждающих башен), хотя для отвода тепла можно использовать охлаждающую башню 158, как показано на фиг. 1G. Термодинамические эффективности и параметры компонентов сохраняют при значениях по умолчанию, заданных подмоделями STEAMPRO™ и THERMOFLEX™. Для моделирования использовали топливную соль 17% UCl_3 -71% UCl_4 -12% NaCl и теплоноситель первого контура 58% NaCl -42% MgCl_2 . Свойства топливной соли были добавлены в THERMOFLEX™ в виде таблиц поиска на основе подборов эмпирической кривой. Используемые данные показаны ниже в табл. 1 для топливной соли и в табл. 2 для соли теплоносителя первого контура.

Таблица 1

Свойства топливной соли, использованные в вычислениях THERMOFLEX™

	Температура	Плотность	Теплоемкость	Тепловые условия	Динамическая вязкость	Давление пара
	°С	кг/м ³	кДж/(кг·°С)	Вт/(м ⁰ С)	кг/(м·с)	бар
1	400	4189	0,5732	0,972	0,0171	0
2	450	4077	0,5515	1,081	0,0117	0
3	500	3965	0,5297	1,19	0,00817	0
4	550	3853	0,5079	1,299	0,00585	0
5	600	3741	0,4861	1,409	0,00427	0
6	650	3629	0,4644	1,518	0,00317	0
7	700	3517	0,4426	1,627	0,00239	0
8	750	3406	0,4208	1,736	0,00183	0
9	800	3294	0,399	1,845	0,00142	0
10	850	3182	0,3773	1,954	0,00111	0
11	900	3070	0,3555	2,064	8,83·10 ⁻⁴	0
12	950	2958,3	0,3337	2,173	7,07·10 ⁻⁴	0
13	1000	2846,5	0,3119	2,282	5,71·10 ⁻⁴	0
14	1050	2734,6	0,2902	2,391	4,65·10 ⁻⁴	0
15	1100	2622,8	0,2684	2,5	3,81·10 ⁻⁴	0
16	1150	2511	0,2466	2,609	3,15·10 ⁻⁴	0
17	1200	2399,1	0,2248	2,719	2,62·10 ⁻⁴	0
18	1250	2287,3	0,2031	2,828	2,19·10 ⁻⁴	0
19	1300	2175,5	0,1813	2,937	1,85·10 ⁻⁴	0
20	1350	2063,6	0,1595	3,046	1,56·10 ⁻⁴	0
21	1400	1951,8	0,1377	3,155	1,33·10 ⁻⁴	0
22	1450	1840	0,116	3,264	1,14·10 ⁻⁴	0
23	1500	1728,1	0,0942	3,374	9,74·10 ⁻⁵	0
24	1550	1616,3	0,0724	3,483	8,40·10 ⁻⁵	0
25	1600	1504,5	0,0506	3,592	7,27·10 ⁻⁵	0
26	1650	1392,6	0,0289	3,701	6,32·10 ⁻⁵	0
27	1700	1280,8	0,00709	3,81	5,51·10 ⁻⁵	0

Таблица 2

Свойства соли теплоносителя первого контура, использованные в вычислениях THERMOFLEX™

	Температура	Плотность	Теплоемкость	Тепловые условия	Динамическая вязкость	Давление пара
	°С	кг/м ³	кДж/(кг·°С)	Вт/(м ⁰ С)	кг/(м·с)	бар
1	444,8	1785	1,128	1,555	0,0023	0
2	498,6	1759	1,114	1,672	0,00201	0
3	552,2	1734	1,1	1,789	0,00176	0
4	606	1708	1,086	1,906	0,00154	0
5	659,6	1683	1,072	2,022	0,00134	0
6	713,2	1658	1,058	2,139	0,00118	0
7	766,8	1632	1,044	2,255	0,00103	0
8	820,8	1607	1,03	2,372	8,98·10 ⁻⁴	0
9	873,8	1581	1,016	2,487	7,87·10 ⁻⁴	0
10	927,8	1556	1,002	2,604	6,87·10 ⁻⁴	0
11	981,8	1530	0,9874	2,721	6,01·10 ⁻⁴	0
12	1035,8	1505	0,9732	2,838	5,25·10 ⁻⁴	0

13	1088,8	1479	0,9593	2,952	$4,60 \cdot 10^{-4}$	0
14	1142,8	1454	0,9452	3,069	$4,02 \cdot 10^{-4}$	0
15	1196,8	1428	0,931	3,186	$3,51 \cdot 10^{-4}$	0
16	1249,8	1403	0,9171	3,3	$3,07 \cdot 10^{-4}$	0
17	1303,8	1378	0,9029	3,416	$2,69 \cdot 10^{-4}$	0
18	1357,8	1352	0,8887	3,532	$2,35 \cdot 10^{-4}$	0
19	1410,8	1327	0,8748	3,647	$2,06 \cdot 10^{-4}$	0
20	1464,8	1301	0,8607	3,763	$1,80 \cdot 10^{-4}$	0

Система преобразования энергии получает тепловую энергию от реактора 100 и преобразует это тепло в механическую и затем электрическую энергию. Анализ специально направлен на использование стандартной аппаратуры парового цикла Ренкина для преобразования энергии. Анализируемая конфигурация имеет три турбины, включающие турбину высокого давления (ТВД), турбину промежуточного давления (ТПД) и турбину низкого давления (ТНД), показанные просто в виде турбинной системы 154. На фиг. 1G показана упрощенная диаграмма цикла для анализа цикла Ренкина с мощностью 2400 МВт. Модель на фиг. 1G упрощена в том, что на ней показаны только основные компоненты энергетической установки. В используемой модели ТВД получает пар из системы выработки "свежего пара", который нагревают текучей средой первого контура, несущей тепловую энергию из реактора. Отработанные газы из ТВД направляют в систему выработки пара для вторичного перегрева, в которой текучая среда первого контура переносит тепло в отработанные газы из ТВД, и этот нагретый пар подают в ТПД. Отработанные газы из ТПД подают непосредственно в ТНД для извлечения дополнительной энтальпии. Часто присутствует множество параллельных турбин, особенно для ТНД. В используемой модели присутствуют две ТНД, которые используют для стадии конечного расширения. В модели все турбины находятся на общем валу и непосредственно соединены с электрогенератором 160. Выходящий поток из ТНД протекает в конденсатор, который охлаждает пар до температуры, близкой к температуре окружающей среды. Для этого анализа полагают, что ТНД является прямоточным конденсатором, который получает тепло от большого объема воды, подобного большому озеру или реке. После конденсатора воду закачивают и направляют через несколько подогревателей питательной воды. Подогреватели питательной воды предварительно нагревают питательную воду путем смешивания с паром, извлеченным из различных точек на турбинах. Предварительно нагретую текучую среду из подогревателей питательной воды затем подают в парогенератор, в котором ее нагревают до температуры для основной турбины.

Способ анализа включает использование STEAMPRO™ для установления характеристик системы с циклом Ренкина и затем переноса этой модели в Thermoflex для исследования взаимодействий с петлями расплавленной соли. STEAMPRO™ является специально разработанным программным средством для настройки параметров компонентов паровой турбины, при этом Thermoflex считают "полностью гибким" средством проектирования с большим количеством особенностей и вариантов. В STEAMPRO™ установку определяют как имеющую "парогенератор в виде черного ящика" и "прямоточное водяное охлаждение с открытым контуром". Паровой цикл определяют как сверхкритический цикл конденсации с одним вторичным перегревом с насосом для питания котла с приводом от электромотора. Все турбины указаны для работы при 3600 об/мин. Характеристики группы турбин, подогреватели питательной воды и насосы заданы параметрами по умолчанию STEAMPRO™ и способом выбора. Цикл затем обчисляют и переносят в THERMOFLEX™. STEAMPRO™ дает подробное распределение компонентов установки с циклом Ренкина, выбранное для эффективной работы при расчетных условиях.

В THERMOFLEX™ парогенератор в виде черного ящика заменяют теплообменниками для обмена теплом между расплавленной солью и паром для парогенераторов свежего пара и пара для вторичного перегрева. Упрощенные петли топливной соли и соли первого контура включены в модель. Петли топливной соли и соли первого контура включены для предоставления источника энергии и не смоделированы подробно. Подход к моделированию в THERMOFLEX™ состоит в том, чтобы установить условия на выходе теплообменников в петлях соли и пара и затем настроить расход пара так, чтобы подводимая в топливную соль теплота соответствовала расчетным условиям. Хотя распределение компонентов и эксплуатационные характеристики установки определяли с помощью STEAMPRO™, THERMOFLEX™ дополнительно настраивает (изменяет размеры) компоненты (например, турбины, насосы и теплообменники) для достижения хорошей характеристики для условий рабочей текучей среды. Подводимая в петлю топливной соли теплота представляет тепловую энергию реактора. КПД брутто представляет собой выходную мощность турбинного вала относительно подводимой тепловой энергии. Отбираемая мощность представляет собой выходную мощность генератора за вычетом потерь на закачивание и на вспомогательные механизмы относительно подаваемой тепловой энергии.

В табл. 3 ниже показаны результаты расчета рабочих характеристик и затрат для сверхкритического цикла Ренкина, действующего с подаваемой тепловой энергией, составляющей 600 МВт, 1200 МВт, 1800 МВт, 2400 МВт и 3000 МВт.

Результаты расчета THERMOFLEX™ рабочих характеристик и общих затрат для сверхкритического цикла Ренкина при уровнях тепловой энергии от 600 до 3000 МВт

Подаваемое тепло	МВт	600,0	1200,0	1800,0	2400,0	3000,1
Отбираемая мощность	МВт	276,1	560,9	845,5	1130,3	1415,2
Электрический КПД нетто	%	46,0	46,7	47,0	47,1	47,2
Расход топливной соли	кг/с	14625	29251	43876	58501	73130
Полный массовый расход соли первого контура	кг/с	4774	9487	14231	18975	23719
Массовый расход генератора свежего пара первого контура	кг/с	3800	7520	11244	14968	18691
Массовый расход промежуточного перегревателя первого контура	кг/с	943,7	1967	2986,4	4006	5029
Массовый расход свежего пара	кг/с	224,5	452,8	677,1	901,3	1025
Массовый расход пара для вторичного перегрева	кг/с	195,2	403,7	610,9	818	1125,4
Выход источника тепла топливной соли	°С	737	737	737	737	737
Выход теплообменника первого контура топливной соли	°С	645	645	645	645	645
Выход теплообменника теплоносителя первого контура	°С	612	612	612	612	612
Выход генератора свежего пара первого контура	°С	498	498	498	498	498
Выход генератора пара для вторичного перегрева первого контура	°С	498	498	498	498	498
Выход генератора свежего пара	°С	580	580	580	580	580
Выход генератора пара для вторичного перегрева	°С	600	600	600	600	600

На фиг. 2 показано другое воплощение упрощенного схематического вида ядерного реактора 200 на расплавленных солях. Реактор 200 представляет собой реактор бассейнового типа, в котором в некоторых примерах топливная соль 108 может протекать/циркулировать через бассейн или в других случаях содержаться или направляться, например, через трубопровод. В показанном на фиг. 2 примере топливная соль содержится в трубах 204, которые расположены в центре бассейна 210 теплоносителя 202 в закрытом корпусе 206 реактора. Верхняя часть корпуса 206 реактора может быть заполнена каким-либо инертным газом 218, таким как аргон. Топливные трубки 204 расположены в сборке, аналогичной стандартным сборкам твердого топлива в реакторе на легкой воде. Теплоноситель 202 переносит тепло из центра бассейна 210 в теплообменники 208, расположенные на периферии бассейна 210. В показанном воплощении циркуляция теплоносителя 202 (показанная пунктирными стрелками 212) в бассейне 210, которая может быть естественной или вызванной лопастным колесом или другим механизмом (не показан), посредством конвекции переносит тепло от топливных трубок 204, которое поглощается теплообменниками 208.

Теплообменники 208 передают тепло из бассейна 210 во второй контур 214. В одном воплощении теплоноситель второго контура представляет собой воду, которую кипятят в теплообменниках, и получаемый пар 216 используют для приведения в движение турбин (не показаны) для выработки энергии.

Необязательный ряд отражательных модулей 232, таких как отражательные модули 132, обсуждаемые со ссылкой на фиг. 1E и 1F, можно предусмотреть вокруг топливных труб, либо в корпусе реактора, как показано на фиг. 2, и/или вне корпуса реактора, аналогично фиг. 1E и 1F, для увеличения эффективности реактора. При необходимости можно предусмотреть необязательные аварийные стержни для поддержания реактора в субкритическом состоянии.

После начального запуска с обогащенным топливом (~12% ^{235}U), для БРРХ может не требоваться постоянная подача обогащенного делящегося материала. Вместо этого в БРРХ можно подавать обедненный или природный уран, наряду с другими воспроизводящимися материалами. Моделирование показывает, что в течение нормальной работы реактор медленно увеличивает реактивность. Для противодействия этому увеличению реактивности небольшое количество полностью смешанной топливной соли можно удалить и заменить воспроизводящейся сырьевой солью. Добавление воспроизводящегося материала

представляет собой, в сущности, управляющий стержень, который уменьшает реактивность.

Вместо направления на захоронение использованное топливо БРРХ можно собирать до тех пор, пока достаточное количество не станет доступно для начала работы нового реактора. Такой дочерний реактор содержит химически идентичную топливную соль и, таким образом, способен начать работу без какого-либо нового обогащения. Путем передачи использованного топлива, в общем, дочерней установке для использования в качестве начального топлива для этой установки, создание парка БРРХ значительно уменьшает использование актинидов и задерживает большую часть радиоактивных отходов до окончания расширения парка. Для окончательного захоронения несущей актиниды топливной соли в предшествующей работе обнаружили, что саму соль можно упаковать без химического превращения в подходящую форму отходов.

Топливные соли на основе хлоридов.

Соли ядерного топлива в общем описаны в Е.Н. Ottewitte, "Configuration of a Molten Chloride Fast Reactor on a Thorium Fuel Cycle to Current Nuclear Fuel Cycle Concerns", Ph.D. dissertation, University of California at Los Angeles, 1982, которая включена в данный документ во всей полноте путем ссылки. Соединения хлоридов урана также в общем обсуждают в B.R. Harder, G. Long и W.P. Stanaway, "Compatibility and Processing Problems in the Use of Molten Uranium Chloride-Alkali Chloride Mixtures as Reactor Fuels", Symposium on Reprocessing of Nuclear Fuels, Iowa State University, 405-432, Aug. 1969, которая включена в данный документ во всей полноте путем ссылки. Описанные ниже новые воплощения топливных солей улучшают эту работу и были разработаны посредством моделирования и других теоретических исследований.

Следует отметить, что расплавленные хлористые топливные соли по настоящему изобретению обеспечивают возможность введения высокой концентрации тяжелых металлов в топливную соль 108 при разумных температурах. В качестве неограничивающего примера, одна или более из хлористых топливных солей по настоящему изобретению могут обеспечить концентрацию тяжелых металлов более 61 мас.% с температурой плавления приблизительно 500°C. При работе с использованием описанных ниже топливных солей, воплощения реактора на расплавленных топливных солях могут иметь возможные расчетные рабочие температуры от 200 до 800°C. Хотя каждое различное топливо имеет немного другую оптимальную рабочую температуру, реакторы имеют интервал рабочих температур 330-550°C, 350-520°C, 400-510°C и 450-500°C. Способность достижения высокого содержания урана обеспечивает использование смесей топливных солей на основе хлорида урана в быстром реакторе на бегущей волне по настоящему изобретению. Более того, делящийся материал можно обогатить до любого требуемого уровня, например 12,5% ^{235}U или 19,99% ^{235}U , или любого другого подходящего уровня обогащения.

Также следует отметить, что расплавленные хлористые топливные соли по настоящему изобретению имеют относительно низкое давление паров при нагреве до рабочих температур, описанных в данном документе. Хотя каждое из различного топлива имеет немного другое оптимальное рабочее давление для уменьшения количества испарения топливной соли, предусматривают реакторы, имеющие интервал рабочего давления от 100 кПа до 1 МПа (1-10 атм) и от 200 до 500 кПа (2-5 атм).

В нижеследующем обсуждении представлены различные воплощения расплавленных хлористых солей ядерного топлива, содержащих смесь топливной соли хлорида металла с одной или более дополнительными солями хлорида металла. Например, расплавленная хлористая соль ядерного топлива может содержать, но не ограничивается перечисленным, смесь первой соли хлорида урана, второй соли хлорида урана и/или дополнительной соли хлорида металла. Следует отметить, что относительным количеством различных компонентов топливной соли 108 можно управлять для регулирования одного или более тепловых, химических или нейтронных параметров топливной соли, включая, но не ограничиваясь перечисленным, температуру плавления, теплопроводность, коррозионную способность, уровень содержания актинидов, реактивность, эффективный коэффициент размножения нейтронов (k_{eff}) при равновесии и т.п. Например, относительное количество делящегося урана (например, ^{235}U) в данной смеси топливных солей может обуславливать размер активной зоны 102 реактора, необходимый для обеспечения данной плотности энергии. В качестве неограничивающего примера топливная соль, имеющая содержание ^{235}U 10 моль.% (за исключением случаев, когда специально указано иное, все % значения для химических соединений являются моль.%), может иметь объем активной зоны реактора приблизительно 67 м³ и производить плотность энергии 200 МВт/м³, при этом для топливной соли, имеющей содержание ^{235}U 16%, может потребоваться объем активной зоны реактора только 11 м³. Такое соотношение показывает сильную зависимость размера активной зоны 102 реактора (или количества топливных трубок 204) от состава используемой топливной соли 108.

В одном воплощении смесь солей по настоящему изобретению можно выбирать так, что соответствующий коэффициент размножения, который является отношением нового делящегося материала, созданного в реакторе в течение ядерной реакции, к делящемуся материалу, потребленному в этой реакции, топливной соли 108 больше 1 (например, коэффициент размножения = 1,000001, 1,001 и т.п.), что приводит к долговому сроку службы реактора, но с характеристической размножения, которая меньше потенциально достижимой. В другом воплощении смесь солей по настоящему изобретению можно выбирать так, что соответствующий коэффициент размножения топливной соли 108 меньше 1, что приводит к выгора-

нию обогащения за данный период времени. Необходимо понимать, что выбор конкретного состава топлива зависит от многих различных конкурирующих факторов, включая конструкцию реактора, расчетные рабочие параметры (например, температуру и давление) и, не в последнюю очередь, общих функциональных целей (например, уменьшение обогащения, продолжительный срок службы реактора, разномножение дополнительного делящегося материала).

Хлористая топливная соль, модифицированная хлором-37.

Помимо обогащения делящегося элемента(ов) (такого как уран или торий), используемого для создания топливных солей, воплощения топливных солей, описанных в данном документе, можно обогащать так, что некоторое количество хлорид-ионов в любом одном или более из хлористых соединений содержат определенный процент ^{37}Cl . Хлор имеет множество изотопов с различными массовыми числами. Среди них существуют два стабильных изотопа, ^{35}Cl (который составляет 76% от встречающегося в природе хлора) и ^{37}Cl (24% от встречающегося в природе хлора). Самый распространенный изотоп, ^{35}Cl , является замедлителем нейтронов, т.е. ^{35}Cl уменьшает скорость быстрых нейтронов, превращая их таким образом в тепловые нейтроны. Изотоп ^{37}Cl также является сильным поглотителем нейтронов и приводит к образованию коррозионной серы и долгоживущего радиоактивного ^{36}Cl . С другой стороны, изотоп ^{37}Cl является относительно прозрачным для быстрых нейтронов.

Один аспект данной технологии состоит в регулировании содержания ^{37}Cl в любых содержащих хлориды соединениях, используемых в качестве расплавленной топливной соли 108. Как обсуждали выше, использование хлорид-ионов природного происхождения для создания хлористого соединения должно приводить к приблизительно 76% хлорид-ионов, являющихся ^{35}Cl , и 24%, являющихся ^{37}Cl . Однако в описанных в данном документе воплощениях можно использовать любое отношение ^{37}Cl к общему содержанию Cl в любом конкретном воплощении хлористой топливной соли, и в некоторых случаях оно может соответствовать или превышать выбранное отношение ^{37}Cl к общему содержанию Cl. Необходимо понимать, что любые известные или разрабатываемые технологии обогащения можно использовать для обеспечения требуемого и/или выбранного отношения концентрации ^{37}Cl , включая, но не ограничиваясь перечисленным, центрифуги, ионообменные колонны и т.п.

В одном воплощении все содержащие хлориды соединения можно создавать из настолько чистого сырья ^{37}Cl , насколько это возможно. Например, соединения топливной соли на основе хлоридов можно создать так, что более 90%, 95%, 98%, 99% или даже 99,9% хлорид-ионов в топливной соли являются ^{37}Cl . Альтернативно, можно разработать ядерное топливо на основе хлоридов для достижения любого целевого или выбранного процентного отношения ^{37}Cl к другим хлорид-ионам в топливе или в различных компонентах топлива. Например, для топлива, сконструированного для тепловых реакций, соединения топливной соли на основе хлоридов можно создать так, что менее 10%, 5%, 2%, 1% или даже 0,1% хлорид-ионов в топливной соли являются ^{35}Cl , остальное является ^{37}Cl . Для топлив, приспособленных для быстрых реакций, соединения топливной соли на основе хлоридов можно создать так, что более 10, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90% или более, вплоть до 100% описанных выше хлорид-ионов в топливной соли являются ^{37}Cl . Моделирование показало, что характеристика БРРХ значительно улучшается с хлором, который обогащен по меньшей мере до 75% ^{37}Cl . Использование обогащенного хлора уменьшает как паразитное поглощение нейтронов, так и производство ^{36}Cl , который является долгоживущим продуктом активации.

На фиг. 3 показано воплощение способа создания топлива, приспособленного для конкретного реактора. Это регулирование относительного количества ^{35}Cl по отношению к ^{37}Cl обеспечивает дополнительный способ регулирования реактивности топливной соли в реакциях на быстрых или тепловых нейтронах. Способ 300 начинается с операции 302 определения. В операции 302 определения определяют требуемое отношение ^{37}Cl к общему количеству Cl. Для определения соответствующего отношения можно учитывать такие факторы, как конструкция реактора, требуемые рабочие параметры реактора (например, температура, давление и т.п.) и используемые в топливе соединения на основе хлоридов.

Операция 302 определения топлива, например, может включать выбор начальной Cl соли, имеющей второе отношение ^{37}Cl ко всему Cl в топливе и определение начального эффективного коэффициента размножения нейтронов (k_{eff}) для реактора с использованием начальной расплавленной хлористой топливной соли, сравнение начального эффективного коэффициента размножения нейтронов с целевым эффективным коэффициентом размножения нейтронов и вычисление следующего или конечного отношения ^{37}Cl к общему количеству Cl на основе результатов операции сравнения. Целевой эффективный коэффициент размножения нейтронов (k_{eff}) можно определить на основе требований изготовителя или оператора ядерного реактора. Эти технологии можно повторять и/или регулировать надлежащим образом для определения 302 выбранного отношения ^{37}Cl к общему количеству Cl.

Затем выполняют операцию 304 выработки топлива. В операции 304 выработки топлива топливо создают путем изменения отношения ^{37}Cl к общему количеству Cl в конечном топливе.

В одном воплощении модифицированная расплавленная хлористая топливная соль содержит смесь различных хлористых соединений, включающую первое соединение делящейся хлористой соли и первое соединение неделящейся хлористой соли. В этом воплощении операция 304 выработки топлива может включать выработку первого соединения делящейся хлористой соли и первого соединения неделящейся

хлористой соли так, что они имеют различные отношения ^{37}Cl к общему количеству Cl первого соединения делящейся хлористой соли или первого соединения неделивающей хлористой соли соответственно. Отношение ^{37}Cl к общему количеству Cl каждого соединения регулируют так, что после объединения двух (или более) соединений с образованием конечной смеси модифицированных топливных солей модифицированная расплавленная хлористая топливная соль имеет требуемое отношение ^{37}Cl к общему количеству Cl на основе массового баланса соединений и их соответствующих отношений ^{37}Cl к общему количеству Cl.

Результатом операции 304 выработки топлива является модифицированная расплавленная хлористая топливная соль, имеющая первое отношение ^{37}Cl к общему количеству Cl в модифицированной расплавленной хлористой топливной соли, так что при использовании в ядерном реакторе достигают целевого эффективного коэффициента размножения нейтронов. Топливную соль называют "модифицированной" для понимания того, что конечное отношение отличается от встречающегося в природе отношения ^{37}Cl к общему количеству Cl. Например, топливная соль может представлять собой смесь 33% UCl_4 , 33% UCl_3 и 33% NaCl , и для достижения конечного отношения модифицированной топливной соли 40% ^{37}Cl к общему количеству Cl NaCl можно обогатить так, чтобы он имел отношение 75% ^{37}Cl к общему количеству Cl, при этом для других двух компонентов используют встречающееся в природе отношение. Это приводит к конечной модифицированной топливной соли $\text{UCl}_4\text{-UCl}_3\text{-NaCl}$, имеющей отношение 40% ^{37}Cl к общему количеству Cl.

Предыдущий пример также показывает, что в целях эффективности можно решить обогащать только один компонент многокомпонентной смеси топливной соли. Например, если в конечную топливную соль включают неделивающие хлористые соли, большое количество соли с высоким (или низким) отношением ^{37}Cl к общему количеству Cl можно создать и поддерживать для дальнейшего использования в смешанном топливе. Выделение ^{37}Cl из хлора природного происхождения известно в технике, и можно использовать любой подходящий способ. Например, способы центрифугирования или использования ионообменной колонны (ИОК) для обогащения кажутся пригодными и допускающими расширение до требуемого масштаба. Также возможны другие способы.

После того как модифицированное топливо выработано, в реактор загружают модифицированное топливо, и реактор работает с использованием модифицированного топлива в режиме эксплуатации 306 реактора. Если в течение эксплуатации определяют, что реактивность не является оптимальной, можно выработать новое топливо с использованием способа 300 либо для замены существующего топлива, либо для смешивания с существующим топливом до тех пор, пока не достигнут требуемой реактивности при операции последующей выработки топлива и смешивания (не показано). В еще одном воплощении способ 300 можно использовать для изменения или поддержания реактивности в течение длительного времени в реакторе.

Как обсуждают более подробно ниже, содержащие хлориды топливные соли могут включать одну или более из UCl_4 , UCl_3 , UCl_3F , UCl_2F_2 и UClF_3 и/или любое из конкретных воплощений топливных солей, описанных в данном документе, можно модифицировать, как описано выше. Если используют неделивающие хлористое соединение, такую дополнительную соль хлорида металла можно выбрать из NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , BaCl_2 , KCl , SrCl_2 , VCl_3 , CrCl_3 , TiCl_4 , ZrCl_4 , ThCl_4 , AcCl_3 , NpCl_4 , AmCl_3 , LaCl_3 , CeCl_3 , PrCl_3 и/или NdCl_3 .

Топливные соли $\text{UCl}_3\text{-UCl}_4\text{-[X]Cl}_n$.

Воплощения урановых солей, подходящих для использования в качестве ядерного топлива, включают соли, которые являются смесью 0-100% UCl_3 , 0-100% UCl_4 и 0-95% соли хлорида металла. Таким образом, эти соли включают 100% UCl_3 топливную соль, 100% UCl_4 топливную соль, а также топливные соли, которые являются смесями UCl_3 и/или UCl_4 с дополнительной солью хлорида металла или без нее. На основании результатов для NaCl в качестве дополнительной соли хлорида металла, топливную соль, имеющую содержание NaCl менее 68 моль.%, считают подходящей на основе результатов моделирования. В другом воплощении урановые соли, подходящие для использования в качестве ядерного топлива, включают соли, которые являются смесью 0-100% UCl_3 , 0-100% UCl_4 и 0-95% соли хлорида металла, имеющей температуру плавления ниже 800, 700, 600, 500, 400 или 350°C. Для воплощений NaCl урановые соли, подходящие для использования в качестве ядерного топлива, включают соли, которые являются смесью 0-100% UCl_3 , 0-100% UCl_4 и 0-68% NaCl , имеющей температуру плавления каждой составляющей соли ниже 800, 700, 600, 500, 400 или 350°C. В еще одном воплощении содержание NaCl в топливной соли может изменяться от 12 до 68% NaCl .

Расплавленные хлориды значительно отличаются от исторически используемых фторидов в двух заслуживающих внимания аспектах. Во-первых, хлориды являются менее эффективными в замедлении нейтронов чем фториды. Это обеспечивает нейтроны быстрого спектра, которые существенны для режима бегущей волны. Во-вторых, и это более важно, хлориды предлагают возможность использования очень высоких концентраций тяжелых металлов в смесях с разумными температурами плавления, что важно для получения компактной конструкции реактора-размножителя на быстрых нейтронах. Фтористые соли обычно содержат не более 10-12 моль.% тяжелого металла с предложенными солевыми смесями, обычно содержащими молярные концентрации, составляющие 63-72 моль.% LiF (обогащенного до

99,997% ^7Li), 16-25 моль.% BeF_2 , 6,7-11,7 моль.% ThF_4 и только 0,3 моль.% UF_4 (тяжелый металл составляет 40-45 мас.%).

На фиг. 4 показана тройная фазовая диаграмма, рассчитанная для топливных солей UCl_3 - UCl_4 - NaCl на основе термодинамических моделей. На диаграмме 400 показана ожидаемая температура плавления для смеси UCl_3 - UCl_4 - NaCl . Особый интерес представляют смеси, имеющие температуру плавления менее 500°C , которые показаны в затемненной области 402 диаграммы 400. Точка 404 эвтектики имеет температуру плавления 338°C и состав 17 UCl_3 -40,5 UCl_4 -42,5 NaCl (т.е. 17 моль.% UCl_3 , 40,5 моль.% UCl_4 и 42,5 моль.% NaCl). Затемненная область 402 показывает огибающую температуры плавления 500°C . Движение к крайней правой стороне этой огибающей 402 предоставляет воплощение 17 UCl_3 -71 UCl_4 -12 NaCl , однако отметим, что много возможных составов существует внутри огибающей 402 в виде воплощений смесей топливных солей, имеющих температуру плавления ниже 500°C . Более того, если предел температуры плавления слегка расширить до 508°C , состав 34 UCl_3 -66 NaCl предоставляет вариант, который не содержит UCl_4 . Аналогично, тройная диаграмма 400 позволяет определить интервал конкретных воплощений топливной соли UCl_3 - UCl_4 - NaCl для любого данного предела температуры плавления от 800 до 338°C . Например, можно легко определить тройные соли с температурами плавления 300 - 550°C , 338 - 500°C и 338 - 450°C .

Конкретный состав смеси может включать любой состав, содержащий две или более соли из UCl_4 , UCl_3 или NaCl , так что получаемые содержание урана и температура плавления достигают требуемых уровней. В качестве неограничивающего примера конкретный состав можно выбрать так, что соответствующая температура плавления попадает в интервал от 330 до 800°C . В качестве другого неограничивающего примера конкретный состав можно выбрать так, что уровень общего содержания урана составляет 61 мас.% или более. Помимо выбора величины общего содержания урана состав топлива также можно задать так, чтобы он соответствовал выбранному количеству делящегося урана (в противоположность воспроизводимому). Например, конкретный состав топливной соли 108 можно выбрать так, что содержание ^{235}U в топливной соли составляет менее 20%.

В качестве части разработки начальной идеи был выполнен ряд расчетов для множества топливных солей, обогащений делящегося материала, размеров и мощностей. Как можно было бы ожидать, более высокие обогащения обеспечивают меньшие размеры активной зоны, однако имеют пониженный потенциал размножения. Системы с некоторой формой удаления продуктов деления могут достигать равновесного поведения, при этом другие воспроизводят ядерное топливо и затем в конечном счете перегружаются накоплением продуктов деления. Для выбора топливной соли существует множество вариантов, каждый с выгодами и рисками. В нижеследующем обсуждении определяют конкретные представляющие интерес воплощения, однако нижеследующее обсуждение не ограничивает заявленную область защиты изобретения только описанными ниже воплощениями, скорее рассматривают любые воплощения, определяемые из фиг. 4, а также любые воплощения, содержащие другие хлориды металлов, отличные от NaCl . Примеры дополнительных неделящихся хлоридов металлов включают NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , BaCl_2 , KCl , SrCl_2 , VCl_3 , CrCl_3 , TiCl_4 , ZrCl_4 , ThCl_4 , AcCl_3 , NpCl_4 , AmCl_3 , LaCl_3 , CeCl_3 , PrCl_3 и/или NdCl_3 .

Воплощения топливной соли UCl_4 .

В одном воплощении топливная соль 108 содержит UCl_4 . Например, топливная соль 108 может иметь содержание UCl_4 5 моль.% или выше. В другом воплощении топливная соль 108 реактора 100 может включать смесь UCl_4 , дополнительной соли хлорида урана и/или дополнительной соли хлорида металла (например, соли-носителя), так что содержание UCl_4 в смеси составляет 5 моль.% или выше. В других воплощениях содержание UCl_4 в смеси может быть на уровне или выше 0,01 моль.%, 0,1 моль.%, 0,5 моль.%, 1 моль.%, 2 моль.%, 3 моль.% или 4 моль.% UCl_4 . Следует отметить, что топливная соль 108, имеющая содержание UCl_4 5 моль.% или выше, может проявлять повышенные уровни коррозионного воздействия. Как обсуждают ниже, можно применить множество подходов для ослабления коррозии, вызванной повышенным содержанием хлоридов.

В другом воплощении топливная соль 108 реактора может включать смесь UCl_4 , дополнительной соли хлорида урана и/или дополнительной соли хлорида металла, так что концентрация урана в смеси составляет 61 мас.% или более.

В одном воплощении дополнительная соль хлорида урана включает UCl_3 , как описано более подробно ниже. В другом воплощении дополнительная соль хлорида металла может включать соль-носитель, хлористую соль продукта деления, хлористую соль актинида и/или хлористую соль лантанида. В качестве неограничивающего примера дополнительная соль хлорида металла может включать, но не ограничена перечисленным, NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , BaCl_2 , KCl , SrCl_2 , VCl_3 , CrCl_3 , TiCl_4 , ZrCl_4 , ThCl_4 , AcCl_3 , NpCl_4 , AmCl_3 , LaCl_3 , CeCl_3 , PrCl_3 и/или NdCl_3 .

В качестве неограничивающего примера топливная соль 108 реактора 100 может включать смесь UCl_4 и UCl_3 (без NaCl), так что состав смеси соответствует 82 UCl_4 -18 UCl_3 (в моль.%). Следует отметить, что такой состав топливной соли имеет содержание урана приблизительно 65 мас.% и температуру плавления 545°C .

В качестве другого неограничивающего примера топливная соль 108 реактора 100 может включать смесь UCl_4 , UCl_3 и NaCl , так что состав смеси соответствует 17 UCl_3 -71 UCl_4 -12 NaCl (в моль.%). Следу-

ет отметить, что такой состав топливной соли имеет содержание урана приблизительно 61 мас.% и температуру плавления приблизительно 500°C.

В качестве другого неограничивающего примера топливная соль 108 реактора 100 может включать смесь UCl_4 и $NaCl$ (без UCl_3), так что состав смеси соответствует 50 UCl_4 -50 $NaCl$ (в моль.%). Следует отметить, что такой состав топливной соли имеет температуру плавления приблизительно 368°C. Здесь следует отметить, что по мере увеличения количества лантанидов и/или плутония в топливной соли 108, они могут действовать аналогично UCl_3 , так как лантаниды и плутоний образуют треххлористые соединения (как обсуждено выше). В этом случае изменение состава может вызвать смещение свойств топливной соли 108 по направлению к эвтектике (как обсуждено выше), уменьшая таким образом температуру плавления состава.

В качестве еще одного примера в качестве топливной соли можно использовать чистый UCl_4 . Чистый UCl_4 имеет температуру плавления 590°C (как показано на фиг. 4).

Из-за более низкого содержания урана в составе 66 $NaCl$ -34 UCl_3 для достижения начальной критичности для двойной соли требуется большая активная зона, чем для содержащих UCl_4 составов. Например, для активной зоны 102 реактора для достижения начальной критичности может потребоваться объем в 3-4 раза больший, чем требуется для содержащих UCl_4 вариантов топливной соли 108.

На фиг. 5 показан смоделированный k_{eff} в зависимости от времени для большей активной зоны реактора, показанного на фиг. 1A-1F, использующего состав 66 $NaCl$ -34 UCl_3 . Кривая 502 изображает кривую смоделированного k_{eff} для уровня мощности 5800 МВт, а кривая 504 изображает кривую смоделированного k_{eff} для уровня мощности 3420 МВт. Следует отметить, что обе кривые 502, 504 смоделированы для работы с обедненным урановым (ОУ) сырьем и без специального удаления лантанидов. Как показано на фиг. 5, в случае 3420 МВт (кривая 504) можно работать в течение около 70 лет до перехода в подкритический режим, при этом в случае 5800 МВт (кривая 502) можно работать в течение приблизительно 41 года до перехода в подкритический режим. Кроме того, показанная на фиг. 5 модель также предсказывает 43%-ное выгорание топлива без какого-либо удаления лантанидов в течение годов работы. Таким образом, моделирование показывает, что урановая топливная соль на основе хлоридов может быть эффективной при понижении зависимости реакторов на расплавленных солях предшествующего уровня техники от обогащенного урана для поддержания критичности.

На фиг. 6 показана технологическая схема 600, представляющая пример операций, относящихся к заправке топливом быстрого ядерного реактора на расплавленных солях согласно одному или более воплощениям настоящего изобретения. Хотя операции на фиг. 6 представлены в показанной последовательности, необходимо понимать, что различные операции можно выполнять в другом порядке, чем тот, который показан, или можно выполнять параллельно.

Операция 602 технологической схемы 600 включает предоставление объема UCl_4 . В качестве неограничивающего примера, выбранный объем UCl_4 можно предоставить, по существу, в чистой форме. В качестве другого неограничивающего примера выбранный объем UCl_4 можно предоставить в форме смеси UCl_4 с другой солью, такой как, но не ограниченной этим, соль-носитель (например, $NaCl$).

Операция 604 технологической схемы 600 включает предоставление объема по меньшей мере одного из дополнительной соли хлорида урана или дополнительной соли хлорида металла. В качестве неограничивающего примера дополнительный хлорид урана может включать, но не ограничен этим, UCl_3 . В одном воплощении можно предоставить выбранный объем, по существу, чистого UCl_3 . В другом воплощении можно предоставить выбранный объем UCl_3 в форме смеси UCl_3 с другой солью, такой как, но не ограниченной этим, соль-носитель (например, $NaCl$). В качестве другого неограничивающего примера дополнительный хлорид металла включает, но не ограничен перечисленным, одно или более из $NaCl$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $BaCl_2$, KCl , $SrCl_2$, VCl_3 , $CrCl_3$, $TiCl_4$, $ZrCl_4$, $ThCl_4$, $AcCl_3$, $NpCl_4$, $AmCl_3$, $LaCl_3$, $CeCl_3$, $PrCl_3$ и/или $NdCl_3$. В одном воплощении можно предоставить выбранный объем дополнительного хлорида металла. В другом воплощении можно предоставить выбранный объем дополнительного хлорида металла в форме смеси хлорида металла с другой солью, такой как, но не ограниченной этим, соль-носитель.

Операция 606 технологической схемы 600 включает смешивание объема UCl_4 с объемом по меньшей мере одной из дополнительной соли хлорида урана или дополнительной соли хлорида металла с образованием расплавленной хлористой соли ядерного топлива, имеющей содержание UCl_4 более 5 моль.%. В качестве неограничивающего примера объем UCl_4 , представленный в операции 602, можно смешать с объемом операции 604 так, что получаемая смесь расплавленной хлористой соли имеет содержание UCl_4 более 5 моль.%. В этой связи объем UCl_4 операции 602 и объемы дополнительного хлорида урана и/или дополнительного хлорида металла можно выбрать так, что получаемая смесь расплавленной хлористой соли имеет содержание UCl_4 более 5 моль.%. Дополнительно или альтернативно, операция 606 включает смешивание объема UCl_4 с объемом дополнительной соли хлорида урана и/или дополнительной соли хлорида металла с образованием смеси расплавленной хлористой соли, имеющей температуру плавления от 330 до 800°C.

В одном воплощении объемы операций 602 и 604 можно выбрать и смешать так, что получаемая смесь расплавленной хлористой соли имеет химический состав (приблизительно) 82 UCl_4 -18 UCl_3 . В другом воплощении объемы операций 602 и 604 можно выбрать и смешать так, что получаемая смесь

расплавленной хлористой соли имеет химический состав (приблизительно) 17 UCl_3 - 71 UCl_4 - 12 NaCl . В другом воплощении объемы операций 602 и 604 можно выбрать и смешать так, что получаемая смесь расплавленной хлористой соли имеет химический состав (приблизительно) 50 UCl_4 - 50 NaCl .

Операция 608 технологической схемы 600 включает подачу расплавленной хлористой соли ядерного топлива, содержащей некоторое количество UCl_4 , как описано выше (например, содержание UCl_4 в смеси может быть на уровне или выше 0,01 моль.%, 0,1 моль.%, 0,5 моль.%, 1 моль.%, 2 моль.%, 3 моль.%, 4 моль.% или 5 моль.%), по меньшей мере, в активную зону быстрого ядерного реактора на расплавленных солях. В одном воплощении смесь операции 606 можно образовать путем смешивания объема UCl_4 с объемом по меньшей мере одного из дополнительной соли хлорида урана или дополнительной соли хлорида металла внутри быстрого ядерного реактора на расплавленных солях. В другом воплощении смесь операции 606 можно образовать путем смешивания объема UCl_4 с объемом по меньшей мере одного из дополнительной соли хлорида урана или дополнительной соли хлорида металла в месте вне быстрого ядерного реактора на расплавленных солях, таком как, но не ограниченном этим, смесительный сосуд. В связи с этим после получения смеси UCl_4 с объемом по меньшей мере одного из дополнительной соли хлорида урана или дополнительной соли хлорида металла, смесь расплавленных хлористых солей можно загрузить в реактор 100. Реактор затем может работать так, как описано в данном документе, например, путем инициации деления в топливной соли и затем поддержания режима бегущей волны в активной зоне в течение некоторого периода времени.

В одном воплощении концентрацию одного или более дополнительных хлоридов металлов (обсужденных выше) выбирают так, чтобы она находилась на уровне или была ниже концентрации осаждения для осаждения дополнительного хлорида металла в смеси ядерного топлива. Например, концентрацию продукта деления можно удерживать ниже концентрации, связанной с этим продуктом деления, которая вызывала бы осаждение из топливного раствора другого составляющего топливной соли 108, такого как Pu.

Снова следует отметить, что представленные выше составы расплавленных топливных солей не являются ограничениями для реактора 100 или связанных с ним способов по настоящему изобретению. Вместо этого конкретные составы представлены лишь в целях иллюстрации. Понятно, что в реакторе 100 по настоящему изобретению можно применять любую расплавленную хлористую топливную соль.

Воплощения топливной соли UCl_3 .

Помимо описанных выше воплощений, которые содержат UCl_3 в сочетании с UCl_4 , дополнительные воплощения топливных солей включают UCl_3 в отсутствие какого-либо количества UCl_4 . Эти воплощения и связанные с ними температуры плавления также показаны на фиг. 4 вдоль левой оси. Следует отметить, что не содержащие UCl_4 топливные смеси могут представлять особый интерес в случае, если коррозионные проблемы UCl_4 становятся значительными, и они могут уменьшать потребность в технологиях ослабления коррозии (описанных ниже). В качестве неограничивающего примера топливная соль 108 реактора 100 может включать смесь UCl_4 и NaCl , так что состав смеси соответствует 66 NaCl - 34 UCl_3 (в моль.%). Следует отметить, что такой состав топливной соли имеет температуру плавления приблизительно 508°C , однако пониженный уровень содержания урана по сравнению с содержащими UCl_4 составами (описанными выше).

Воплощения топливной соли UCl_3 также включают чистый UCl_3 , однако его температура плавления немного превышает 800°C и, таким образом, это воплощение может быть неподходящим для некоторых конструкций реактора.

Воплощения смешанных хлористых-фтористых топливных солей.

Смешанные хлористые-фтористые соли актинидов и в особенности урана также могут быть подходящими делящимися солями для применения в реакторе на расплавленных солях. UCl_3F является воплощением потенциально подходящей хлористой-фтористой соли. UCl_3F имеет температуру плавления 410 - 440°C , которая меньше температуры плавления чистого UCl_4 , составляющей 590°C . Из-за молекулярной симметрии и химического состава соли UCl_3F , также ожидают, что UCl_3F имеет более низкую летучесть по сравнению с UCl_4 , что делает ее даже более привлекательной в качестве топливной соли в низкотемпературном реакторе на расплавленных солях (например, менее 800°C или даже менее 550°C).

На основе приведенной выше информации, показанной на фиг. 4 расчетной тройной диаграммы для UCl_4 и схожести между UCl_3F и UCl_4 , ожидают, что UCl_3F можно использовать для замены некоторого количества или всего UCl_4 в смеси топливной соли для получения воплощений топливных солей, которые обладают даже лучшими свойствами (например, более низкой температурой плавления и более низкой летучестью), при этом имеют по существу такую же реактивность. Хотя тройная диаграмма для UCl_3F , UCl_3 и NaCl не была рассчитана, ожидают, что тройная диаграмма для UCl_3F , UCl_3 и NaCl покажет минимальную температуру плавления в положении вблизи соответствующей точки 404 эвтектики на фиг. 4 для соли 17 UCl_3 - $40,5 \text{ UCl}_4$ - $42,5 \text{ NaCl}$. То есть ожидают, что такая диаграмма для UCl_3F , UCl_3 и NaCl покажет похожую тенденцию пониженной температуры плавления в области 15 - 20 моль.% UCl_3 , а остальное составляет 35 - 45 моль.% NaCl и 35 - 45 моль.% UCl_3F . Учитывая, что UCl_3F обычно имеет температуру плавления существенно меньше температуры плавления UCl_4 , ожидают, что замена UCl_4 на UCl_3F в воплощениях топливных солей приведет к топливным солям с еще более низкими температура-

ми плавления, чем те, которые наблюдались на фиг. 4.

Учитывая эту информацию, урановые воплощения топливных солей Cl_3F включают соли, содержащие 1-100 моль.% UCl_3F . Например, воплощения смешанных хлористых-фтористых топливных солей включают соли по меньшей мере с 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 и 99% UCl_3F . Также возможна топливная соль из чистого или, по существу, чистого UCl_3F , так как его температура плавления находится в пределах рабочего диапазона описанных в данном документе реакторов. В альтернативном воплощении топливная соль UCl_3F может содержать только обнаруживаемое количество UCl_3F . Хотя понятно, что пределы обнаружения могут изменяться при улучшении технологии, в одном воплощении обнаруживаемое количество означает количество, равное или большее 0,01 моль.%.

Другие соли, которые можно объединять с UCl_3F для создания воплощений топливных солей, включают UCl_3 , $NaCl$ и UCl_4 . Как обсуждали выше, особенно предусмотрены соли UCl_3F-UCl_3-NaCl , включая воплощения, содержащие 15-20 моль.% UCl_3 , а остальное составляет 35-45 моль.% $NaCl$ и 35-45 моль.% UCl_3F . Кроме этого, можно включить любые другие соли, обсужденные в данном документе, такие как $ThCl_4$, фтористые соли урана, неделяющиеся соли и бромистые соли урана.

Помимо UCl_3F , другие смешанные соли актинидов, такие как UCl_2F_2 и $UClF_3$, могут подходить для применения в качестве топливной соли или составляющей топливной соли в реакторе на расплавленных солях. Смешанные хлористые-фтористые соли плутония или тория также могут подходить для применения в качестве расплавленных топливных солей.

Воплощения способов создания UCl_3F , UCl_2F_2 и $UClF_3$ описаны ниже, включая эксперимент, в котором создавали UCl_3F .

Также возможны воплощения модифицированной хлористой топливной соли, содержащие измененное отношение ^{37}Cl к общему количеству Cl , и их можно использовать для расплавленных топливных солей. Кроме того, воплощения смешанных хлористых-фтористых топливных солей могут включать неделяющиеся хлористые соединения помимо или вместо $NaCl$, такие как $MgCl_2$, $CaCl_2$, $BaCl_2$, KCl , $SrCl_2$, VCl_3 , $CrCl_3$, $TiCl_4$, $ZrCl_4$, $ThCl_4$, $AcCl_3$, $NpCl_4$, $AmCl_3$, $LaCl_3$, $CeCl_3$, $PrCl_3$ и/или $NdCl_3$.

При эксплуатации воплощения смешанных урановых хлористых-фтористых солей используют таким же образом, как описано выше для воплощений хлористых солей. Например, создают требуемый состав соли, такой как 15-20 моль.% UCl_3 , а остальное составляет 35-45 моль.% $NaCl$ и 35-45 моль.% UCl_3F . Это можно выполнить на удалении или путем добавления составляющих непосредственно в активную зону реактора. Составляющие можно добавлять в твердой или жидкой форме. После загрузки топливной соли в активную зону реактора реактор затем доводят до рабочих условий для начала цепной реакции, как описано выше.

Ториевые хлористые топливные соли.

В одном воплощении топливная соль 108 может содержать выбранное количество тория. Например, в случае соли ядерного топлива на основе хлорида тория может присутствовать в топливной соли 108 в форме хлорида (например, $ThCl_4$). Способы получения $ThCl_4$ известны в технике и можно использовать подходящий способ.

Было показано, что введение $ThCl_4$ в системы хлористых солей уменьшает температуру плавления системы приблизительно на 50°C. Таким образом, на основе информации из тройной диаграммы соли, показанной на фиг. 4, воплощения $ThCl_4$ должны иметь температуру плавления на уровне или ниже той, которая обнаруживается в тройной системе, и при этом они должны быть способны поддерживать реакцию размножения и выгорания в расплавленном состоянии. Например, на основе информации из тройной диаграммы должны быть достижимы температуры плавления ниже 800°C и даже 550°C.

Воплощением, в котором используют $ThCl_4$, является $UCl_3F-UCl_4-UCl_3-ThCl_4-[X]Cl$, где, как и выше, $[X]Cl$ является дополнительной неделяющейся солью. В этих воплощениях при необходимости можно определить молярные отношения любой из различных хлористых солей для получения требуемой температуры плавления. В одном воплощении количество $ThCl_4$ изменяется от обнаруживаемого количества $ThCl_4$ до 80 моль.%, и количество других компонентов (т.е. UCl_3F , UCl_4 , UCl_3 и $[X]Cl$) независимо изменяется от 0 до 80%. Таким образом, такие воплощения, как $UCl_3F-ThCl_4-[X]Cl$ и $UCl_3-ThCl_4-[X]Cl$ предусмотрены также, как и $UCl_4-UCl_3-ThCl_4-NaCl$.

Воплощения урановых бромистых топливных солей.

Помимо описанных в данном документе воплощений хлористых топливных солей в качестве альтернативы или запасного варианта хлористой топливной соли также возможны бромистые топливные соли. Характерной особенностью реактора на расплавленной хлористой топливной соли является способность к размножению и выгоранию своего собственного деелящегося топлива из воспроизводящегося топлива в силу очень быстрого спектра нейтронов. Это обеспечивают путем использования обогащенной хлористой соли для связывания атомов актинидов. Хлор, в общем, является плохим замедлителем нейтронов по сравнению с другими материалами, подобным воде, графиту или фтору. Он также имеет относительно небольшое сечение захвата нейтронов для паразитного захвата нейтронов (потерянные нейтроны). Эффективная солевая составляющая должна создавать сильную химическую связь с актинидами, существовать с низким давлением паров, иметь высокое число Z для обеспечения быстрого спектра и

иметь малое сечение захвата (n, γ). ^{37}Cl является превосходным выбором, как обсуждено выше. Однако на основе этого анализа также подходящим может быть бром.

Бромистая соль ($\text{UBr}_3, \text{UBr}_4$) находится в той же группе и имеет похожие химические свойства с хлористыми солями. Бром является материалом с более высоким Z , чем Cl , так что он должен меньше замедлять нейтроны и приводить к более быстрому спектру. Химическая связь брома должна быть похожа на химическую связь Cl . Эти характерные особенности делают его привлекательной альтернативой Cl соли. UBr_4 имеет зарегистрированную температуру плавления 519°C , более низкую, чем UCl_4 , и таким образом должен подходить для использования в системах и способах, описанных в данном документе. Хотя зарегистрированная температура кипения UBr_4 составляет 791°C , так что работа при высоких температурах по всей видимости невозможна, это не является ограничением для ядерных реакторов, которые сконструированы для работы в некоторых из более низких определенных в данном документе интервалов, например $330\text{--}550^\circ\text{C}$, $338\text{--}500^\circ\text{C}$ и $338\text{--}450^\circ\text{C}$.

На фиг. 7 показано сечение захвата (n, γ) для основных изотопов Cl и Br , где видно, что сечение захвата (n, γ) для Br больше, чем для Cl в большей части энергетического спектра. Фактически, ^{37}Cl (кривая 708 фиг. 7) имеет меньшее сечение захвата почти по всему спектру по сравнению с ^{79}Br (кривая 706 фиг. 7) и ^{81}Br (кривая 702 фиг. 7). Для ^{35}Cl (кривая 702 фиг. 7) эта величина также в общем меньше, чем для Br , выше $1 \cdot 10^{-4}$ МэВ.

Кроме того, изучали пригодность бромистой соли для действительной поддержки реакции размножения и выгорания. Это исследование начали с такого же химического изготовления соли и обогащения основной хлористой соли. Это была соль $17 \text{UBr}_3\text{--}71 \text{UBr}_4\text{--}12 \text{NaBr}$ и обогащение $12,6\%$ ^{235}U . Эту топливную соль моделировали в стандартном 1 ГВт быстром реакторе на расплавленных хлоридах без каких-либо других изменений. Получаемая система была субкритической и требовала либо увеличения размера активной зоны реактора, либо увеличения обогащения. Увеличение обогащения до $19,99\%$ (максимально разрешенное для того, чтобы считать топливо низко обогащенным) в модели приводило к кривой размножения и выгорания, показанной на фиг. 8. Реактор начинает работу при искусственно высоком k_{eff} , выгорает в течение нескольких десятилетий, однако в результате размножает достаточно Pu и второстепенных актинидов для повторного увеличения k_{eff} . Даже без оптимизации системы бромистой соли результаты моделирования на фиг. 8 показывают, что воплощения бромистых топливных солей действительно приводят к размножению и выгоранию, и что реактор на расплавленных бромистых солях может работать. Таким образом, подходящими являются содержащие UBr_3 и/или UBr_4 топливные соли, в которых топливные соли обогащены ^{235}U до более 19% .

Существует множество возможностей оптимизации для максимального увеличения характеристики, при этом минимизации объемов, необходимых для поддержания реакции размножения и выгорания. Во-первых, можно обнаружить, что минимальное обогащение обеспечивает характеристику размножения и выгорания без срыва в субкритический режим. Во-вторых, определение размеров отражателей и конфигураций материалов можно использовать для подгонки спектра в области, которая увеличивает до максимума размножение. В-третьих, в соответствии с описанными выше хлоридными воплощениями, можно исследовать различные сочетания топливных солей ($\text{XXUBr}_3\text{--YYUBr}_4\text{--ZZNaBr}$) для нахождения оптимальных воплощений.

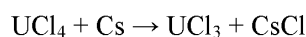
Кроме того, бром-анионы, используемые в одном из компонентов соли, можно модифицировать аналогично тому, что описано для хлористых солей с использованием ^{37}Cl . Как показано на фиг. 7, два стабильных изотопа брома, ^{79}Br и ^{81}Br , имеют различные сечения захвата нейтронов. Таким образом, характеристики захвата солью можно подогнать путем изменения соотношения этих изотопов, используемых в бромистых солях. В одном воплощении все содержащие бром соединения можно создать из настолько чистого, насколько это возможно, сырья либо ^{79}Br , либо ^{81}Br . Например, соединения топливной соли на основе бромида можно создать так, что более $90, 95, 98, 99\%$ или даже $99,9\%$ бром-ионов в топливной соли являются либо ^{79}Br , либо ^{81}Br . Альтернативно, можно разработать ядерное топливо на основе бромидов для достижения любого целевого или выбранного процентного содержания либо ^{79}Br , либо ^{81}Br , либо сочетания двух других бром-ионов в топливе или различных компонентах топлива. Например, в одном воплощении можно создать соединения топливной соли на основе бромидов так, что менее $10, 5, 2, 1$ или даже $0,1\%$ бром-ионов в топливной соли являются ^{81}Br , причем остальное является ^{79}Br . Альтернативно, можно создать соединения топливной соли на основе бромидов так, что более $10, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90\%$ или более, вплоть до 100% описанных выше бром-ионов в топливной соли являются Br .

Способы получения топлива из хлоридов урана.

Различные способы получения UCl_4 и UCl_3 известны в технике, и можно использовать любой подходящий способ. Например, UCl_4 можно получить посредством химической реакции



Аналогично, UCl_3 можно получить с использованием одной из двух следующих реакций:

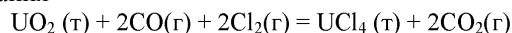


Используя указанные выше способы можно создать любое количество UCl_4 и UCl_3 и затем смешать с образованием любого из описанных выше воплощений топливной соли из хлоридов урана. Помимо указанных выше способов далее описан другой способ, в котором можно эффективно и просто создать воплощение UCl_4-UCl_3-NaCl .

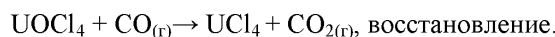
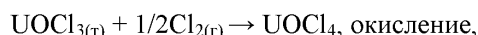
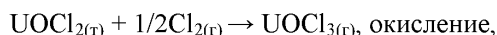
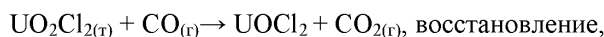
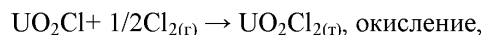
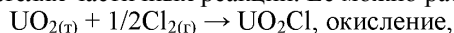
Синтезированные соли подвергают строгому химическому регулированию для минимизации коррозии и осаждения ядерного материала. Это химическое регулирование так или иначе связано с устранением образования оксидов и гидроксидов, в особенности связанных с катионом урана, которые все являются более стабильными, чем их хлоридные аналоги. Поэтому после изготовления компонентов соли они не должны контактировать с оксидными слоями, кислородом или водой в течение их срока службы. Чтобы удовлетворить этому строгому требованию, можно очищать и обрабатывать соли в инертной атмосфере в замкнутом контейнере. Когда компоненты соли требуется смешать, эту работу необходимо выполнять без подвергания воздействию воздуха, воды или кислорода. Хранение необходимо осуществлять в герметичных, не содержащих оксидов емкостях с положительным парциальным давлением инертного газа. Эти действия по строгой чистоте совместно с изотопным обогащением и высокими температурами приводят к уникальным проблемам.

Хотя существует много более простых способов лабораторного масштаба, предлагают использовать четырехстадийный способ для создания обогащенных хлором-37 смесей хлористых солей высокой чистоты. Во-первых, диоксид урана и карбонат натрия должны реагировать совместно ниже температуры перехода в жидкое состояние в соединенных последовательно сосудах с регулируемой смесью хлора и газообразного монооксида углерода, с образованием тетрахлорида урана, хлорида натрия и газа диоксида углерода. Во-вторых, тетрахлорид урана нагревают ниже температуры перехода в жидкое состояние и поверх него медленно пропускают сухой аргон, облегчая его сублимацию и последующее перемещение через нагретые трубопроводы в охлаждающий слой из свежего хлорида натрия. В-третьих, в смесь добавляют кремний UCl_4-NaCl и оставляют для реакции в жидкой фазе с получением тетрахлорида кремния, который можно барботировать из соли. Вместо кремния можно использовать и, при необходимости, исследовать другие восстановители. В-четвертых, соль перемещают в контейнер для хранения и хранят в холодном состоянии под аргоном.

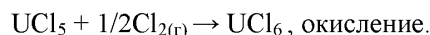
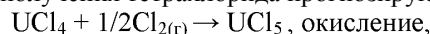
На фиг. 9 показано воплощение способа получения содержащей UCl_4 топливной соли на основе приведенного выше способа. В показанном воплощении способ начинается с операции 902 приведения в контакт диоксида урана. При операции 902 по приведения в контакт диоксида урана объем UO_2 приводят в контакт с газообразными хлором и монооксидом углерода при температуре, которая обеспечивает образование UCl_4 . В одном воплощении эту операцию можно выполнять путем предоставления некоторого количества твердого UO_2 . Путем предоставления твердого UO_2 в форме с высокой площадью поверхности, которая обеспечивает легкий контакт с газом, такой как порошок, частицы или пористая матрица, реакцию можно сделать более эффективной. Результат операции 902 приведения в контакт состоит в том, что по меньшей мере часть UO_2 , которая приходит в контакт с газами, превращается в UCl_4 посредством реакции карбохлорирования



Эта реакция является уникальной, так как она содержит как восстановитель, монооксид углерода, так и окислитель, хлор. Эти два компонента колеблют степень окисления урана от IV до VI, чтобы удовлетворить термодинамике получения тетрахлорида урана из намного более стабильного оксида. Реакция является очень сложной в показателях частичных реакций. Ее можно рассматривать по порядку как



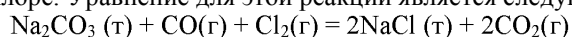
Важно отметить, что после получения тетрахлорида прогнозируют две реакции



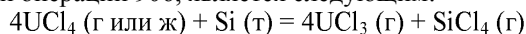
Известны две реакции окисления с образованием пентахлорида урана и гексахлорида урана, однако прогнозируют, что эти продукты разлагаются до тетрахлорида урана при $250^\circ C$. Чтобы избежать получения пентахлорида урана и гексахлорида урана, а также плавления или сублимации тетрахлорида урана, реактор можно поддерживать при температуре от 250 до $400^\circ C$.

Как описано выше, часть хлора или весь хлор может представлять собой ^{37}Cl для того, чтобы достичь целевого отношения ^{37}Cl к общему количеству Cl в получаемом UCl_4 или Cl во всем топливе, как обсуждено выше. В зависимости от требуемого отношения, можно использовать множество источников различных изотопов Cl для достижения требуемого отношения ^{37}Cl к общему количеству Cl , например, источник чистого ^{37}Cl , источник природного Cl , источник чистого ^{35}Cl и/или другую смесь ^{35}Cl и ^{37}Cl .

Способ 900 также включает операцию 904 приведения в контакт карбоната натрия (Na_2CO_3). Аналогично операции 902 приведения в контакт UO_2 , операция 904 приведения в контакт Na_2CO_3 включает приведение объема Na_2CO_3 в контакт с газообразными хлором и монооксидом углерода при температуре, которая обеспечивает образование NaCl . В одном воплощении эту операцию можно выполнять путем предоставления некоторого количества твердого Na_2CO_3 . Путем предоставления твердого Na_2CO_3 в форме с высокой площадью поверхности, которая обеспечивает легкий контакт с газом, такой как порошок, частицы или пористая матрица, реакцию можно сделать более эффективной. Результат операции 904 приведения в контакт карбоната кальция состоит в том, что по меньшей мере часть Na_2CO_3 , которая приходит в контакт с газами, превращается в NaCl . Снова, как описано выше, степень обогащения Cl (например, обогащения ^{37}Cl) в конечном NaCl можно регулировать путем регулирования обогащения в используемом газообразном хлоре. Уравнение для этой реакции является следующим:



Способ 900 также включает операцию 906 приведения в контакт с кремнием, при котором жидкий или газообразный UCl_4 приводят в контакт с металлическим кремнием. В одном воплощении операция 906 приведения в контакт с кремнием может включать регулирование условий реакции для вызывания указанной реакции $\text{UCl}_4\text{-Si}$ или протекающих реакций, при этом количество образующегося UCl_3 регулируют с помощью используемого количества Si , а UCl_4 предоставляют в избытке. Эту операцию 906 можно выполнять путем предоставления избыточного количества жидкого UCl_4 и погружения известного количества кремния в жидкость до тех пор, пока не прореагирует весь или, по существу, весь Si . Результатом операции 906 приведения в контакт с кремнием является то, что по меньшей мере часть UCl_4 , которая приходит в контакт с газами, превращается в UCl_3 . Количество UCl_4 , которое превращается в UCl_3 , является стехиометрическим с количеством используемого Si , так как Si является сильно реакционноспособным по отношению к UCl_4 , но не к UCl_3 . Поэтому с известным исходным количеством UCl_4 можно получить любую требуемую смесь $\text{UCl}_4\text{-UCl}_3$, просто регулируя количество Si , помещенного в контакт с газообразным UCl_4 , и количество UCl_4 . Уравнение подходящей реакции, которую можно использовать в этом воплощении операции 906, является следующим:



Тетрахлорид кремния кипит при 57°C , при температурах расплавленной соли легко испаряется и выносится аргоном. После удаления его можно собрать или привести во взаимодействие с ванной нейтрализации. Существующий в природе оксидный слой, диоксид кремния, является инертным к соли и существует в виде суспензии или оседает в виде осадка. Его присутствие не влияет на качество соли.

Также возможны другие реакции. Например, операция 906 приведения в контакт с кремнием может включать использование силана (SiH_4) или другого кремнийсодержащего газа, такого как дихлорид кремния (SiCl_2), при условиях температуры и давления, обеспечивающих образование UCl_3 и SiCl_4 из UCl_4 . В течение этой реакции UCl_4 может находиться либо в газообразной, либо в твердой форме, в зависимости от условий температуры и давления.

В альтернативном воплощении вместо использования избытка UCl_4 в операции 906 приведения в контакт с кремнием можно превращать известное количество UCl_4 в такое же стехиометрическое количество UCl_3 при избытке Si . Так как целью является образование известного количества UCl_3 и получаемые виды хлорида кремния не важны, выполнение операции 906 приведения в контакт с кремнием в избытке Si может быть более простым, чем регулирование условий реакции.

Операции 902, 904, 906 приведения в контакт можно выполнять, используя любые подходящие сосуды или оборудование для приведения в контакт, известные в настоящее время или разработанные в будущем. Например, в одном воплощении контактирующий твердый материал представляет собой сыпучие частицы или порошок, и газообразный материал протекает или циркулирует под давлением через сосуд для приведения в контакт (например, поступает в клапан на одном конце сосуда и удаляется из клапана на другом конце сосуда), так что сосуд временно становится реактором с насадкой или, если расход через контейнер является достаточным, реактором с псевдоожиженным слоем. В этих воплощениях приведение газов в контакт с твердым материалом выполняют без удаления твердого материала из сосуда.

Способ 900 дополнительно включает смешивание образованных UCl_3 , UCl_4 и NaCl с получением требуемого воплощения топливной соли. Смешивание можно осуществлять, хотя UCl_3 , UCl_4 и NaCl независимо находятся в газовой, жидкой или твердой фазе. Например, соответствующее количество каждого соединения можно получить по отдельности, затем отдельные соединения можно нагреть до расплавленного состояния и переместить в один контейнер, в котором их оставляют перемешиваться и отверждаться. Это создает воплощение твердой топливной соли, которую легко транспортировать. Как отме-

чали ранее, компоненты можно смешивать и/или расплавлять внутри или вне корпуса реактора.

Способ 900 можно выполнять в виде независимых операций или его можно выполнять таким образом, при котором согласуют выполнение операций. Например, один и тот же газообразный хлор можно использовать в операции 902 приведения в контакт UO_2 и в операции 904 приведения в контакт Na_2CO_3 путем соединения сосудов для приведения в контакт.

На фиг. 10 показано воплощение согласованного способа получения содержащей UCl_4 топливной соли на основе фиг. 9. В согласованном способе 1000 в операции 1002 подготовки системы предоставляют первый сосуд для приведения в контакт, содержащий твердый UO_2 , второй сосуд для приведения в контакт, содержащий твердый Na_2CO_3 , и сборный сосуд, содержащий твердый элементарный Si. Эта операция 1002 также включает предоставление Cl_2 и CO, а также доведение всех компонентов системы до соответствующих рабочих условий, например 200-550°C и 100-500 кПа (1-5 атм). В одном воплощении можно приготовить сосуды с инертным газом, таким как аргон, заполняющим газовое пространство вокруг твердого содержимого.

Как описано выше, газообразный Cl_2 может содержать модифицированное количество ^{37}Cl (т.е. количество, отличное от встречающегося в природе количества ^{37}Cl , составляющего 24%) для изменения замедления и поглощения нейтронов содержанием Cl в конечной топливной соли. Например, в одном воплощении модифицированный Cl_2 может содержать менее 23% ^{37}Cl . В другом воплощении газообразный Cl_2 может содержать более 25% ^{37}Cl .

На фиг. 11 показано схема сосудов для приведения в контакт и их соединений, подходящая для использования при выполнении способа по фиг. 10. На фиг. 11 показаны первый сосуд 1102 для приведения в контакт, содержащий твердый UO_2 , второй сосуд 1104 для приведения в контакт, содержащий твердый Na_2CO_3 , и сборный сосуд 1106, содержащий твердый металлический кремний (Si). Сосуды 1102, 1104, 1106 соединены так, что газ может протекать через первый сосуд 1102 и затем через второй сосуд 1104. Сборный сосуд 1106 дополнительно соединен со вторым сосудом 1104 так, что он может принимать газ и/или жидкость из второго сосуда 1104, например, посредством силы тяжести или вызванной разницы давлений между сосудами 1104, 1106. В альтернативном воплощении Si можно добавить во второй сосуд 1104 или предоставить в промежуточном сосуде для приведения в контакт (не показан).

Источник 1108 Cl_2 , источник 1110 CO и источник 1112 инертного газа показаны в виде газовых баллонов, хотя можно использовать любой источник. В показанном воплощении CO и Cl_2 соединены только с первым сосудом 1102, при этом инертный газ (показанный как аргон, хотя можно использовать любой инертный газ) соединен со всеми сосудами, так что можно независимо регулировать среду в каждом сосуде.

Вспомогательные элементы, такие как клапаны, фильтры, регулирующие клапаны, датчики давления и температуры, расходомеры и регуляторы расхода, оборудование для нагрева и охлаждения, насосы и компрессоры, не показаны, специалист легко поймет как применить эти элементы для достижения описанных в данном документе результатов. Аналогично, соединительные элементы и входные отверстия, элементы для внутренней диффузии и другие элементы можно использовать по необходимости, и они специально не показаны на фиг. 11.

Возвращаясь теперь к фиг. 10, после того, как система подготовлена в операции 1002 подготовки, Cl_2 и CO пропускают через первый сосуд 1102 и второй сосуд 1104, показанные на фиг. 11, в операции 1104 пропускания реакционного газа. Эта операция служит для контакта UO_2 и Na_2CO_3 с Cl_2 и CO, так что получают UCl_4 и NaCl, соответственно, в каждом сосуде. Газы можно пропускать через каждый сосуд 1102, 1104 один раз (один проход) или их рециркулируют в течение периода времени. Например, в одном воплощении операцию 1004 пропускания реакционного газа можно выполнять до тех пор, пока весь UO_2 не превратится в UCl_4 , и/или до тех пор, пока весь Na_2CO_3 не превратится в NaCl. Альтернативно, операцию 1004 пропускания реакционного газа можно выполнять только в течение фиксированного периода времени, достаточного для получения настолько большого количества UCl_4 и NaCl, насколько в настоящее время необходимо для создания конечной топливной соли, или большего количества.

После пропускания газов через два сосуда 1102, 1104 газы можно собрать для повторной обработки и повторного использования. В частности, если используют газообразный обогащенный Cl_2 , может быть экономичным извлечь настолько много газообразного Cl, насколько это возможно. Альтернативно, газы можно обработать и выпустить в окружающую среду, например, путем пропускания газов через газоочиститель на основе оксида меди, который уменьшает содержание CO.

Полученное количество UCl_4 и NaCl зависит от рабочих условий и того, насколько долго газы протекают через сосуды 1102, 1104. Таким образом, оператор может легко регулировать систему 1100 для получения требуемого количества каждого материала. Кроме того, относительный размер и форму сосудов 1102, 1104 можно регулировать так, что для данного количества UCl_4 создают конкретное относительное количество NaCl за одну операцию. Это обеспечивает систему, предназначенную для создания любой требуемой топливной соли UCl_4 -NaCl, и, более обобщенно, как обсуждается более подробно ниже со ссылкой на операцию 1012, любой топливной соли UCl_3 - UCl_4 -NaCl.

В системе воплощения, показанного на фиг. 11, сосуды соединены последовательно и газы протекают сперва через первый сосуд и затем через второй сосуд. В альтернативном воплощении газы могут

протекать независимо через каждый сосуд. Это альтернативное воплощение позволяет использовать различные источники (и поэтому степени обогащения) Cl_2 .

После пропускания газов через два сосуда 1102, 1104 и получения таким образом, по меньшей мере, некоторого количества UCl_4 в первом сосуде 1102 и NaCl во втором сосуде 1104, выполняют операцию 1106 газификации UCl_4 , при которой температуру и/или давление первого сосуда 1102 регулируют так, что UCl_4 переходит из твердой фазы в газовую фазу. В одном воплощении превращение происходит через сублимацию и UCl_4 не проходит через жидкую фазу. В альтернативном воплощении условия температуры и давления регулируют так, что UCl_4 сперва превращается в жидкость, а затем она выкипает с образованием газа. В одном воплощении при операции 1006 газификации можно поддерживать условия сублимации в течение некоторого периода времени, выбранного так, что большая часть или весь UCl_4 превращается в газовую фазу.

В одном воплощении карбохлорирование диоксида урана проходит полностью. Однако степень превращения реакции не имеет значения, за исключением целей эффективности. Любую смесь порошкообразных диоксида урана и тетрахлорида урана можно удобным образом разделить посредством давления паров тетрахлорида урана. Было обнаружено, что тетрахлорид урана сублимируется при температуре всего лишь 520°C . Например, при нагреве тетрахлорида урана в одном воплощении до 520°C (на 70°C ниже его температуры плавления) UCl_4 должен медленно улетучиваться и легко удаляться из любого непрореагировавшего UO_2 . Операцию 1106 газификации UCl_4 можно выполнять после вытеснения всего количества или большей части газообразных реагентов Cl_2 и CO из первого сосуда 1102.

Газообразный UCl_4 затем перемещают во второй сосуд 1104 при операции 1108 перемещения UCl_4 . Этого можно достичь с помощью любых стандартных средств. Так как UO_2 имеет более высокую температуру плавления (2865°C при атмосферном давлении), чем температура кипения UCl_4 (791°C), UO_2 остается в первом сосуде в твердом состоянии. Однако можно предусмотреть фильтры или отбрасывающие устройства для препятствования случайному удалению частиц из первого сосуда 1102 при перемещении газа. В одном воплощении весь или в основном весь UCl_4 перемещают в течение этой операции 1008. Альтернативно, известное количество UCl_4 можно переместить, исходя из требуемого количества и доли, требуемой в конечной топливной соли. Можно использовать расходомеры и газоанализаторы в режиме реального времени для проверки или регулирования перемещения данного количества, как известно в технике.

После того как выбранное количество газа UCl_4 перемещено во второй сосуд 1104, среду второго сосуда 1104 регулируют так, что газообразный UCl_4 конденсируется и твердый NaCl расплавляется, что приводит их в жидкое состояние в операции 1010 плавления топливной соли. В одном воплощении, в котором второй сосуд поддерживают при давлении 100 кПа (1 атм), эта среда соответствует температурному интервалу от 368 до 800°C в зависимости от количественного отношения UCl_4 к NaCl (как показано на нижней оси тройной диаграммы на фиг. 4). Так как температура плавления Na_2CO_3 составляет 851°C при 100 кПа (1 атм), среду можно легко довести до точки, в которой смесь UCl_4 - NaCl становится жидкой, при этом Na_2CO_3 поддерживается в твердом состоянии. Например, в одном воплощении хлорид натрия поддерживают при 350°C , или на 20°C ниже эвтектики UCl_4 - NaCl .

После операции 1010 плавления топливной соли часть или весь жидкий UCl_4 - NaCl затем перемещают в сборный сосуд 1106 в операции 1012 перемещения UCl_4 - NaCl . Этого можно достичь с помощью стандартных средств, таких как повышение давления во втором сосуде 1104 с помощью аргона для вытеснения расплавленной смеси UCl_4 - NaCl и перемещения ее в сборный сосуд 1106. Альтернативно, жидкость можно просто слить под действием силы тяжести в сборный сосуд 1106. Снова, можно принять меры и использовать специальное оборудование для предотвращения удаления остающегося Na_2CO_3 из второго сосуда 1104.

Кроме того, система 1100 выполнена так, что после поступления в сборный сосуд 1106, UCl_4 в жидком состоянии приходит в контакт с Si в сборном сосуде 1106. В одном воплощении условия регулируют так, что, как описано выше, Si реагирует с UCl_4 в стехиометрическом количестве с образованием SiCl_4 и UCl_3 . Сборный сосуд поддерживают при рабочих условиях так, что UCl_3 остается жидким, при этом SiCl_4 выкипает с образованием газа, который можно легко удалить. Поэтому регулируя количество Si в сборном сосуде 1106, можно регулировать количество получаемого UCl_3 .

Так как система 1100 обеспечивает легкое регулирование относительного количества UCl_4 и NaCl , которое окончательно перемещают в сборный сосуд 1100, и количество UCl_4 , превращаемого в UCl_3 , также можно легко регулировать с использованием системы 1100 и способа 1000 можно изготовить любую требуемую смесь UCl_3 - UCl_4 - NaCl .

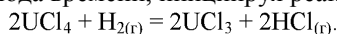
После операции 1112 перемещения UCl_4 - NaCl можно выполнить конечную операцию 1012 сбора. При этой операции 1012 можно удалить SiCl_4 и заменить инертным газом. Топливную соль можно перевести в твердое состояние для более легкой транспортировки в сборном сосуде 1106 или можно переместить в другой контейнер (в жидком, твердом или газообразном состоянии) для хранения или транспортировки.

Кинетика реакций в сосудах 1102, 1104, 1106 зависит от формы используемых твердого UO_2 и твердого Na_2CO_3 , например, порошка, частиц, пористой матрицы, блока и т.п., и условий потока, температу-

ры и давления газов, а также внутренней конфигурации сосудов для приведения в контакт, например, они могут быть выполнены для усиления контакта с протекающими газами с использованием внутренних перегородок, диффузоров или других элементов. Хотя можно использовать любую твердую форму UO_2 и Na_2CO_3 , формы с высокой площадью поверхности повышают кинетику реакции и, в общем, являются более эффективными. Аналогично, хотя можно использовать любой тип сосуда, известный в настоящее время или разработанный позднее, конструкции сосудов для приведения в контакт, специально приспособленные для усиления контакта твердое вещество-газ и жидкость-газ будут более эффективными, чем более простые конструкции. Кроме того, активные элементы, такие как смесители или мешалки, можно использовать в любом сосуде или во всех сосудах для усиления контакта, газификации или смешивания в течение любой операции, показанной на фиг. 9 или 10.

Хотя в рамках этого изобретения описаны различные воплощения системы 1100 выработки топливной соли UCl_3 - UCl_4 - NaCl и способов 900, 1000, можно выполнить различные изменения и модификации, которые находятся в области защиты описанной в данном документе технологии. Например, специалист понимает, что можно выполнить множество второстепенных изменений системы 1100 или способов 900, 1000, при этом все еще достигая такого же контроля над конечной смесью топливных солей и конечным продуктом. Например, твердый кремний можно вводить во второй сосуд 1104, или твердый кремний можно хранить в проточной камере (не показана) между вторым сосудом 1104 и сборным сосудом 1106. Аналогично, первый и второй сосуды могут работать независимо, а не последовательно, и газообразный UCl_4 и жидкий NaCl можно по отдельности перемещать в сборный сосуд 1106. Можно выполнить множество других изменений, которые специалист легко предложит сам и которые включены в область защиты изобретения, определенную в приложенной формуле изобретения.

Кроме того, способы, показанные на фиг. 9 или 10, можно дополнительно доработать, если требуется двойная смесь UCl_3 - NaCl . В этом воплощении через всю смесь UCl_4 - NaCl можно барботировать водород в течение продолжительного периода времени, инициируя реакцию



Обеспечивая избыток H_2 , весь UCl_4 можно превратить в UCl_3 .

Синтез UCl_4 из UO_2 с использованием хлорида аммония.

На фиг. 16 показано воплощение способа получения UCl_4 с использованием хлорида аммония. В показанном воплощении способа 1600 получают смесь твердого UO_2 и NH_4Cl в операции 1602 приготовления урана. Можно получить твердую смесь, используя любые стандартные средства, такие как измельчение, дробление или разрезание с помощью любого подходящего оборудования, такого как шаровая мельница, стержневая мельница, мельница самоизмельчения, мельница частичного самоизмельчения, галечная мельница, вальцовая дробилка, толчея и т.п.

Затем выполняют операцию 1604 первого превращения, при которой твердую смесь подвергают воздействию HCl при условиях, соответствующих образованию $(\text{NH}_4)_2\text{UCl}_6$ с помощью реакции



В одном воплощении операция 1604 превращения включает нагрев твердой смеси, при воздействии газообразного HCl в закрытой среде до 100°C при 100 кПа (1 атм) и поддержание температуры до достижения достаточной степени превращения. В зависимости от воплощения температуру можно поддерживать в течение по меньшей мере 1 ч. Однако для полного превращения может потребоваться дополнительное время, например поддержание температуры в течение 2, 3, 4 или более часов. В зависимости от используемой концентрации HCl температуру можно поддерживать немного ниже температуры кипения водного HCl и обеспечивать поддерживаемую среду газообразного HCl путем предоставления бассейна водного HCl в замкнутой среде.

Также возможны альтернативные способы достижения превращения $(\text{NH}_4)_2\text{UCl}_6$, такие как пропускание газообразного HCl при более высокой температуре через обжиговую печь, подвижный слой, циклон, реактор с псевдооживленным слоем или любые другие типы оборудования для приведения в контакт газа и твердого вещества. Также можно использовать дымящийся HCl (водный HCl при концентрации более 40%) для выработки газообразного HCl . В еще одном воплощении смесь может контактировать с водным HCl в жидкой, а не газообразной форме при условиях, которые приводят к образованию $(\text{NH}_4)_2\text{UCl}_6$.

Еще одно воплощение включает получение газообразного HCl для операции 1604 первого превращения с использованием хлорида кальция (CaCl_2) и водного HCl . В этом воплощении газообразный HCl образуют посредством следующей реакции:

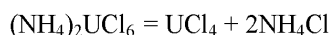


В этом воплощении операция 1604 первого превращения включает предоставление гранул безводного CaCl_2 в реакционной среде и приведение безводного CaCl_2 в контакт с водным HCl . В одном воплощении приведение в контакт можно осуществлять путем помещения гранул CaCl_2 в бассейн HCl . При операции 1604 первого превращения можно предоставить реакционный сосуд, который может по отдельности содержать как смесь, так и бассейн HCl с гранулами CaCl_2 , так что только газообразный HCl может контактировать со смесью. В альтернативном воплощении жидкий HCl может циркулировать или протекать поверх твердой формы CaCl_2 . Независимо от того, как выполняют приведение в контакт, по

мере того, как воду удаляют из водного HCl для гидратации CaCl₂, концентрация HCl в жидкости возрастает до тех пор, пока газообразный HCl не начнет выделяться в окружающую среду. В этом способе образования газообразного HCl можно использовать более безопасную и более легкую в обращении концентрацию водного HCl в качестве загрузки, и он может быть предпочтительным по сравнению с использованием других источников газообразного HCl. Этот способ получения HCl можно приспособить для использования с любым из описанных в данном документе способов.

Более того, водный HCl и NH₄Cl, содержащие модифицированное количество изотопа ³⁷Cl в виде аниона, можно использовать для выработки хлористых топливных солей способа 1600. Как отмечено выше, отделение и сбор изотопа ³⁷Cl возможны с помощью нескольких способов. Этот ³⁷Cl затем можно использовать для выработки хлороводорода, который при объединении с водой образует модифицированный водный HCl. Существует множество известных способов получения хлороводорода, и можно использовать любой подходящий способ, включая объединение газообразного Cl₂ с газообразным H₂ и реакцию NaCl с H₂SO₄. Аналогично, также можно образовать модифицированный NH₄Cl, используя источник ³⁷Cl из любого известного способа. Степень модификации HCl и/или NH₄Cl можно регулировать для достижения любого требуемого отношения ³⁷Cl к общему количеству Cl в конечной топливной соли, например конечной соли, имеющей отношение ³⁷Cl к общему количеству Cl в топливной соли более 25%.

После операции 1604 первого превращения выполняют операцию 1606 второго превращения, при которой (NH₄)₂UCl₆ поддерживают при соответствующих условиях для превращения его в UCl₄ с помощью реакции



В одном воплощении второе превращение 1606 включает удаление (NH₄)₂UCl₆·2H₂O из среды HCl, нагревание его до достаточной для превращения температуры до тех пор, пока требуемое количество (NH₄)₂UCl₆ не превратится в UCl₄. Превращение ожидают при температуре выше 200°C, однако более высокие температуры могут ускорить реакцию. В одном воплощении (NH₄)₂UCl₆·2H₂O можно нагреть до любой температуры выше 200°C, но ниже температуры, при которой плавятся (NH₄)₂UCl₆ или UCl₄, например 200-500°C, 250-350°C или 400°C. Также возможны альтернативные воплощения, включая воплощения, в которых (NH₄)₂UCl₆ нагревают до температуры, которая вызывает плавление образовавшегося UCl₄ в течение операции 1606 превращения.

Показанное воплощение способа 1600 подходит для получения продукта UCl₄ в большом объеме. Более того, так как UCl₃ можно легко получить из UCl₄ посредством восстановления, такого как описано выше, способ 1600 можно также легко использовать для создания большого количества UCl₃, просто добавляя возможную операции 1608 восстановления, как показано на фиг. 16.

Одно воплощение способа 1600 выполняли для проверки способа. В данном эксперименте 2 г UO₂ и 0,44 г NH₄Cl (т.е. 10% избыток NH₄Cl) совместно измельчали и помещали в реактор с водным HCl, так что среда имела избыток газообразного HCl. Реактор нагревали до 100°C и поддерживали при этой температуре в течение 4 ч. Получаемый продукт затем извлекали и помещали в трубу для разложения в вакууме и нагревали от 80 до 400°C. Получение UCl₄ проверяли посредством рентгеновской дифракции.

В эксперименте получали газообразный HCl, используя способ на основе CaCl₂. Смесь UO₂ и NH₄Cl помещали в стеклянный сосуд с открывающейся верхней крышкой и сосуд помещали в реактор. На дне реактора представляли бассейн водного HCl и гранулы CaCl₂ помещали в контакт с водным HCl. Избыток газообразного HCl получали путем гидратации CaCl₂, и этот газ реагировал с твердой смесью в сосуде.

Способы изготовления уранового хлористого-фтористого топлива.

На фиг. 17 показано воплощение способа получения UCl₃F. Способ 1700 основан на следующей реакции:



В показанном воплощении способ 1700 начинается с приготовления количества UCl₄ и UF₄ в операции 1702 приготовления предшественников. UCl₄ и UF₄ можно приготовить с помощью любых способов, описанных в данном документе или известных в технике.

Твердые UCl₄ и UF₄ затем объединяют в стехиометрическом количестве в операции 1704 объединения. В показанном воплощении объединяют три части UCl₄ и одну часть UF₄. Операцию 1704 объединения можно осуществлять в смесителе (например, шаровой мельнице), учитывая обсуждаемую далее операцию 1706 смешивания или в промежуточном сосуде до перемещения в смеситель.

Объединенные UCl₄ и UF₄ затем перемешивают в течение некоторого времени в операции 1706 смешивания с получением твердой смеси UCl₃F. В операции 1706 смешивания можно использовать любые стандартные средства для смешивания твердых веществ, такие как измельчение, дробление или разрезание с помощью любого подходящего оборудования, такого как шаровая мельница, стержневая мельница, мельница самоизмельчения, мельница частичного самоизмельчения, галечная мельница, вальцовая дробилка, толчея и т.п. Смешивание можно выполнять при повышенной температуре или давлении. Время смешивания может быть фиксированным временем, исходя из условий смешивания (например, высокой температуры), выбранным от 15 мин до 5 суток, таким, например, как четверть часа, полчаса,

три четверти часа, 1 ч, 2 ч, 4 ч, 6 ч, 8 ч, 12 ч или 24 ч. Альтернативно, смешивание можно выполнять в течение периода времени, достаточного для завершения реакции, которое определяют на основе испытания в режиме реального времени или предшествующего испытания.

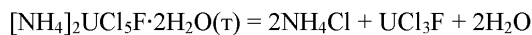
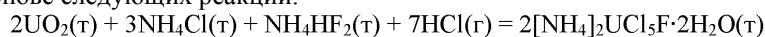
В альтернативном воплощении операцию 1706 смешивания можно выполнять с одной или обеими урановыми солями в расплавленном состоянии вместо твердого состояния. В еще одном воплощении операцию смешивания можно выполнять в активной зоне реактора так, что соль UCl_3F создают внутри активной зоны.

Любую или все операции 1702-1706 можно дополнительно выполнять в не содержащей кислород среде, например, путем смешивания в аргоне или другом инертном газе.

Выполняли эксперимент для подтверждения способа 1700. При выполнении 700 мг UCl_4 смешивали с 193 мг UF_4 в шаровой мельнице в течение 1 ч в аргоне. После 1 ч смешивания рентгеновский дифракционный анализ предшественников до смешивания и продукта эксперимента показал, что предшественники UCl_4 или UF_4 не присутствовали в конечном продукте. На основе этого предполагают, что реакция проходила полностью и конечный продукт представлял собой UCl_3F .

Отметим, что способ 1700 можно приспособить для получения UCl_2F_2 и $UClF_3$ путем изменения стехиометрического количества солей-предшественников. Как обсуждено выше, эти соли также могут иметь свойства, подходящие для использования в качестве ядерного топлива или в качестве составляющей соли ядерного топлива в реакторе на расплавленных солях.

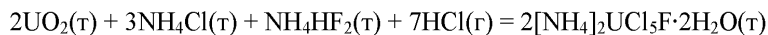
На фиг. 18 показано воплощение другого способа получения UCl_3F . В этом способе 1800 получают UCl_3F из UO_2 на основе следующих реакций:



Эта реакция сходна с той, которая описана со ссылкой на фиг. 16.

В показанном воплощении способа 1800 в операции 1802 приготовления предшественников создают смесь твердых UO_2 , NH_4Cl и NH_4HF_2 . Смесь твердых веществ можно создать, используя любые стандартные средства, такие как измельчение, дробление или разрезание с помощью любого подходящего оборудования, такого как шаровая мельница, стержневая мельница, мельница самоизмельчения, мельница частичного самоизмельчения, галечная мельница, вальцовая дробилка, толчея и т.п.

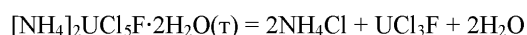
Затем выполняют операцию 1804 первого превращения, при которой смесь твердых веществ подвергают воздействию HCl при условиях, соответствующих образованию $(NH_4)_2UCl_5F$ с помощью реакции



В одном воплощении операция 1804 первого превращения включает нагрев смеси твердых веществ при воздействии на нее избыточного количества газообразного HCl в закрытой среде до $100^\circ C$ при 100 кПа (1 атм) и поддержание температуры до достижения достаточного превращения. В зависимости от воплощения температуру можно поддерживать в течение по меньшей мере 1 ч. Однако для полного превращения может потребоваться дополнительное время, например поддержание температуры в течение 2, 3, 4 или более часов. В зависимости от используемой концентрации HCl , температуру можно поддерживать немного ниже температуры кипения водного HCl и обеспечивать поддерживаемую газовую среду HCl путем предоставления бассейна водного HCl в закрытой среде.

Также возможны альтернативные способы достижения превращения $(NH_4)_2UCl_5F$, такие как пропускание газообразного HCl при более высокой температуре через обжиговую печь, подвижный слой, циклон, реактор с псевдооживленным слоем или любые другие типы оборудования для контакта газа и твердого вещества. Также можно использовать дымящийся HCl (водный HCl при концентрации более 40%) для получения газообразного HCl . В еще одном воплощении газообразный HCl для операции 1804 первого превращения можно получить, используя хлорид кальция ($CaCl_2$) и водный HCl , как ранее описано со ссылкой на фиг. 16.

После операции 1804 первого превращения выполняют операцию 1806 второго превращения, при которой $(NH_4)_2UCl_5F$ поддерживают при соответствующих условиях для превращения его в UCl_3F с помощью реакции



В одном воплощении второе превращение 1806 включает удаление $(NH_4)_2UCl_5F \cdot 2H_2O$ из среды HCl , нагревание его до достаточной для превращения температуры до тех пор, пока требуемое количество $(NH_4)_2UCl_5F$ не превратится в UCl_3F . Превращение ожидают при температуре выше $200^\circ C$, однако более высокие температуры могут ускорить реакцию. В одном воплощении $(NH_4)_2UCl_5F \cdot 2H_2O$ можно нагреть до любой температуры выше $200^\circ C$, но ниже температуры, при которой плавятся $(NH_4)_2UCl_5F$ или UCl_3F , например $200-500^\circ C$, $250-350^\circ C$ или $400^\circ C$. Также возможны альтернативные воплощения, включая воплощения, в которых $(NH_4)_2UCl_5F$ нагревают до температуры, которая вызывает плавление образовавшегося UCl_3F в течение операции 1806 второго превращения.

Способ 1800 также можно использовать для образования солей с модифицированным количеством ^{37}Cl с использованием водного HCl и NH_4Cl , содержащих модифицированное количество изотопа ^{37}Cl в

виде аниона, как обсуждено в других местах. Можно регулировать степень модификации HCl и/или NH₄Cl для достижения любого требуемого отношения ³⁷Cl к общему количеству Cl в конечной топливной соли, такой как конечная топливная соль, имеющая отношение ³⁷Cl к общему количеству Cl в топливной соли более 25%.

Примеры топливных солей.

Различные воплощения топливных солей были изготовлены в лаборатории и испытаны для подтверждения тройной фазовой диаграммы фиг. 4.

Были приготовлены партии UCl₃. Одну партию, которая была обычным образцом, приготавливали следующим образом.

1,895 г образца металлического урана промывали гексанами и обрабатывали азотной кислотой для удаления оксидов. Металлический уран помещали в кварцевый тигель, загружали в трубчатую печь и выдерживали при 250°C в течение 30 мин в токе H₂ с получением UH₃. UH₃ наблюдали в виде продукта с высокой площадью поверхности, морфологически отличным от исходного металлического урана. Температуру печи повышали до 350°C, протекающий газ переключали на HCl и удерживали при температуре в течение 90 мин с получением UCl₃. Атмосферу изменяли на H₂ и печь доводили до комнатной температуры. Трубчатую печь удерживали в атмосфере H₂ и перемешали в перчаточный бокс с Ag. UCl₃ определяли с помощью рентгеновской дифракции, при общей извлеченной массе 2,47 г.

Также были приготовлены партии UCl₄. Одну партию, которая была обычным образцом, приготавливали следующим образом.

1,50 г образца UO₃ добавляли в сосуд Шленка и загружали Ag. Добавляли гексахлоропропен в инертных условиях в 10-кратном молярном избытке. Температуру сосуда повышали до 75°C и удерживали в течение 30 мин. Температуру повышали до температуры кипения с обратным холодильником, составляющей около 165°C, и удерживали в течение 3 ч. Продукт доводили до комнатной температуры и промывали тетрахлоридом углерода, толуолом и гексаном. После промывки гексаном продукт сушили и идентифицировали как UCl₄ с помощью рентгеновской дифракции. Процедура давала 1,9 г UCl₄.

Двойные и тройные смеси создавали путем плавления соответствующего количества составляющих соединений в молибденовом тигле при 650°C в течение 2 ч в Ag атмосфере. Образец 66 NaCl-34 UCl₃ приготавливали и определяли таким же образом, используя 3,761 г UCl₃ и 1,239 г NaCl. Обычная партия 71 UCl₄-17 UCl₃-12 NaCl содержала 0,6188 г UCl₄, 0,1331 г UCl₃ и 0,0158 г NaCl. Три компонента добавляли в молибденовый тигель и обрабатывали, как описано выше. Продукты - смешанные соли анализировали с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии.

Создавали воплощение UCl₃F, используя реакцию синтеза между UCl₄ и UF₄, как описано выше. В этом эксперименте 700 мг UCl₄ смешивали с 193 мг UF₄ в шаровой мельнице в течение 1 ч в аргоне. После 1 ч смешивания рентгеновский дифракционный анализ предшественников до смешивания и продукта эксперимента показал, что предшественники UCl₄ или UF₄ не присутствовали в конечном продукте. На основе этого предполагают, что реакция проходила полностью, и конечный продукт представлял собой UCl₃F.

Были получены следующие топливные соли и определены их температуры плавления, показанные в табл. 4.

Таблица 4

Воплощения топливных солей

Топливная соль	Температура плавления (°C)
71UCl ₄ -17UCl ₃ -12NaCl	491-512
66NaCl-34UCl ₃	508
17UCl ₃ -40.5UCl ₄ -42.5NaCl	351
47UCl ₄ -53NaCl	343
UCl ₃ F	не определена

Модификация топлива для уменьшения коррозии.

Управление коррозией, вызываемой расплавленной солью, может определять использованием улучшенных материалов, таких как никелевые и молибденовые сплавы, для контактирующих с топливной солью элементов, таких как отражатели, технологические теплообменники и корпус. В некоторых воплощениях из-за конструкции и рабочих условий подходящих реакторов для элементов может потребоваться только облицовка или покрытие с использованием этих улучшенных материалов, при этом объем таких элементов можно выполнить из более традиционных материалов, таких как нержавеющие стали и другие материалы, соответствующие существующим нормам АОИМ (американского общества инженеров-механиков). Дополнительно, если элементы заменяют на регулярной основе, не нужно обеспечивать исключительную характеристику облицовки или демонстрировать совершенные покрытия.

В одном воплощении совместимую, стойкую к коррозии облицовку (СКО) используют в сочетании с соответствующим нормам АОИМ основным материалом на всех обращенных к топливной соли поверхностях. В части III, разделе V "High Temperature Reactors" АОИМ разрешают использование СКО. Тщательный выбор материалов, способов соединения и неразрушающих исследований позволяет соору-

жать прочную композиционную металлическую оболочку реактора со множеством слоев защиты от коррозии, радиационного разрушения и предназначенную для эксплуатации при высоких температурах. В данном воплощении СКО является первым барьером против неконтролируемого высвобождения радионуклидов. Он состоит из стойкой к коррозии облицовки на пластине корпуса высокого давления, трубопроводе, трубной обвязке и трубных решетках теплообменника первого контура и сконструирован для положительного давления.

В одном воплощении топливную соль приспособливают для предотвращения или уменьшения коррозии путем предоставления одной или более хлористых солей, которые соответствуют солям, которые должны были создаваться посредством коррозии. Путем предоставления такой соли в качестве одной из (или единственной) дополнительной неделиваемой хлористой соли, уменьшают или предотвращают коррозию контактирующих с солью механических элементов.

На фиг. 12 показано воплощение способа снижения коррозии в ядерном реакторе, в котором используют расплавленное ядерное топливо. Способ 1200 подходит для любого аниона топливной соли, включая Cl, F или такие сочетания, как Cl₃F, Cl₂F, Cl₂F₂ и т.п. В показанном воплощении способ 1200 начинается с операции 1202 идентификации, при которой определяют, какой материал или материалы будут контактировать с солью в реакторе. Например, как обсуждено выше, предполагают, что никелевые и молибденовые сплавы можно использовать для различных контактирующих с солью элементов.

За операцией 1202 идентификации, затем в операции 1204 анализа следует определение катиона или катионов в идентифицированном материале, которые наиболее вероятно корродируют. Операция 1204 анализа может представлять собой чисто теоретический анализ, например, основанный на сравнении относительных свободных энергий образования соли для каждого из элементов в материале. Альтернативно или дополнительно, операция 1204 анализа может включать коррозионные испытания с использованием различных типичных солей для экспериментального определения вероятной химии коррозии.

После того как определены катион или катионы, подвергающие коррозии под действием соли, специально для этого реактора можно образовать топливную соль, которая содержит в соли ядерного топлива подавляющую коррозию соль, состоящую из аниона соли (например, хлорида в БРРХ) и катиона материала (например, Mo, если в операции 1204 анализа определяют, что коррозия Mo является проблемой для этого конкретного сплава). Количество подавляющей коррозию соли можно определить экспериментально или можно выбрать, исходя из количества соли, необходимого для устранения реакции коррозии, путем приведения количества подавляющей коррозию соли в топливную соль к количеству, необходимому для достижения равновесия при рабочих условиях реактора (давление, температура и т.п.). Альтернативно, максимальным количеством подавляющей коррозию соли в ядерном топливе является такое количество, которое можно растворить в ядерном топливе.

Например, в одном воплощении способа 1200 можно определить в операции 1204 анализа вероятность возникновения коррозии Cr. В ответ на это можно создать стойкое к коррозии топливо, которое содержит, по меньшей мере, некоторое количество CrCl₂.

На фиг. 13 перечислены некоторые возможно применимые сплавы. На чертеже приведены сплав, основной элемент или элементы (>1 мас.%) каждого сплава и второстепенные элементы (<1 мас.%) каждого сплава.

Для некоторых сплавов на фиг. 13 выполняли эксперименты с использованием как 71 UCl₄-17 UCl₃-12 NaCl, так и 66 NaCl-34 UCl₃ воплощений топливных солей при характерных условиях. Испытываемые сплавы содержали нержавеющую сталь 316SS. В этих экспериментах пробный образец сплава погружали в объем топливной соли и поддерживали условия при 650°C в течение 100 ч. Пробные образцы затем исследовали с использованием энергодисперсионной спектроскопии. Исследование нержавеющей стали показало значительное обеднение хромом и измеримое обеднение железом в сплаве пробного образца. Это подтверждает результаты теоретического анализа на основе относительных свободных энергий катионов в сплаве (см. ниже), который показывает, что Cr должен больше подвергаться коррозии Cl солью, Fe относительно меньше и Ni и Mo даже еще меньше.



В результате этого анализа подавляющая коррозию соль может содержать одно или более из CrCl₂, CrCl₃ и FeCl₃ для сплава 316SS. Некоторые или все из этих подавляющих коррозию солей можно добавлять в хлористую топливную соль для уменьшения или устранения коррозии этого сплава.

Мониторинг топлива.

В течение работы топливную соль в реакторе на расплавленных солях можно наблюдать. Этот мониторинг можно осуществлять для определения того, когда происходило достаточное размножение, так что некоторую часть топливной соли можно удалить и заменить новым топливом для сохранения понижения реактивности. Такой мониторинг может принимать множество форм, однако включает мониторинг по меньшей мере одной концентрации молекул в расплавленной соли, которая показывает общее качество соли. В соответствии с результатами мониторинга, например результатом, показывающим, что произошло достаточное размножение, можно осуществить некоторую операцию, например изменение рабочих параметров или замену части топливной соли новой топливной солью.

Мониторинг можно выполнять с использованием любого типа подходящего способа или оборудования для определения состава, включая спектроскопические способы или приборы, известные в настоящее время или разработанные позднее. Например, в одном воплощении мониторинг выполняют в режиме реального времени с использованием рамановской спектроскопии или методов лазерной абляции. Рамановская спектроскопия предоставляет информацию о колебании молекул, которую можно использовать для идентификации и количественного определения образца. Данная технология включает облучение источником монохроматического света (т.е. лазером) образца и регистрацию рассеянного света. Часть топлива можно удалить из активной зоны реактора, например, в боковом потоке, и провести через ячейку мониторинга, которая содержит "окно", через которое можно выполнять спектроскопию. Примерами материалов для рамановских окон являются плавленый кварц, плавленый диоксид кремния, сапфир, алмаз и некоторые стекла. В способах лазерной абляции соединения возбуждают до высоких энергетических состояний. Возбужденный материал можно оценить с помощью масс-спектрометра или оптически для определения элементного состава и возможных молекулярных соединений. Можно использовать любой материал, при условии, что он может соответствовать рабочим параметрам реактора и системы мониторинга. В некоторых воплощениях топливо, удаленное из активной зоны для мониторинга, может представлять собой весь боковой поток или часть бокового потока топлива, удаляемого для улучшения/обработки топлива, как дополнительно описано ниже, боковой поток, в целях регулирования заменяемый воспроизводимым топливом и/или боковой поток из петли 110 теплоносителя первого контура, описанный выше в связи с фиг. 1А.

Также можно использовать формы отбора образцов, отличные от формы отбора образцов из бокового потока. Например, в одном воплощении в активной зоне реактора можно предоставить окно, через которое оборудование для определения состава (например, рамановский спектрограф или система абляции) может пропускать свет в топливо или в свободное пространство над топливом, если оно существует. Альтернативно, оборудование для определения состава может быть расположенным вне реактора дистанционным прибором, который соединен с системой мониторинга проводами или беспроводной связью, и который можно вводить в топливную соль или поток топливной соли, например, через стенку активной зоны реактора или трубопровод. В другом воплощении спектрограф можно физически включить в теплообменник или в другой элемент в активной зоне реактора для непосредственного отбора образцов топливной соли. В еще одном воплощении спектрограф или система абляции могут быть вспомогательным элементом 127, описанным со ссылкой на фиг. 1А.

В еще одном воплощении, которое не является воплощением мониторинга в реальном времени, образцы можно периодически удалять из активной зоны реактора и анализировать. Такие образцы затем можно возвращать или собирать для последующего использования. Например, в одном воплощении часть топливной соли регулярно заменяют в работающем БРРХ и удаленную топливную соль анализируют с помощью

лазерной абляции, оптических методов или с помощью рамановской спектроскопии. Результаты этого анализа затем используют для изменения одного или более параметров, например, для изменения расписания замены топливной соли. Примеры других рабочих параметров, которые можно настроить, включают температуру активной зоны реактора, количество топливной соли для замены, положение вытесняющего элемента, реактивность топливной соли и скорость подачи добавки в активную зону реактора.

На фиг. 14 показан способ эксплуатации ядерного реактора на расплавленных солях. В показанном воплощении способ 1400 начинается с поддержания режима бегущей волны в расплавленной соли в активной зоне ядерного реактора в операции 1402.

В течение этой операции по меньшей мере часть расплавленной соли анализируют в операции 1404 анализа в режиме реального времени. В одном воплощении анализ осуществляют с использованием методов определения состава, таких как методы рамановской спектроскопии или лазерной абляции, для определения по меньшей мере одной концентрации молекул в расплавленной соли. Альтернативно, определение состава можно осуществлять для определения большинства, если не всех, молекул в топливе и их относительного количества, чтобы узнать полный или почти полный химический состав топливной соли в данном месте. В еще одном воплощении датчики радиации, такие как датчики γ -излучения, можно использовать для мониторинга энергии или активности расплавленной соли, и определение частичного или полного химического состава топливной соли в данном месте можно выполнить на основе состава соли и измерений.

На основе получаемых сведений о химическом составе топливной соли можно выполнить операцию 1406 настройки, если химический состав или конкретная концентрация превышает некоторый заранее заданный порог. Настройка может включать настройку одного или более рабочих параметров ядерного реактора или выполнение конкретных задач, таких как замена топлива.

Рамановская спектроскопия является лишь одной из технологий определения состава, которую можно использовать для мониторинга качества топливной соли и/или других аспектов безопасности или конструкции, например накопления продуктов деления, вязкости и т.п. Другие технологии включают спектроскопию поглощения, спектроскопию лазерной абляции, спектроскопию возбуждения лазерным

пробоем, инфракрасную (ИК) спектроскопию и электрохимию для определения относительных концентраций различных составляющих соли (например, UCl_3 , UCl_4 и $NaCl$). Как обсуждали выше, для мониторинга можно использовать любые технологии, известные в настоящее время или разработанные позднее.

Замораживаемые пробки.

Другой аспект реакторов на расплавленных топливных солях включает возможность использования пробок из замороженного материала в различных целях. Пробка из замороженного материала, называемая в данном документе замораживаемой пробкой, представляет собой объем материала, который при заданных рабочих условиях является твердым, не способным к реакции с топливной солью и имеет достаточно прочную твердую структуру, который можно использовать для предотвращения движения топливной соли в реакторе, но который также после достижения требуемой температуры активации плавится для обеспечения смешивания с топливной солью и движения топливной соли.

Замораживаемые пробки можно использовать для многих различных целей, в некоторых воплощениях для множества целей одновременно. Например, в простом воплощении замораживаемую пробку можно использовать для предотвращения вытекания топливной соли из активной зоны реактора в сливной бак при рабочих температурах, однако эта пробка плавится, если температура активной зоны реактора превышает температуру активации пробки, позволяя таким образом топливной соли выходить в сливной бак. Этого можно достичь путем расположения сливного бака ниже активной зоны реактора, так что топливная соль может течь под действием силы тяжести или путем поддержания активной зоны реактора и сливного бака при различных давлениях, так что после расплавления замораживаемой пробки расплавленная топливная соль течет под давлением в сливной бак.

В некоторых случаях замораживаемые пробки можно обнаружить в топливе после плавления. Например, замораживаемая пробка может быть изготовлена из материала, который является поглотителем нейтронов, так что если температура активной зоны реактора превышает температуру активации, поглощающий материал плавится и затем распределяется по всей активной зоне реактора, понижая реактивность. В этом воплощении замораживаемая пробка является поглотителем нейтронов. Достигая похожего действия, в другом воплощении замораживаемую пробку используют для предотвращения смешивания поглотителя нейтронов, содержащегося в сосуде отдельно от активной зоны реактора, с топливной солью. После достижения температуры активации замораживаемая пробка расплавляется и высвобождает поглотитель нейтронов в реактор. Как и в воплощениях сливного бака, сосуд с поглотителем нейтронов можно расположить выше активной зоны реактора, так что он течет под действием силы тяжести в активную зону реактора или, альтернативно, его можно поддерживать под давлением, так что поглотитель нейтронов продавливают в активную зону реактора. Таким образом, активация или расплавление замораживаемой пробки является весьма обнаруживаемым в нейтронных реакциях в активной зоне реактора. В дополнительных или альтернативных воплощениях замораживаемая пробка может содержать или отделять один или более элементов, которые обнаруживают другими подходящими способами, например, с помощью системы мониторинга топлива (например, рамановской спектроскопии), другими датчиками в реакторе и т.п. Возможно множество других конфигураций, относящихся к безопасности замораживаемых пробок.

Замораживаемые пробки можно пассивно поддерживать путем предоставления материала замораживаемой пробки, который имеет соответствующую температуру плавления, подобранную в соответствии с требуемой температурой активации. В альтернативном воплощении замораживаемые пробки можно активно поддерживать путем предоставления активно охлаждающего элемента, такого как охлаждающая рубашка, вокруг места расположения замораживаемой пробки. Активно поддерживаемые замораживаемые пробки можно использовать, например, для обеспечения управления оператором активации (посредством управления охлаждением) или в качестве меры безопасности, которая активируется после потери внешней мощности или управления. Активное управление также обеспечивает использование топливной соли в качестве замораживаемой пробки, упрощая использование замораживаемых пробок в работе реактора.

Подходящие материалы замораживаемых пробок включают соли, которые являются смешиваемыми с топливной солью и которые имеют соответствующую температуру плавления выше рабочей температуры реактора. В некоторых случаях может быть уместным включить химический барьер между замораживаемой пробкой и топливной солью для снижения вероятности самопроизвольного растворения пробки. Например, в одном воплощении БРРХ с использованием тройной топливной соли, такой как описанные выше, подходящая замораживаемая пробка может быть любой хлористой солью, которая имеет температуру плавления выше температуры плавления воплощений тройной соли.

В целях замедления воплощение замораживаемой пробки, которая действует как поглотитель нейтронов, включает замораживаемые пробки, изготовленные из ^{35}Cl . Как обсуждали выше, ^{35}Cl является замедлителем и поглотителем нейтронов, и соль ^{35}Cl при растворении в топливной соли уменьшает реактивность соли. Другие возможные замораживаемые пробки, подходящие для использования в БРРХ, содержат хлористые соли продуктов деления с большим сечением поглощения, таких как ^{133}Cs , ^{101}Ru , ^{103}Rh , ^{99}Tc и ^{105}Pd .

В некоторых воплощениях материал замораживаемой пробки может не быть топливной солью или

даже солью с тем же анионом, как у топливной соли. Подходящие материалы замораживаемой пробки включают материалы с температурой плавления, которую планируют в качестве безопасной температуры плавления для происходящей операции и которые вероятно отрицательно не влияют на топливную соль. Модифицированная топливная соль с более высокой температурой плавления является только одним из их примеров. Таким образом, замораживаемую пробку потенциально можно изготовить из любого материала.

В еще одном воплощении материал замораживаемой пробки может быть отражающим нейтроны материалом, так что после достижения температуры активации отражающая замораживаемая пробка расплавляется и обеспечивает меньшее отражение нейтронов, изменяя, таким образом общую реактивность реактора. В этом воплощении замораживаемая пробка может дополнительно открывать, выделять или обнажать поглотитель нейтронов после расплавления. Например, отражающая замораживаемая пробка может покрывать поглотитель нейтронов и таким образом действовать как элемент отражателя, который саморазрушается после достижения температуры активации.

Постоянная доочистка топлива.

В одном воплощении в течение нормальной работы БРРХ топливную соль подвергают только второстепенной обработке, отличной от периодической замены части соли ядерного топлива свежей топливной солью. В некоторых случаях удаленное делящееся топливо заменяют воспроизводимыми топливными солями. Некоторые возможные виды второстепенной обработки для доочистки топлива включают механическую фильтрацию продуктов деления, таких как благородные металлы, и минимальное удаление благородных газов. В одном воплощении обработка включает удаление благородных газов, которые образуются в течение постоянной ядерной реакции.

Такие газы включают различные изотопы Кг, Хе и Аг. Эти газы можно удалить путем барботажа топливных солей. Барботаж также оказывает влияние на удаление любых других газообразных летучих продуктов деления, которые могут образоваться.

В одном воплощении делящиеся материалы не отделяют в какой-либо части топливного цикла БРРХ. Вместо этого, размноженный плутоний смешивают в ходе работы с воспроизводимым ураном и создают продукты деления, включая лантаниды, которые являются химически схожими, и ожидают, что они являются растворимыми в воплощениях топливных солей. Таким образом, доочистку топлива в БРРХ можно упростить по сравнению с обычной обработкой топлива в предшествующих реакторах на расплавленных фтористых солях, так как в БРРХ не нужно удалять лантаниды.

Доочистка топлива может дополнительно включать механическую фильтрацию для удаления любых осажденных материалов, которые могут образоваться с помощью постоянной ядерной реакции и/или действия потока текучей среды и движения компонентов. Как фильтрацию, так и барботаж можно выполнять с помощью обычных средств, включая представленные выше со ссылкой на фиг. 1А.

Доочистка топлива может дополнительно включать механическую фильтрацию для удаления любых осажденных материалов, которые могут образоваться с помощью постоянной ядерной реакции и/или действия потока текучей среды и движения компонентов. Как фильтрацию, так и барботаж можно выполнять с помощью обычных средств, включая представленные выше со ссылкой на фиг. 1А.

На фиг. 19 показано воплощение системы доочистки для доочистки топлива, в которой используют сливной бак 1904. В одном воплощении система 1900 предназначена для удаления большей части, если не всех, нерастворимых продуктов деления, продуктов коррозии и других соединений, которые могут изменить стехиометрию топливной соли так, что она выйдет за рамки проектных технических характеристик. Система 1900 также может очищать топливную соль до приемлемых технических характеристик при нормальной и нештатной работе. В показанной системе 1900 загрязнители в газовой фазе можно переводить в пустое пространство выше активной зоны реактора. Эти загрязнители могут содержать продукты деления, благородные газы, UCl_4 и т.п. Система отработанного газа включает оборудование для безопасного обращения с потоком этого отработанного газа и извлечения UCl_4 . Система 1900 содержит оборудование для рассеивания тепла, сбора и хранения/захоронения стабильных и долгоживущих газов, извлечения UCl_4 и повторного сжатия/повторного использования благородных газов. Система 1900 дополнительно может иметь способность снижать концентрацию коррозионных элементов, таких как кислород и сера. Кроме этого, система 1900 может удалять растворенные благородные газы, такие как ^{135}Xe .

В показанном воплощении система состоит из нескольких блоков для выполнения различных операций для облегчения очистки топливной соли. Эти операции включают фильтрацию нерастворимых продуктов деления, выработку пузырьков гелия для способствования удалению инертных газовых продуктов деления из топливной соли до повторного введения в активную зону реактора, дегазацию для удаления пузырьков гелия/благородных газов из расплавленной соли до повторного введения в активную зону реактора, прохождение удаленных дегазацией пузырьков гелия/благородных газов через систему химической ловушки замедленного действия, в которой изотопы распадаются до незначительных уровней, и повторное использование гелия. В одном воплощении любые газы, выпускаемые из реакторной системы, отводят в эту систему 1900. Эти газы пропускают через газоочиститель, в котором они контактируют с охлажденной топливной солью для удаления UCl_4 из газового потока.

В показанном воплощении сливной бак 1904 расположен на уровне ниже уровня 1912 топливной соли в активной зоне 1902 реактора для обеспечения потока расплавленной топливной соли из активной зоны 1902 реактора под действием силы тяжести в сливной бак 1904 для доочистки. Топливо 1906 можно удалять из одного или более положений в активной зоне реактора самотеком или с помощью сифона. Перемещение газа между свободным пространством 1920 в активной зоне реактора и свободным пространством 1921 в сливном баке можно регулировать для поддержания требуемого уровня 1916 топливной соли в сливном баке 1904. В одном воплощении для сохранения целостности активной зоны реактора предусмотрена погружная труба 1910, проходящая от верха активной зоны 1902 реактора в глубину топливной соли 1906, откуда требуется удаление. Расход можно регулировать с помощью клапанов или путем выбора диаметра выпускной трубы и разности давлений между активной зоной 1902 реактора и сливным баком 1904.

Система 1900 обработки может работать в непрерывном или периодическом режиме. Размер системы можно подобрать для обработки с любой требуемой производительностью, такой, например, как 1% в минуту или 0,1% в минуту всей топливной соли 1906 в системе. В одном воплощении сливной бак 1904 можно поддерживать при таких же рабочих температуре и давлении, как в активной зоне реактора. В альтернативном воплощении сливной бак и обработанный боковой поток топливной соли можно поддерживать при других условиях, выбранных для улучшения обработки или регулировочных характеристик топливной соли. Например, в одном воплощении топливную соль 1906 в сливном баке 1904 можно поддерживать при температуре 800-900°C, например 850°C. Для регулирования температуры в сливном баке 1904 показан теплообменник 1908, однако можно использовать любое подходящее устройство, например обогревающую рубашку вокруг сливного бака. В еще одном воплощении относительные рабочие условия активной зоны 1902 реактора и сливного бака 1904 могут позволить обработку, происходящую без активного нагрева сливного бака 1904, в этом случае бак 1904 можно только изолировать вместо активного нагрева.

В некоторых воплощениях количество клапанов можно уменьшить или устранить для уменьшения объема требуемого технического обслуживания. Например, в одном воплощении система работает в периодическом режиме и клапаны устраняют. Сливной бак 1904 заполняют из активной зоны 1902 реактора и выгружают обратно в нее путем настройки давления в сливном баке 1904 относительно активной зоны 1902 реактора, например, путем закачивания газа в сливной бак 1904 или путем физического подъема/опускания сливного бака 1904 относительно уровня 1912 топливной соли в активной зоне 1902 реактора. В альтернативном воплощении можно обеспечить один или более насосов 1914, таких как насос для расплавленной соли с переменной частотой вращения VTP™ от Flowserve Corporation, для перемещения обработанной топливной соли 1906 обратно в активную зону 1902 реактора. В одном воплощении было бы нежелательным иметь клапаны регулирования уровня в возвратном трубопроводе, так как уровень 1916 соли 1906 в сливном баке 1904 можно регулировать с помощью скорости вращения насоса 1914. Уровень 1916 можно измерять либо с помощью бесконтактного датчика ядерного уровня, либо с помощью термомпары в сливном баке, либо с помощью подходящей технологии измерения уровня.

Система 1900 содержит три различных элемента для обработки топливной соли, которые могут получать топливную соль из сливного бака 1904: систему 1924 дегазации, которая содержит гелиевый контактор 1926 и разделительный сосуд 1928, фильтрующую систему, показанную как фильтр 1930, и конденсатор 1932 UCl₄. В показанном воплощении система 1924 дегазации и фильтрующая система 1930 соединены последовательно, так что топливная соль, выходящая из системы дегазации протекает через фильтрующую систему, и конденсатор 1932 UCl₄ является параллельным элементом обработки. Однако в альтернативных воплощениях три элемента можно соединить в любой конфигурации либо последовательно, либо параллельно. Каждый элемент 1924, 1930, 1932 обсуждают более подробно ниже.

В показанной системе 1924 дегазации топливную соль 1906 из сливного бака 1904 перемещают в сосуд для дегазации, который действует как гелиевый контактор 1926, в который гелий нужно добавлять при сильном перемешивании. В одном воплощении в качестве гелиевого контактора 1926 можно использовать ротационный дегазатор. В результате контакта ¹³⁵Xe и другие благородные газы диффундируют из топливной соли 1906 в газообразный гелий. Газообразный гелий, теперь смесь He с ¹³⁵Xe и другими благородными газами, нужно отделить от топливной соли 1906 и выпустить в систему 1922 обработки отработанного газа, либо непосредственно, либо опосредованно путем направления сперва через свободное пространство 1921 в сливном баке 1904. Топливную соль 1906 из гелиевого контактора 1926 перемещают, например, посредством перелива через край под действием силы тяжести или путем закачивания в разделительный сосуд 1928 для обеспечения большего времени пребывания гелия для отделения от топливной соли 1906. В одном воплощении гелиевый контактор 1926 и разделительный сосуд 1928 расположены выше сливного бака для обеспечения перепада давления, необходимого для "перелива" топливной соли из гелиевого контактора через разделительный бак в фильтр 1930 без второго насоса. Также можно использовать альтернативные воплощения, в которых можно использовать закачивание или перемещение в силу разности давлений. В еще одном воплощении разделительный сосуд 1928 можно исключить в интересах большего гелиевого контактора 1926 или ряда параллельных контакторов 1926, которые работают независимо и поочередно в периодическом режиме, для обеспечения достаточного контак-

та гелия и времени разделения.

В показанном воплощении система 1924 дегазации может работать непрерывно, так что поддерживают постоянный поток топливной соли через оба сосуда и из дна каждого из 1926, 1928. В силу преимущества самотека и слива со дна каждого сосуда избегают накапливания твердых веществ на дне любого сосуда. Накопленные твердые вещества должны быть радиоактивными отходами, которые необходимо удалить и захоронить. Разделительный сосуд 1928 сливает в фильтрующую систему 1930, в которой удаляют любые частицы до возвращения топливной соли 1906 в сливной бак 1904.

В одном воплощении в топливную соль можно добавлять химические реагенты для обработки до ее введения в систему 1924 дегазации и/или фильтрующую систему 1930.

Целью таких химических реагентов для обработки должна быть химическая модификация загрязнителей в топливной соли для более эффективного удаления загрязнителей системой 1924 дегазации или фильтрующей системой 1930. Например, закачивание жидкого NaAlCl_4 может способствовать удалению оксидов.

В альтернативном воплощении систему 1924 дегазации можно включить в активную зону 1902 реактора. В этом воплощении газообразный гелий поставляют в активную зону 1902 реактора. Хотя часть газа покидает топливную соль и собирается в свободном пространстве 1920, из которого его можно удалить и обработать с помощью системы 1922 обработки отработанного газа, как описано выше (с прохождением через сливной бак 1904 или без этого), часть гелия вызывает кавитацию в циркуляционных насосах. В этом воплощении гелий можно собрать из насосов и аналогично удалить и обработать с помощью системы 1922 обработки отработанного газа, как описано выше.

В одном воплощении фильтрующую систему 1930 можно непосредственно соединить с верхней частью сливного бака 1904. Можно использовать любой подходящий тип фильтра. Например, в одном воплощении фильтрующая система может содержать трубную решетку, поддерживающую множество отдельных трубчатых фильтрующих элементов внутри фильтрующего сосуда 1930. В одном воплощении фильтрующие элементы не нужно очищать при эксплуатации. Твердые вещества со временем накапливаются на поверхности фильтрующего материала до тех пор, пока фильтрующий сосуд 1930 не выводят из эксплуатации, и фильтрующие элементы либо отправляют в отходы, либо регенерируют. Размер фильтрующих сосудов 1930 можно подобрать для любого требуемого расчетного срока службы на основе проектной производительности системы 1900.

В одном воплощении фильтрующие элементы изготовлены либо из спеченного молибденового порошка, либо из волокон для уменьшения коррозии. Начальный перепад давления фильтрующей системы очень низкий. Фильтрующие элементы могут быть установлены "вверх ногами", т.е. с трубной решеткой на дне сосуда 1930 и фильтрующими элементами, проходящими вертикально вверх над трубной решеткой, так что сосуд должен непрерывно сливать в бак 1904. Вход фильтра можно расположить настолько близко к трубной решетке, насколько возможно, для минимизации выдержки расплавленной соли в фильтрующем сосуде. По мере того как частицы накапливаются на поверхности фильтра и перепад давления возрастает, уровень жидкости в фильтрующем сосуде повышается.

Конденсатор 1932 UCl_4 предназначен для конденсации газообразного UCl_4 и возвращения его в сливной бак 1906. В показанном воплощении конденсатор 1932 UCl_4 соединен так, что он получает и обрабатывает газ из фильтрующей системы 1930 и сливного бака 1904. В альтернативном воплощении конденсатор 1932 UCl_4 можно соединить с другими газовыми потоками из других элементов, таких как активная зона 1902 реактора.

В одном воплощении конденсатор 1932 является противоточным контактным теплообменником, использующим охлажденную топливную соль 1906 из сливного бака 1904 в качестве теплоносителя. Температура плавления чистого UCl_4 составляет 590°C и температура кипения составляет 791°C , так что часть топливной соли 1906 из сливного бака 1904 можно охладить, используя любой стандартный теплообменник, такой как показанный кожухотрубный теплообменник 1934, до температуры ниже температуры кипения UCl_4 , например, 700°C , и пропустить через никелевую или молибденовую структурированную насадку в противотоке относительно выпускаемых газов. Конденсатор 1932 может представлять собой насадочную колонну из содержащих никель и/или молибден нерегулярных насадок. В ней UCl_4 конденсируется в отходящий газ. Так как теплообменник является сосудом для приведения в контакт, конденсированный UCl_4 объединяют с охлажденной топливной солью и возвращают в сливной бак 1904. Выпускаемый газ из конденсатора 1932 можно охладить до поставки в систему 1922 обработки отработанного газа.

Как показано на фиг. 19, выпускной поток из сливного бака 1904 можно переместить в активную зону 1902 реактора, систему 1926 дегазации или конденсатор 1932 UCl_4 в качестве теплоносителя. Эти потоки можно активно регулировать с помощью клапанов (не показаны), или в различных трубопроводах можно поместить ограничительные диафрагмы для баланса потоков топливной соли и во избежание потребности в клапанах. Размер этих ограничительных диафрагм зависит от существующего маршрута подачи по трубопроводу и результатов гидравлических расчетов.

Система 1922 обработки отработанного газа принимает газообразные продукты деления и удерживает их в течение времени, достаточного для того, чтобы обеспечить распад некоторых радиоактивных

изотопов. В показанном воплощении отходящие газы 1918 удаляют из пустого пространства 1920 выше уровня 1912 топливной соли в активной зоне 1902 реактора, и они протекают в сливной бак 1904. Газовый поток, покидающий сливной бак 1904, должен протекать либо непосредственно, либо, как показано на фиг. 19, опосредованно через конденсатор 1928 UCl_4 , через систему 1922 обработки отработанного газа. Кроме того, в показанном воплощении система 1922 обработки отработанного газа получает газ непосредственно из системы 1924 дегазации. В одном воплощении расход газов через всю систему, включая активную зону 1902 реактора, сливной бак 1904 и систему 1922 обработки отработанного газа, регулируют с помощью клапанов и измерительных приборов, расположенных на выходе системы 1922 обработки отработанного газа, где температура невысока и практически отсутствует радиация. В этом воплощении избегают потребности в компрессоре/нагнетателе между реактором и сливным баком. Предполагают, что весь полученный тритий вытекает через систему 1922 обработки отработанного газа.

На фиг. 20 показано воплощение системы 2000 обработки отработанного газа, подходящей для использования при обработке газообразных продуктов деления, полученных из реактора на расплавленных солях, например, в качестве системы 1922 обработки отработанного газа, показанной на фиг. 19. Система предназначена для приема газообразных продуктов деления в газе-носителе, таком как гелий, хотя возможны и другие газы. В показанном воплощении поток через систему 2000 обработки отработанного газа в основном состоит из двух петель рециркуляции, петли 2002 выдержки с малой задержкой и петли 2004 выдержки с большой задержкой.

Подлежащий обработке входящий газ можно сперва охладить и отфильтровать перед поступлением в показанные на фиг. 20 петли рециркуляции с помощью охладителя 2006 и фильтра 2008. В одном воплощении фильтр 2008 предназначен для удаления любых твердых примесей в газах, металлов, солей или продуктов деления, которые могут находиться в газе. Исходя из химического состава расплавленной соли, основные составляющие отфильтрованного входящего газа представляют собой Кг, Хе и тритий.

Петля 2002 выдержки с короткой задержкой содержит один или более сосудов, содержащих активированный уголь. В показанном воплощении петля 2002 выдержки с короткой задержкой содержит три параллельных сосуда 2006 с активированным углем, каждый из которых имеет расчетные размеры для работы с предполагаемой 50%-ной загрузкой Хе. В одном воплощении петля 2002 выдержки с короткой задержкой является петлей выдержки, предназначенной для удерживания полученных газов в течение периода времени, достаточного для обеспечения распада Хе до менее 5% от концентрации на входе. Этот период можно активно регулировать и определять с помощью мониторинга концентраций Хе на входе и на выходе, или петлю 2002 можно сконструировать с фиксированным временем пребывания на основе периода полураспада ^{135}Xe , таким, например, как от 45 до 49 ч или от 40 до 60 ч.

Сосуды 2006 с активированным углем можно поддерживать в защитном кожухе, или они могут быть отдельными защищенными сосудами для ослабления любой радиации, выходящей из системы 2000. Также можно предусмотреть систему 2008 охлаждения сосудов, такую как тепловая ванна из воды или другой теплопроводящей текучей среды, в которую погружены сосуды 2006, для уменьшения теплоты радиоактивного распада. В одном воплощении отходящее тепло из сосудов 2006 можно использовать для выработки пара низкого давления, извлекая таким образом энергию из системы 2008 охлаждения.

Выходящий из петли 2002 выдержки с короткой задержкой газ можно переместить в петлю 2004 выдержки с большой задержкой и/или можно переместить в систему извлечения газа-носителя. В показанном воплощении выходящий из петли 2002 выдержки с короткой задержкой газ разделяют на два потока, при этом один поток проходит в петлю 2004 выдержки с большой задержкой и другой поток проходит в систему 2010 извлечения газообразного гелия. В одном воплощении поток газа, составляющий более 50% от всего выходящего из петли 2002 выдержки с короткой задержкой газа (например, 70-90%), пропускают через одну или более химических ловушек 2012 и мониторов 2014 радиационной безопасности перед поступлением в уравнивательный бак 2016 на входе компрессора 2018 газа-носителя. Гелий сжимают и затем хранят в накопителе 2020. В одном воплощении измеренный объем гелия из этого накопителя 2020 подают и рециркулируют для использования в качестве нового газа-носителя, например, подавая в систему 1924 дегазации.

Любой выходящий из петли 2002 выдержки с короткой задержкой газ, не обработанный системой 2010 извлечения газа-носителя, перемещают в петлю 2004 выдержки с большой задержкой. Петля 2004 выдержки с большой задержкой предназначена для достаточно долгого удерживания Кг и Хе для того, чтобы концентрация радиоактивных изотопов упала до приемлемого для выгрузки порога. В одном воплощении аналогично петле 2002 выдержки с короткой задержкой петля 2004 выдержки с большой задержкой содержит один или более сосудов, содержащих активированный уголь. В показанном воплощении петля 2004 выдержки с большой задержкой содержит три параллельных сосуда 2006 с активированным углем, каждый имеет расчетные размеры для работы с предполагаемой 50%-ной загрузкой Хе в течение конкретного периода, в этом случае 90 суток, но который может составлять 50-150 суток, в зависимости от требуемого для выгрузки порога. Сосуды 2006 с активированным углем можно поддерживать в защитном кожухе или они могут быть отдельными защищенными сосудами для ослабления любой радиации, выходящей из системы 2000. Также можно предусмотреть систему 2008 охлаждения сосудов, как описано выше.

Выходящий из системы выдержки Хе с большой задержкой газ можно переместить через подогреватель 2022, который повышает температуру газа до 800°C или выше. Газ можно затем пропустить через каталитический сосуд 2024, в котором тритий окисляют воздухом. Газ затем протекает через охлаждаемый водой вторичный охладитель 2026 или ряд вторичных охладителей 2026, как показано, что уменьшает температуру для снижения тепловой нагрузки на конечный абсорбер 2028 с угольной насадкой. В одном воплощении абсорбер 2028 предназначен для работы при -20°C. Тритий, Кг и Хе задерживаются в угле, при этом газообразный гелий проходит через слой. После выпуска из охлажденного абсорбера гелий сжимают и его можно рециркулировать в систему продувки реактора для уплотнений насосов и т.п. В показанном воплощении присутствуют три охлажденных абсорбера 2028 с размерами, выбранными для 50% предполагаемой загрузки, с постоянной эксплуатацией двух абсорберов из трех. В любой заданный момент неэксплуатируемый абсорбер 2028 регенерируют путем электрического нагрева абсорбера и пропускания небольшого нагретого потока гелия через абсорбер в обратном направлении. Этот поток регенерированного газа, содержащий Кг, Хе и $^3\text{H}_2\text{O}$, протекает в охлаждаемый жидким азотом коллекторный цилиндр 2030 для постоянного хранения.

На фиг. 21 показано воплощение способа доочистки топливной соли на основе систем, описанных на фиг. 19 и 20. В показанном воплощении способ 2100 начинается с перемещения облученной топливной соли из действующей активной зоны 1902 реактора в сливной бак 1904 при операции 2102 перемещения.

Топливную соль затем дегазируют в операции 2104 дегазации, при которой газ-носитель, такой как гелий, контактирует с облученной топливной солью, удаляя таким образом газообразные продукты деления из топливной соли. В одном воплощении операция 2104 дегазации может включать приведение топливной соли в контакт с газом-носителем в сосуде для приведения в контакт, затем перемещение топливной соли во второй сосуд на некоторое время пребывания для обеспечения дополнительного времени для того, чтобы произошло разделение. При этом операции 2104 получают смесь газа-носителя/газового продукта деления и дегазированную топливную соль, содержащую пониженное количество газообразных продуктов деления относительно облученной топливной соли.

После операции 2104 дегазации дегазированную топливную соль можно подвергнуть фильтрации в операции 2106 фильтрации. В одном воплощении операции 2106 фильтрации дегазированная топливная соль проходит через фильтр 1930 под действием силы тяжести и выходящий поток фильтрованной топливной соли сливается в сливной бак 1904. Так как предположительно любые твердые вещества в топливной соли при рабочей температуре представляют собой ту или иную форму загрязнителя (либо твердый продукт деления, либо продукт коррозии, либо другой загрязнитель), любые отфильтрованные твердые вещества являются нежелательными и их в этой операции 2106 удаляют и отправляют в отходы.

Способ 2100 доочистки дополнительно включает обработку смеси газа-носителя/газового продукта деления, образованной при операции 2104 дегазации, в операции 2108 обработки и извлечения газа-носителя. Эта операция 2108 включает сбор смеси газа-носителя/газового продукта деления из системы и перемещение ее в систему обработки отработанного газа, такую как описанная выше система 1922. Операция 2108 обработки и извлечения газа-носителя может включать хранение смеси газа-носителя/газового продукта деления в течение первого периода времени, затем извлечение газа-носителя из смеси путем похождения газа-носителя через сепаратор, углеродный фильтр, ионообменное устройство или другую химическую ловушку, которая удаляет Кг и Хе из газа-носителя, или другим способом достаточно очищает газ-носитель для того, чтобы его можно было повторно использовать.

Способ 2100 доочистки может дополнительно включать сбор газообразного UCl_4 , который испаряется из топливной соли, и повторную конденсацию его в операции 2110 конденсации UCl_4 . Извлеченный конденсат UCl_4 возвращают в топливную соль путем растворения его в потоке топливной соли и возвращения данного потока, который можно рассматривать как топливную соль с высокой концентрацией UCl_4 , в сливной бак или активную зону реактора.

Способ 2100 включает возвращение фильтрованной дегазированной топливной соли в активную зону реактора. В одном воплощении системы 1900 на фиг. 19 способ 2100 непрерывно применяют на боковом потоке, отбираемом из активной зоны 1902 реактора. В этом воплощении сливной бак 1904 непрерывно получает как облученную топливную соль из активной зоны 1902 реактора, так и фильтрованную топливную соль из фильтрующей системы 1930. Кроме того, он также получает топливную соль с конденсированным UCl_4 из конденсатора UCl_4 . Одновременно очищенную топливную соль из сливного бака перемещают в активную зону реактора. В альтернативном воплощении описанные выше операции способа 2100 можно выполнять параллельно в режиме непрерывного или периодического способа. Кроме того, различные операции можно выполнять последовательно в режиме непрерывного или периодического способа.

Последующая обработка топливной соли.

Удаленная из работающего реактора топливная соль содержит продукты деления помимо составляющих топливной соли, описанных в данном документе. Хотя некоторые продукты деления можно легко удалить путем барботажа, отстаивания или дифференциального осаждения, другие, в особенности описанные выше лантаниды, может быть трудно удалить. Отметим, что такая используемая очистка топ-

ливной соли может быть не обязательной в хлористых топливных солях на быстрых нейтронах, так как используемая топливная соль может подходить для использования "в существующем состоянии" в качестве исходного материала для другого реактора на расплавленных солях. Однако если требуется очистка, можно использовать систему удаления продуктов деления.

Система удаления может быть предназначена для удаления одного или более лантанидов из соли ядерного топлива. Система удаления продуктов деления может содержать один или более плазменных масс-фильтров. В качестве неограничивающего примера один или более плазменных масс-фильтров могут включать плазменный масс-фильтр архимедова типа. Использование плазменного масс-фильтра архимедова типа описано в статье R. Freeman et al. в "Archimedes Plasma Mass Filter," AIP Conf. Proc. 694, 403 (2003), которая включена в данный документ путем ссылки во всей своей полноте.

В другом воплощении архимедова фильтровальная установка (АФУ) может быть предназначена для удаления одного или более лантанидов из топливной соли из одного или более реакторов. В одном воплощении АФУ может содержать два плазменных масс-фильтра. В качестве неограничивающего примера каждый из двух плазменных масс-фильтров способен к обработке приблизительно тонны топливной соли в сутки. В другом воплощении первый плазменный фильтр настраивают так, чтобы отделить от топливной соли тяжелые элементы, при этом второй фильтр настроен для отделения составляющих соли от продуктов деления. В этой конфигурации АФУ может поддерживать парк из приблизительно 100-200 ядерных реакторов на расплавленных солях (например, быстрых реакторов на расплавленных хлористых солях). В другом воплощении в парке можно использовать фильтрацию архимедова типа в периодическом режиме. В качестве неограничивающего примера в периодическом режиме каждый реактор может посылать часть (например, 10-20%) своей соли в АФУ каждые 1-3 года. Дополнительно соль можно либо возвращать в первоначальный реактор, либо замещать солью из другого реактора, либо заменять загруженной обедненным ураном солью в первоначальном реакторе. Очищенные от лантанидов соли можно использовать для начальной работы дополнительных ядерных реакторов на расплавленных солях без необходимости в постоянном обогащении, как обсуждено выше.

Следует отметить, что реактор 100 по настоящему изобретению не ограничен описанным выше фильтром архимедова типа, который предоставлен лишь в целях иллюстрации. Здесь понятно, что требования к разделению в реакторе 100 по настоящему изобретению могут быть значительно занижены по сравнению с системой, обычно используемой в случае системы архимедова типа. Например, в реакторе 100 по настоящему изобретению может требоваться эффективность разделения, требующая только приблизительно 0,99 или 0,9. По этой причине в случае реактора 100 по настоящему изобретению можно использовать значительно более простую конструкцию плазменного масс-фильтра.

В другом воплощении система удаления продуктов деления содержит значительно меньший плазменный масс-фильтр, способный к очистке 30-50 кг соли в сутки. В качестве неограничивающего примера небольшой обводной поток (~10-8% потока) можно направить в фильтр для очистки и немедленно направить обратно в активную зону без необходимости в транспортировке за пределы объекта. Здесь следует отметить, что хотя небольшие плазменные масс-фильтры могут проигрывать в экономической эффективности в масштабе, они являются доступными и значительно менее дорогими по сравнению с поставками свежего топлива, которое обогащено делящимся материалом.

Технологии против распространения.

Так как расплавленную соль ядерного топлива можно удалить из реактора 100, требуется обеспечить меры безопасности против распространения расплавленной топливной соли 108 по настоящему изобретению. В одном воплощении в расплавленную топливную соль 108 предварительно загружают или ее изначально создают с одним или более материалами, такими как лантаниды или другие элементы, которые трудно отделить от топливной соли, но которые улучшают стойкость к распространению и служат в качестве поглотителя нейтронов в расплавленной топливной соли 108. Это уменьшает способность использования топливной соли в средствах вооружения, если она была перехвачена до ее использования в качестве ядерного топлива в реакторе на расплавленных солях, но существенно не влияет на критичность БРРХ из-за его спектра быстрых нейтронов. Добавление лантанидов также делает топливную соль более опасной для обращения с ней, таким образом также уменьшая ее привлекательность для использования в средствах вооружения.

Один способ определения привлекательности материала для средств вооружения называют показателем качества (Figure of Merit, FOM). FOM является расчетной величиной, в которой учитывают массу материала (или материалов), его дозу облучения и его теплоту распада. Одним уравнением для FOM является следующее:

$$FOM_1 = 1 - \log_{10} \left(\frac{M}{800} + \frac{Mh}{4500} + \frac{M}{50} \left[\frac{D}{500} \right]^{\log_{10} 2} \right)$$

где M является чистой критической массой в кг металлического компонента соединения (т.е. не включает массовый вклад оксидов, хлоридов, других анионов и т.п.), h является энthalпией или теплотой распада в Вт/кг и D является дозой облучения 0,2М на 1 м от поверхности в рад/ч.

Для целей нераспространения FOM < 1,0 считают непривлекательным для средств вооружения. Та-

ким образом, в одном воплощении лантаниды добавляют в топливную соль до степени, необходимой для получения $FOM < 1,0$.

В одном воплощении при предварительном введении в расплавленную соль на основе хлоридов, один или более предварительно вводимых лантанидов образуют один или более трихлоридов лантанидов. Следует отметить, что эти соединения похожи, по меньшей мере, в химическом смысле, на $PuCl_3$, который присутствует в расплавленном топливе (например, $Pu-239$ образуется в течение обогащения и может образовывать $PuCl_3$). Присутствие одного или более трихлоридов лантанидов делает $PuCl_3$ менее подходящим для средств вооружения.

Присутствие трихлоридов лантанидов в расплавленной топливной соли 108 уменьшает пригодность Pu , присутствующего в расплавленной топливной соли 108, в случае попыток применения химического способа для отделения Pu из остатка расплавленной топливной соли. В этом смысле лантаниды "присутствуют без участия" наряду с Pu в течение некоторых форм химического отделения. Эта особенность обеспечивает по меньшей мере три преимущества. Во-первых, лантаниды делают конечный Pu образец более радиоактивным, делая его более сложным в обращении, экранировании и т.п. Во-вторых, лантаниды увеличивают выработку тепла внутри Pu образца, снова делая Pu более сложным в обращении, экранировании и т.п., так как он может достичь температур выше температуры плавления Pu . В-третьих, присутствие лантанидов изменяет критическую массу материала, так что реакция в данном Pu образце является намного менее эффективной по сравнению с не содержащим лантаниды образцом. Фактически, в случае загруженного лантанидами Pu образца больше Pu материала потребовалось бы для средств вооружения, делая применение в средствах вооружения сложным и неудобным.

Дополнительно химически отделенный из смеси уран не подходит для применений в средствах вооружения, так как он является малообогащенным ураном (МОУ).

Следует отметить, что хотя некоторые лантаниды могут образовываться в топливной соли 108 в виде продуктов деления в течение работы ядерного реактора 100, в данном документе предполагают, что лантаниды данного воплощения предварительно вводят в соль 108 ядерного топлива до начала работы реактора 100 и, таким образом, до производства любого значительного количества плутония. После того как работа началась, топливная соль естественно становится менее подходящей для применений в средствах вооружения, так как в силу цепной реакции создаются и нарастают лантанидные продукты деления.

В одном воплощении один или более лантанидов предварительно вводят в расплавленную топливную соль 108 до начала работы реактора 100. В другом воплощении один или более лантанидов предварительно вводят в расплавленную топливную соль 108 до достижения реактором 100 выбранного порога реактивности. В качестве неограничивающего примера, один или более лантанидов предварительно вводят в расплавленную топливную соль 108 до достижения реактором порога критичности или субкритичности.

В другом воплощении один или более лантанидов предварительно вводят в расплавленную топливную соль 108 до выработки выбранного порогового значения плутония (например, $Pu-239$) в реакторе (например, выработанного путем обогащения урана в действии по размножению и выгоранию урана - плутония). В качестве неограничивающего примера один или более лантанидов предварительно вводят в расплавленную топливную соль 108 до выработки выбранного количества плутония в реакторе. Например, один или более лантанидов предварительно вводят в расплавленную топливную соль 108 до выработки 8 кг плутония в реакторе 100. В другом примере один или более лантанидов предварительно вводят в расплавленную топливную соль 108 до выработки 4 кг плутония в реакторе 100. В еще одном примере один или более лантанидов предварительно вводят в расплавленную топливную соль 108 до выработки 2 кг плутония (и т.д.) в реакторе 100. Следует отметить, что указанные выше массы плутония не накладывают ограничения на данное воплощение и представлены лишь в целях иллюстрации, так как в рамках данного воплощения можно применять любое пороговое значение плутония.

В другом воплощении один или более лантанидов можно смешать с расплавленной топливной солью 108, так что получаемая содержащая лантаниды топливная соль имеет концентрацию лантанидов от 0,1 до 10 мас.%. В другом воплощении один или более лантанидов можно смешать с расплавленной топливной солью 108 так, что получаемая содержащая лантаниды топливная соль имеет концентрацию лантанидов от 4 до 8 мас.%. В еще одном воплощении выбранный лантанид или лантаниды можно смешать с расплавленной топливной солью 108 в таких пропорциях для достижения порогового значения FOM, которое составляет $< 1,0$, что пороговое значение FOM составляет, например, 0,99, 0,98, 0,97, 0,96 или 0,95. В некоторых воплощениях может потребоваться пороговое значение FOM, составляющее менее 0,95, такое как менее 0,9 или 0,8.

В одном воплощении один или более лантанидов могут включать один или более из La, Ce, Pr или Nd. В другом воплощении в случае расплавленной соли 108 ядерного топлива на основе хлоридов один или более лантанидов можно добавить в расплавленную соль 108 ядерного топлива путем смешивания расплавленной топливной соли 108 с одним или более хлоридами лантанидов. Например, один или более хлоридов лантанидов могут включать один или более из $LaCl_3$, $CeCl_3$, $PrCl_3$ или $NdCl_3$. В другом воплощении в случае расплавленной соли 108 ядерного топлива на основе хлоридов один или более лантани-

дов (или один или более хлоридов лантанидов) можно добавить в расплавленную соль 108 ядерного топлива путем смешивания расплавленной топливной соли 108 с одной или более солями-носителями (например, NaCl), содержащими один или более лантанидов или хлоридов лантанидов.

В другом воплощении смесь расплавленной соли ядерного топлива и по меньшей мере одного лантанида образуют вне ядерного быстрого реактора на расплавленных солях. В качестве неограничивающего примера смесь расплавленной соли 108 ядерного топлива и одного или более лантанидов можно образовать путем смешивания некоторого объема расплавленной соли 108 ядерного топлива (до загрузки в реактор 100) и одного или более лантанидов (или хлоридов лантанидов) в отдельной смесительной станции вне активной зоны 102 реактора 100 или после заранее заданного периода времени после начала работы, когда моделируют размножение в активной зоне ожидаемого количества Pu.

В другом воплощении смесь расплавленной соли ядерного топлива и по меньшей мере одного лантанида образуют внутри быстрого ядерного реактора на расплавленных солях. В качестве неограничивающего примера смесь расплавленной соли 108 ядерного топлива и одного или более лантанидов можно образовать путем добавления некоторого объема одного или более лантанидов (или хлоридов лантанидов) в расплавленную соль 108 ядерного топлива, содержащуюся в первом контуре (например, активной зоне 102 реактора, системе 110 теплоносителя первого контура и т.п.) до начала работы реактора 100.

На фиг. 15 показано воплощение технологической схемы 1500, представляющей пример операций, относящихся к подаче ядерного топлива, предварительно загруженного одним или более лантанидами, в быстрый ядерный реактор на расплавленных солях в соответствии с одним или более воплощениями настоящего изобретения. На фиг. 15 можно пояснить и обсудить описанные выше примеры, показанные на фиг. 1A-1F, и/или другие примеры и ситуации. Необходимо понимать, что последовательность операций можно выполнять во множестве других сред и ситуаций и/или в модифицированных версиях фиг. 1A-1F. Также, хотя операции представлены на фиг. 15 в показанной последовательности, необходимо понимать, что различные операции можно выполнять в другом порядке, чем показано, или можно выполнять параллельно.

В операции 1502 способ 1500 включает предоставление расплавленной соли ядерного топлива. В качестве неограничивающего примера можно предоставить выбранный объем расплавленной соли ядерного топлива. Например, расплавленная соль ядерного топлива может включать, но не ограничена перечисленным, любую топливную соль на основе хлоридов, описанную в настоящем изобретении. В другом примере расплавленная соль ядерного топлива может включать, но не ограничена перечисленным, любую топливную соль на основе фторидов, описанную в настоящем изобретении.

В операции 1504 способ 1500 включает предоставление по меньшей мере одного лантанида. В качестве неограничивающего примера предоставляют один или более лантанидов, таких как, но не ограниченных перечисленным, один или более из La, Ce, Pr или Nd. В одном воплощении один или более лантанидов предоставляют в форме соли лантанида. Например, один или более лантанидов можно предоставить в форме соли лантанида, химически совместимой с расплавленной солью ядерного топлива действия 1502. Например, в случае расплавленной соли ядерного топлива на основе хлоридов один или более лантанидов можно предоставить в форме одной или более солей лантанидов, таких как, но не ограниченных перечисленным, LaCl_3 , CeCl_3 , PrCl_3 или NdCl_3 . В другом воплощении выбранный объем одного или более лантанидов (или одной или более солей лантанидов) можно предоставить в форме смеси одного или более лантанидов (или одной или более солей лантанидов) с дополнительной солью, такой как, но не ограниченной этим, соль-носитель, совместимая с расплавленной солью ядерного топлива действия 1502.

В операции 1506 способ 1500 включает смешивание расплавленной соли ядерного топлива по меньшей мере с одним лантанидом с образованием содержащей лантаниды расплавленной соли ядерного топлива до начала работы быстрого ядерного реактора на расплавленных солях или после того, как заданное количество Pu размножено. В одном воплощении объем расплавленной топливной соли, предоставленной в операции 1502, смешивают с одним или более лантанидами (или одной или более солями лантанидов) операции 1504, так что получаемая расплавленная солевая смесь имеет содержание лантанидов 0,1-10 мас.%. В качестве неограничивающего примера, предоставленный в операции 1502 объем расплавленной топливной соли можно смешать, но не обязательно смешивать, с одним или более лантанидами (или одной или более солями лантанидов) действия 1504 так, что получаемая расплавленная солевая смесь имеет содержание лантанидов 4-8 мас.%.

В операции 1508 способ 1500 включает подачу содержащей лантаниды расплавленной соли ядерного топлива, по меньшей мере, в активную зону быстрого ядерного реактора на расплавленных солях. В одном воплощении смесь операции 1506 можно образовать путем смешивания объема расплавленной топливной соли с одним или более лантанидами (или одной или более солями лантанидов) внутри быстрого ядерного реактора 100 на расплавленных солях. В одном примере лантаниды можно добавлять в расплавленную топливную соль внутри активной зоны реактора. В другом воплощении смесь операции 1506 можно образовать путем смешивания объема расплавленной топливной соли с одним или более лантанидами (или одной или более солями лантанидов) вне быстрого ядерного реактора 100 на расплав-

ленных солях, например, но не ограничиваясь этим, в смесительном сосуде. В этой связи, после смешивания расплавленной топливной соли с одним или более лантанидами (или одной или более солями лантанидов) содержащую лантаниды солевую смесь можно загрузить в реактор 100.

Как обсуждали выше, цель способа 1500 состоит в изготовлении топливной соли, менее привлекательной для использования в качестве сырья для разработки оружия. Один аспект воплощений способа 1500 состоит в том, что доза облучения, т.е. воздействие радиации от содержащей лантаниды топливной соли, возрастает. Количество добавленных лантанидов можно определить на основе целевой дозы облучения. Например, министерство энергетики и другие регулирующие органы опубликовали рекомендованные пороговые значения для того, что называют "пределы самозащиты", при которых или за пределами которых этот орган полагает материал более не привлекательным для применения в средствах вооружения. Одной такой мерой привлекательности может быть доза облучения, которую можно сделать настолько высокой, что получатель подвергается воздействию настолько большой радиации, что это лишает возможности получателя завершить намеченную задачу из-за повреждения, вызванного данным воздействием. Одна такая предельная доза облучения составляет 100 рад/ч, другая составляет 500 рад/ч и третья составляет 1000 рад/ч, все измеренные на расстоянии 1 м. Однако были предложены пределы вплоть до 10000 рад/ч и их можно использовать. Воплощения способа 1500 можно приспособить для предоставления топливной соли, имеющей любую требуемую дозу облучения.

Другой такой мерой привлекательности является FOM, описанный выше. Как описывали, на основе этой меры начальные топливные соли искусственно модифицируют так, чтобы они имели FOM менее 1,0, который полагают непривлекательным для применения в средствах вооружения. В одном воплощении выбранный лантанид или лантаниды можно смешать с расплавленной топливной солью 108 в таких пропорциях, чтобы достичь порогового значения FOM, которое составляет $<1,0$. В альтернативных воплощениях можно выбрать более строгие пороговые значения FOM, составляющие менее 0,99, 0,98, 0,97, 0,96 или 0,95, и можно добавить лантаниды или другие составляющие, изменяющие чистую критическую массу M , энтальпию h и дозу облучения D , коэффициенты уравнения FOM, для достижения требуемого порогового значения. В некоторых воплощениях может потребоваться пороговое значение ПК, составляющее менее 0,95, например менее 0,9 или 0,8.

Используемые лантаниды могут представлять собой любой лантанид, однако особенно подходящими являются долгоживущие изотопы лантанидов с особенно высокой дозой облучения. Помимо лантанидов, радиоактивные изотопы других элементов можно использовать для увеличения дозы облучения топливной соли. Они включают цезий-137 и йод-121.

Топливная соль на хлориде плутония.

В одном воплощении топливная соль 108 может содержать выбранное количество плутония. Например, в случае соли ядерного топлива на основе хлоридов, плутоний может присутствовать в топливной соли 108 в форме трихлорида плутония (например, PuCl_3). Способы получения PuCl_3 известны в технике и можно использовать любой подходящий способ.

Было показано, что PuCl_3 совместим с солями хлорида урана. Одним воплощением с использованием PuCl_3 является $\text{UCl}_4\text{-UCl}_3\text{-PuCl}_3\text{-[X]Cl}$, где, как и выше, $[\text{X}]\text{Cl}$ является любой дополнительной неделяющей солью. В этих воплощениях молярные отношения любой из различных хлористых солей можно определить по потребности для получения требуемой температуры плавления. В одном воплощении количество PuCl_3 изменяется от обнаружимого количества PuCl_3 до 80 моль.%, и другие компоненты (т.е. UCl_4 , UCl_3 и $[\text{X}]\text{Cl}$) изменяются независимо от 0 до 80%. Таким образом, такие воплощения, как $\text{UCl}_3\text{-PuCl}_3\text{-[X]Cl}$ и $\text{UCl}_4\text{-PuCl}_3\text{-[X]Cl}$ рассматривают как представляющие собой $\text{UCl}_4\text{-UCl}_3\text{-PuCl}_3\text{-NaCl}$.

Воплощения урановых топливных солей.

Описанное выше воплощение топливных солей 17 $\text{UCl}_3\text{-71 UCl}_4\text{-12 NaCl}$ представляет воплощение треххлористой соли урана с наивысшей плотностью урана для топливной соли, которая имеет температуру плавления 500°C или меньше. Таким образом, это воплощение соли подходит для тех ситуаций и реакторов, для которых максимальное увеличение количества урана в топливе и минимизация таким образом общего критического объема соли является единственной целью.

Однако величина критического объема соли не является единственным фактором, влияющим на затраты в реакторе на расплавленных солях. Другие характеристики топлива также влияют на общие затраты реактора, включая тепловые свойства топливной соли, такие как объемная теплоемкость и теплопроводность (которые влияют на размер требуемых теплообменников и трубопроводов, скорости теплоносителя и топливной соли в системе и объем топливной соли в любой данный момент времени, который нужно охладить вне активной зоны реактора), коррозионная способность топливной соли (которая влияет на стоимость материалов, требуемых для контактирующих с солью элементов реактора) и количество UCl_4 в топливной соли (что из-за его относительно высокого давления паров означает, что топливная соль с более высоким содержанием UCl_4 имеет более высокую концентрацию UCl_4 в свободном пространстве над солью, что требует более дорогого оборудования и материалов для обращения с отработанным газом).

Было определено, что воплощения топливной соли, имеющие относительно более низкую плотность урана, но более высокую теплопроводность и более высокую удельную теплоемкость могут быть

более экономичными, чем топливные соли с высоким содержанием урана в некоторых конструкциях реакторов на расплавленных солях. Воплощение топливной соли, которое потенциально является более экономичным, чем воплощение 17 UCl₃-71 UCl₄-12 NaCl, является тройным воплощением UCl₃-UCl₄-NaCl, имеющим температуру плавления менее 600°C, плотность урана более 1,5 г/см³ и удельную теплоемкость более 600 Дж/(кг·°C). Воплощения топливной соли могут иметь температуры плавления менее 600°C, 550°C, 500°C, 450°C, 400°C или даже 350°C. Воплощения топливной соли могут иметь плотность урана более 1,5 г/см³, 1,6 г/см³, 1,7 г/см³, 1,8 г/см³, 1,9 г/см³, 2,0 г/см³ или даже 2,1 г/см³. Воплощения топливной соли могут иметь удельную теплоемкость более 600 Дж/(кг·°C), 700 Дж/(кг·°C), 800 Дж/(кг·°C) или даже 900 Дж/(кг·°C).

Воплощения топливной соли также могут содержать пониженное количество UCl₄ (относительно 17 UCl₃-71 UCl₄-12 NaCl) для того, чтобы быть более восстанавливающими и менее коррозионными, чем 17 UCl₃-71 UCl₄-12 NaCl. Пониженная коррозионная способность топливной соли потенциально обеспечивает менее дорогие элементы, потому что такие элементы легче изготавливать, и контактирующие с солью материалы (такие как никелевая облицовка вместо молибденовой облицовки) являются менее дорогими. Воплощения урановых топливных солей содержат UCl₄ в количестве от 1 до 50 моль.% UCl₄. Менее коррозионные воплощения топливных солей могут содержать менее 50 моль.% UCl₄, менее 40 моль.%, 30 моль.%, 20% моль.%, 15 моль.% или даже 10 моль.% UCl₄. Например, рассматривают топливные соли, содержащие от 2 до 30 моль.% UCl₄, от 5 до 20 моль.% UCl₄ и от 8 до 12 моль.% UCl₄. В некоторых воплощениях менее коррозионные воплощения урановых топливных солей могут содержать только следовое (менее 1%), но измеримое количество UCl₄.

Воплощения топливных солей содержат UCl₃ в количестве от 1 моль.% до 33 моль.% UCl₃. Воплощения топливных солей содержат NaCl, где делящиеся топливная соль содержит от 40 до 66 моль.% NaCl.

На основе тепловых расчетов примером описанного выше воплощения топливной соли является 30 UCl₃-10 UCl₄-60 NaCl. В табл. 5 ниже показано различие расчетных свойств материалов при 650°C для топливной соли 30 UCl₃-10 UCl₄-60 NaCl и воплощения 17 UCl₃-71 UCl₄-12 NaCl с высокой плотностью урана. В табл. 6 ниже показано, как воплощение топливной соли 30 UCl₃-10 UCl₄-60 NaCl улучшает рабочие характеристики типичного реактора на расплавленных солях номинального размера (2500 Вт) по сравнению с топливной солью 17 UCl₃-71 UCl₄-12 NaCl.

Таблица 5

Сравнение тепловых свойств воплощений топливных солей

Топливная соль	17UCl ₃ -71UCl ₄ -12NaCl	30UCl ₃ -10UCl ₄ -60NaCl
Температура плавления, °C	491-512	508 определенная, (505,6 измеренная, см. ниже)
Плотность, г/см ³	3,68	3,44
Плотность урана, г/см ³	2,27	1,83
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C)	544	937
Объемная теплоемкость, Дж/(кг·°C)	2,01·10 ⁶	3,22·10 ⁶

Таблица 6

Сравнение тепловых свойств воплощений топливных солей

Топливная соль	17UCl ₃ -71UCl ₄ -12NaCl	30UCl ₃ -10UCl ₄ -60NaCl
Расчетная мощность реактора, Вт	2500	2500
Разница температур по теплообменнику первого контура, ΔT	78	85
Расход топливной соли через теплообменники, м/с	7	7
Массовый расход, кг/с	60000	31400
Объемный расход через теплообменники, м ³ /с	16,3	9,1
Минимальная площадь поперечного сечения теплообменника, м ²	2,33	1,30

Как показано в таблицах выше, реакторы на расплавленных солях, использующие воплощения топливных солей, могут работать при более низких расходах топливных солей из-за улучшенных свойств теплопереноса, позволяя таким образом использовать оба небольших насоса. Для реакторов на расплавленных солях, использующих воплощения топливных солей с молярной долей NaCl от 40 до 66%, требуется относительно большая активная зона для того, чтобы иметь сравнимую массу урана и/или способность к выработке мощности, в противоположность воплощениям с большей плотностью урана. Однако

рассчитано, что для реакторов на расплавленных солях, использующих воплощения топливных солей с молярной долей NaCl от 40 до 66%, требуется более низкий объем всей топливной соли для работы, потому что меньше топливной соли требуется для охлаждения вне реактора. Это имеет место, даже если воплощения топливных солей имеют меньшую плотность урана. Так как топливная соль является очень дорогой, это уменьшение общего количества топлива для работы реактора является значительным снижением затрат. Дополнительными преимуществами воплощений топливных солей являются более сильная естественная циркуляция в активной зоне, уменьшенный размер насосов из-за пониженных объемных расходов, менее дорогие элементы в силу легкого изготовления и более дешевых материалов и пониженные расходы на техническое обслуживание в силу пониженного радиационного повреждения.

Пример топливных солей был изготовлен в лаборатории. В эксперименте 0,12272 г UCl_3 , 0,04792 г UCl_4 и 0,04089 г NaCl объединяли с образованием 0,21153 г 30,143 моль.% UCl_3 -10,671 моль.% UCl_4 -59,186 моль.% NaCl. Образец массой 31,31 мг этого соединения анализировали с использованием термogravиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии (ТГА-ДСК) с использованием синхронного термического анализатора Netzch STA 449 F3 Jupiter. Анализ ТГА-ДСК определил, что температура плавления образца составляла 505,6°C.

На фиг. 22 вычерчено положение изготовленной топливной соли на тройной диаграмме, показанной на фиг. 4. Вычисления фиг. 4 для изготовленного воплощения определяют температуру плавления как 508°C. Как отмечено выше, лабораторный анализ указывает, что измеренная температура плавления составляет 505,6°C.

Заключение.

Хотя были показаны и описаны конкретные аспекты настоящего объекта изобретения, описанного в данном документе, специалисту ясно, что на основе идей данного документа можно выполнить изменения и модификации, не отклоняясь от объекта изобретения, описанного в данном документе, и его расширенные аспекты и поэтому приложенная формула изобретения включают в область защиты все такие изменения и модификации как находящиеся внутри истинного духа и области защиты объекта изобретения, описанного в данном документе. Специалисту понятно, что, в общем, термины, использованные в данном документе, и в особенности в приложенной формуле изобретения (например, в независимых пунктах формулы изобретения) в общем рассматривают как "открытые" термины (например, термин "включающий" нужно интерпретировать как "включающий, но не ограниченный", термин "содержащий" нужно интерпретировать как "содержащий по меньшей мере", термин "включает" нужно интерпретировать как "включает, но не ограничен" и т.п.). Специалисту также понятно, что если предполагают конкретное число перечислений введенных пунктов, такое намерение будет ясно изложено в пункте и при отсутствии такого перечисления никакого такого намерения не присутствует.

Например, для понимания, следующие приложенные пункты могут содержать применение вводных выражений "по меньшей мере один" и "один или более" для введения перечислений пунктов. Однако использование таких выражений нельзя истолковывать как означающее, что введение перечисления пунктов в единственном числе ограничивает любой конкретный пункт, содержащий такое введенное перечисление пунктов, пунктами, содержащими только одно такое перечисление, даже когда такой же пункт включает вводные выражения "один или более" или "по меньшей мере один" и единственное число, то же самое остается справедливым для использования конкретно указанного единственного числа используемых для введения перечислений пунктов. Кроме того, даже если конкретное количество введенных перечислений пунктов явно перечислено, специалист понимает, что такое перечисление обычно нужно интерпретировать как означающее, по меньшей мере, перечисленное число (например, простое перечисление "двух перечислений" без других модификаторов обычно означает по меньшей мере два перечисления или два и более перечислений).

Если не указано другое, все числа, выражающие количество составляющих, свойства, такие как молекулярная масса, условия реакции и т.п., используемые в техническом описании и формуле изобретения, нужно понимать как модифицированные во всех случаях термином "примерно". Термин "примерно" не предназначен для расширения либо ограничения степени эквивалентов, что в другом случае может позволить конкретное значение. Далее, если не указано другое, термин "примерно" должен в явной форме включать "точно", совместимый с касающимися обсуждений интервалами и численными данными. Термин "примерно" в рамках настоящего изобретения означает значение в пределах 15% ($\pm 15\%$) от значения, указанного сразу после термина "примерно", включая любые числовые значения внутри этого интервала, значение, равное верхнему пределу (т.е. +15%), и значение, равное нижнему пределу (т.е. -15%) этого интервала. Например, значение "100" включает все числовые значения, которые находятся между 85 и 115, включая 85 и 115 (за исключением "100%", которое всегда имеет верхний предел 100%).

Концентрации, количество и другие численные данные можно выразить или представить в данном документе в формате интервала. Необходимо понимать, что такой формат интервала используют лишь для удобства и краткости и таким образом его нужно интерпретировать гибко для включения не только численных значений, явно перечисленных в качестве пределов интервала, но также для включения всех отдельных числовых значений или подинтервалов, охваченных этим интервалом, как если бы каждое численное значение и подинтервал был явно указан. В качестве иллюстрации численный интервал "от 4

до 7%" нужно интерпретировать как включающий не только явно указанные значения примерно 4% и примерно 7%, но также как включающий отдельные значения и подинтервалы внутри указанного интервала. Таким образом, в этом числовом интервале указаны отдельные значения, такие как 4,5; 5,25 и 6, и подинтервалы, такие как 4-5, 5-7 и 5,5-6,5 и т.п. Такой же принцип применим для интервалов, в которых указано только одно численное значение. Более того, такую интерпретацию следует применять независимо от ширины интервала или описываемых характеристик.

Несмотря на то, что численные интервалы и параметры, изложенные в широком объеме изобретения являются приближениями, численные значения, изложенные в конкретных примерах, представлены настолько точно, насколько это возможно. Однако любые численные значения по своей сути содержат определенные ошибки, с необходимостью получающиеся из стандартного отклонения, обнаруженного в их соответствующих опытных измерениях.

Более того, в тех случаях, когда используют правило, аналогичное "по меньшей мере один из А, В и С", в общем, такая конструкция подразумевает смысл, в котором специалист должен понимать данное правило (например, "система, содержащая по меньшей мере один из А, В и С" должна включать, но не ограничиваться перечисленным, системы, которые содержат только А, только В, только С, А и В вместе, А и С вместе, В и С вместе и/или А, В и С вместе и т.п.). В тех случаях, когда используют правило, аналогичное "по меньшей мере один из А, В и С", в общем, такая конструкция подразумевает смысл, в котором специалист должен понимать данное правило (например, "система, содержащая по меньшей мере один из А, В и С" должна включать, но не ограничиваться перечисленным, системы, которые содержат только А, только В, только С, А и В вместе, А и С вместе, В и С вместе и/или А, В и С вместе и т.п.). Специалист также понимает, что обычно дизъюнктивное слово и/или выражение, представляющее два или более альтернативных термина, в описании ли, формуле изобретения или на чертежах нужно понимать как предполагающее возможности включения одного из терминов, любого из двух терминов или обоих терминов, если в контексте не указано другое. Например, выражение "А или В" обычно понимают как включающее возможности "А", или "В", или "А и В".

В некоторых случаях один или более компонентов можно назвать в данном документе "выполненный для", "выполняемый для", "действующий/работающий для", "приспособленный/приспособляемый", "способный к", "соответствующий/приспособленный для" и т.п. Специалисту понятно, что такие термины (например, "выполненный для" в общем могут охватывать компоненты в активном состоянии и/или компоненты в неактивном состоянии и/или компоненты в режиме ожидания, если из контекста не требуется другое.

Что касается приложенной формулы изобретения, специалисту понятно, что перечисленные в данном документе операции в общем можно выполнять в любом порядке. Также, хотя различные технологические потоки представлены последовательно, нужно понимать, что различные операции можно выполнять в другом порядке, чем указанный, или их можно выполнять параллельно. Примеры такого альтернативного порядка могут включать перекрывание, чередование, прерывание, переупорядочивание, поэтапное выполнение, приготовление, дополнение, одновременное выполнение, обратное выполнение или другие варианты порядка, если из контекста не следует другое. Более того, термины, подобные "в ответ на", "относящийся к" или другие в общем не подразумевают исключения таких вариантов, если из контекста не следует другое.

Ясно, что описанные в данном документе системы и способы хорошо приспособляются для достижения упомянутых целей и преимуществ, а также тех, которые ему присущи. Специалисту понятно, что способы и системы в этом техническом описании можно реализовать на практике множеством способов, и они как таковые не ограничены ранее изложенными примерными воплощениями и примерами. В связи с этим, любое количество признаков различных воплощений, описанных в данном документе, можно объединять в одно воплощение и возможны альтернативные воплощения, имеющие менее или более всех описанных в данном документе признаков.

Хотя в целях этого изобретения были описаны различные воплощения, можно выполнить различные изменения и модификации, которые находятся в области описанной в данном документе технологии. Например, хотя не явно указанная рамановская спектроскопия может быть одной из множества технологий, используемых для мониторинга качества топливной соли в течение работы реактора на расплавленных солях, аналогично, множественные зондирования с использованием рамановской спектроскопии можно использовать для получения понимания изменений качества топливной соли в различных положениях внутри реактора. Можно выполнить множество других изменений, которые представляются специалисту и которые включены в дух изобретения и определены в приложенной формуле изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Ядерная реакторная установка для выработки энергии из ядерной реакции, содержащая активную зону реактора, содержащую делящуюся урановую хлористую топливную соль, включающую от 1 до 50 моль.% UCl_4 , от 1 до 33 моль.% UCl_3 , от 40 до 66 моль.% $NaCl$ и имеющую температуру плавления менее $600^{\circ}C$, и

теплообменник, выполненный для переноса тепла из топливной соли к теплоносителю.

2. Ядерный реактор по п.1, в котором делящаяся урановая хлористая топливная соль представляет собой 30% UCl_3 , 10% UCl_4 , 60% $NaCl$.

3. Ядерный реактор по п.1, в котором делящаяся урановая хлористая топливная соль представляет собой 30% UCl_3 , 11% UCl_4 , 59% $NaCl$.

4. Ядерный реактор по п.1, в котором делящаяся урановая хлористая топливная соль имеет теплоемкость более 600 Дж/(кг·°C).

5. Ядерный реактор по п.1, в котором температура плавления делящейся урановой хлористой топливной соли составляет от 338 до 550°C.

6. Ядерный реактор по п.1, в котором делящаяся урановая хлористая топливная соль представляет собой смесь хлористых солей, в которой хлорид-ионы в хлористых солях имеют первое отношение ^{37}Cl к общему количеству Cl , причем первое отношение отлично от природного отношения ^{37}Cl к общему количеству Cl .

7. Ядерный реактор по п.6, в котором 25% или более хлорид-ионов в смеси хлористых солей являются ^{37}Cl .

8. Ядерный реактор по п.1, в котором делящаяся урановая хлористая топливная соль представляет собой смесь UCl_4 , UCl_3 , $NaCl$ и одного или более из UCl_3F , UCl_2F_2 , $UClF_3$, $PuCl_3$, $ThCl_4$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $BaCl_2$, KCl , $SrCl_2$, VCl_3 , $CrCl_3$, $TiCl_4$, $ZrCl_4$, $ThCl_4$, $AcCl_3$, $NpCl_4$, $AmCl_3$, $LaCl_3$, $CeCl_3$, $PrCl_3$ и/или $NdCl_3$.

9. Ядерный реактор по п.1, в котором делящаяся урановая хлористая топливная соль представляет собой смесь UCl_4 , UCl_3 , $NaCl$ и по меньшей мере одного лантанида, причем делящаяся топливная соль имеет показатель качества менее 1,0.

10. Ядерный реактор по п.1, в котором контактирующие с солью элементы реактора снабжены облицовкой из никеля или никелевого сплава.

11. Ядерный реактор по п.1, в котором мольная доля UCl_4 в делящейся урановой хлористой топливной соли составляет от 2 до 30 моль.% UCl_4 .

12. Ядерный реактор по п.1, в котором мольная доля UCl_4 в делящейся урановой хлористой топливной соли составляет от 5 до 20 моль.% UCl_4 .

13. Ядерный реактор по п.1, в котором мольная доля UCl_4 в делящейся урановой хлористой топливной соли составляет от 8 до 12 моль.% UCl_4 .

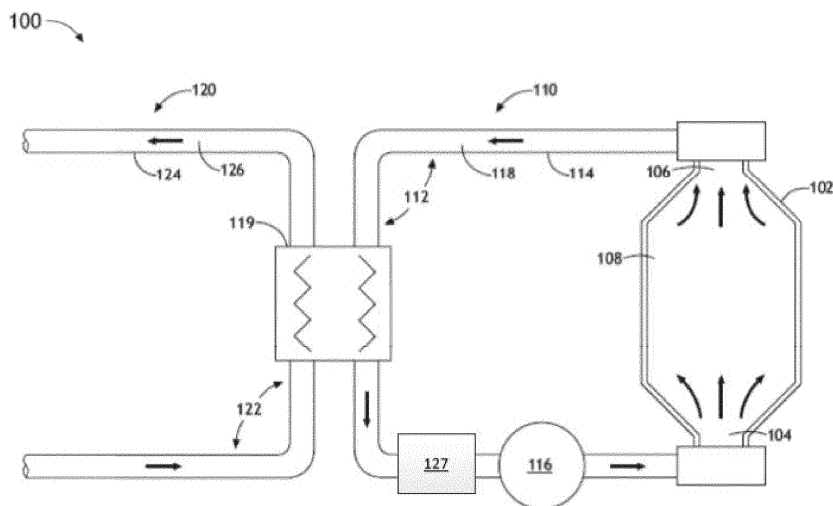
14. Делящаяся урановая топливная соль, содержащая

от 1 до 50 моль.% UCl_4 ;

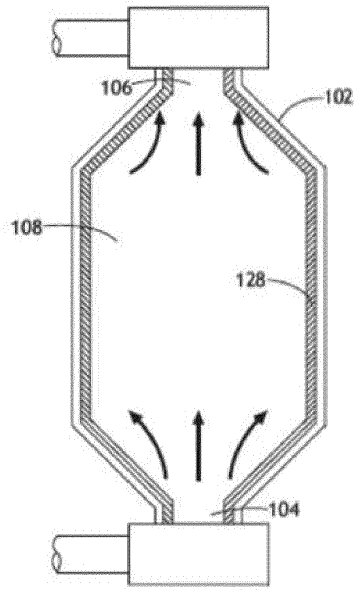
от 1 до 33 моль.% UCl_3 ;

от 40 до 66 моль.% $NaCl$; и

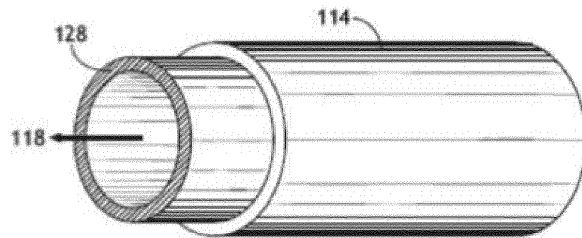
где делящаяся топливная соль имеет температуру плавления менее 600°C.



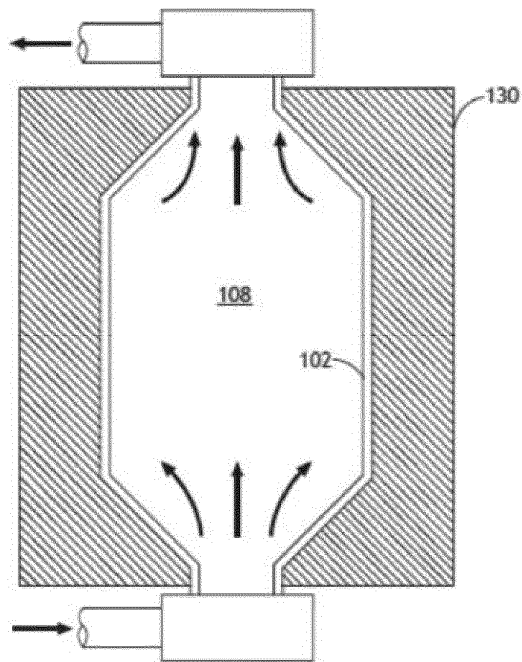
Фиг. 1А



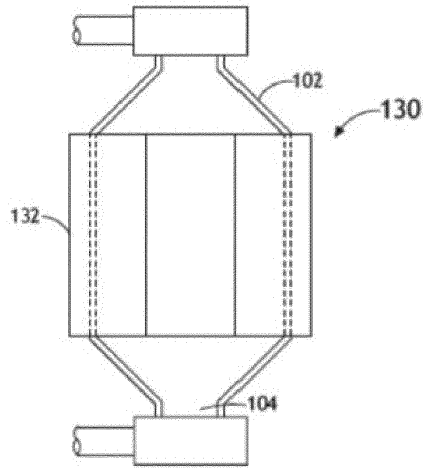
Фиг. 1B



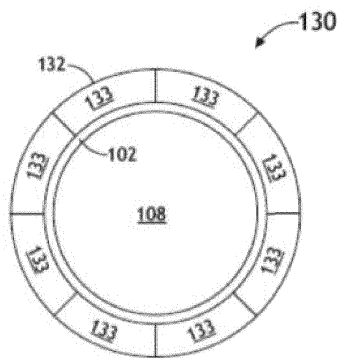
Фиг. 1C



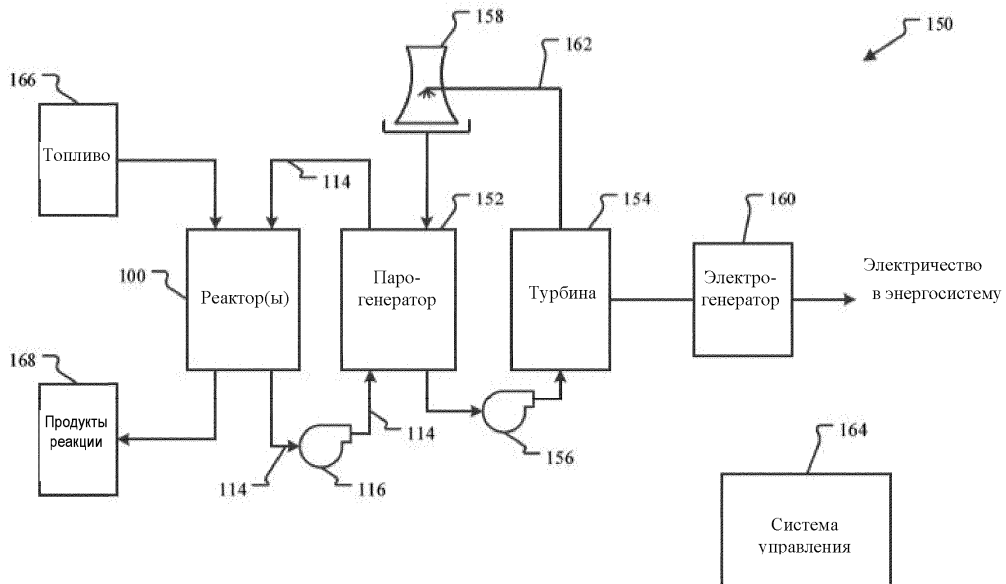
Фиг. 1D



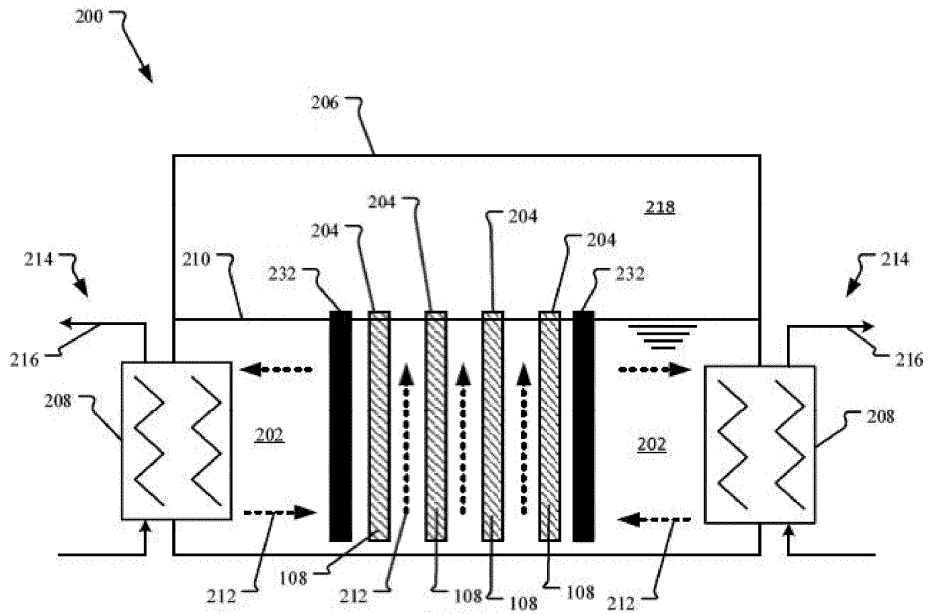
Фиг. 1Е



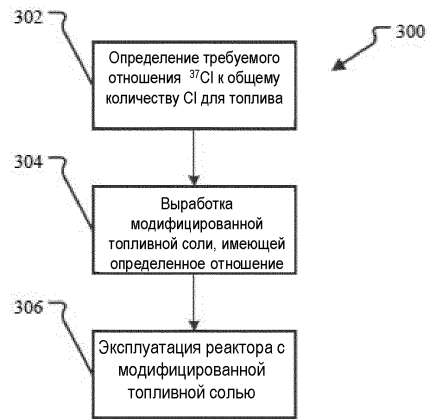
Фиг. 1F



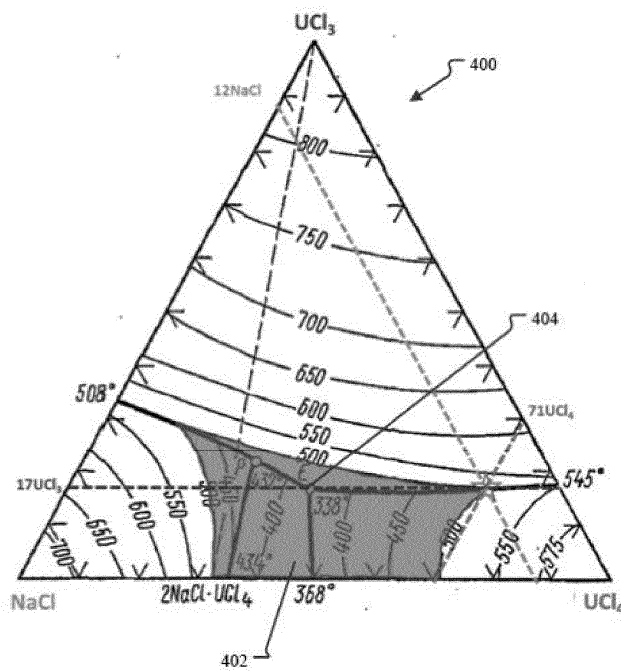
Фиг. 1G



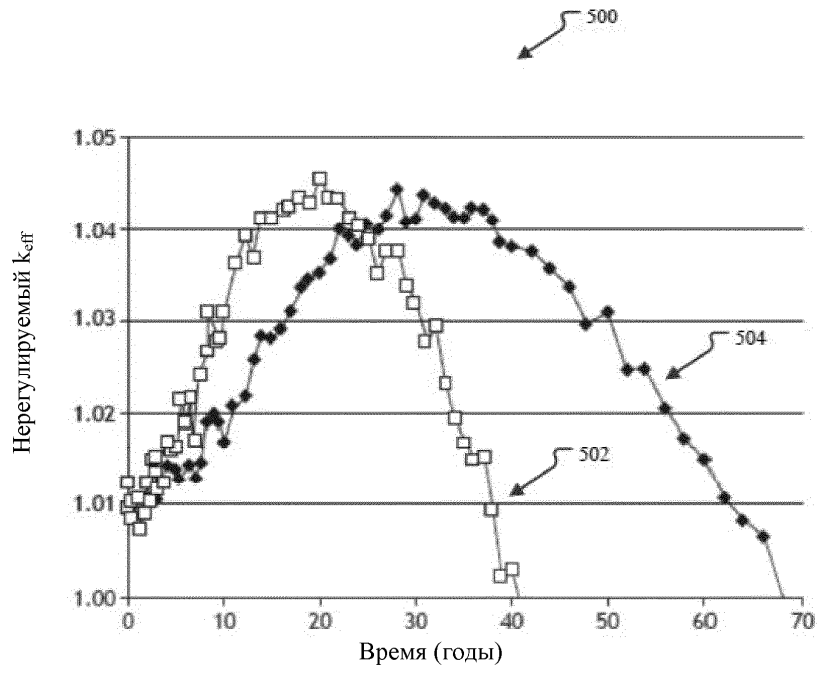
Фиг. 2



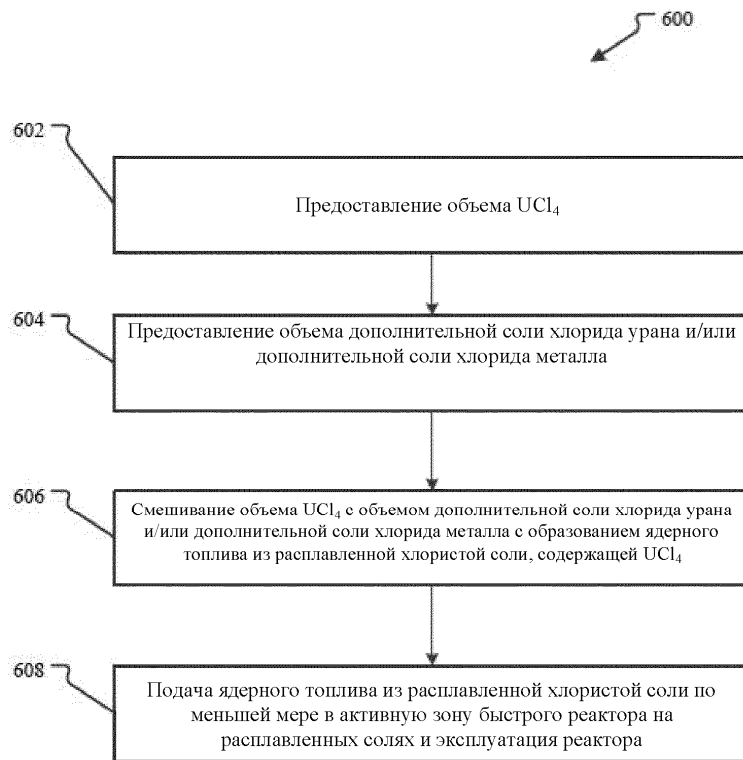
Фиг. 3



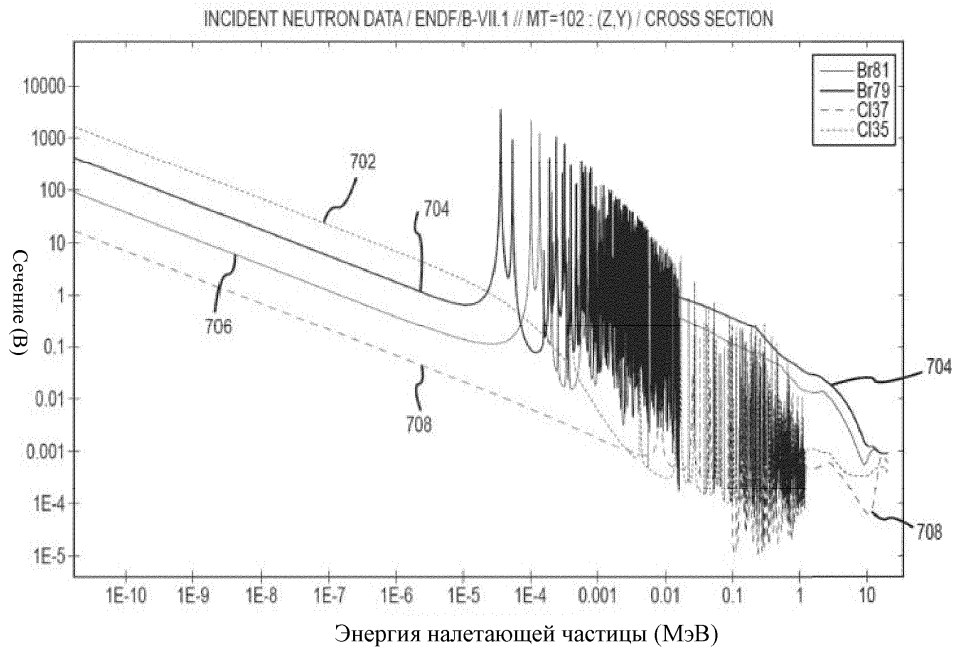
Фиг. 4



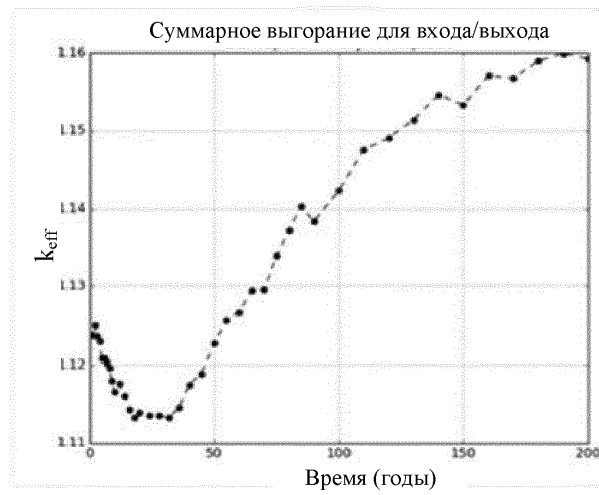
Фиг. 5



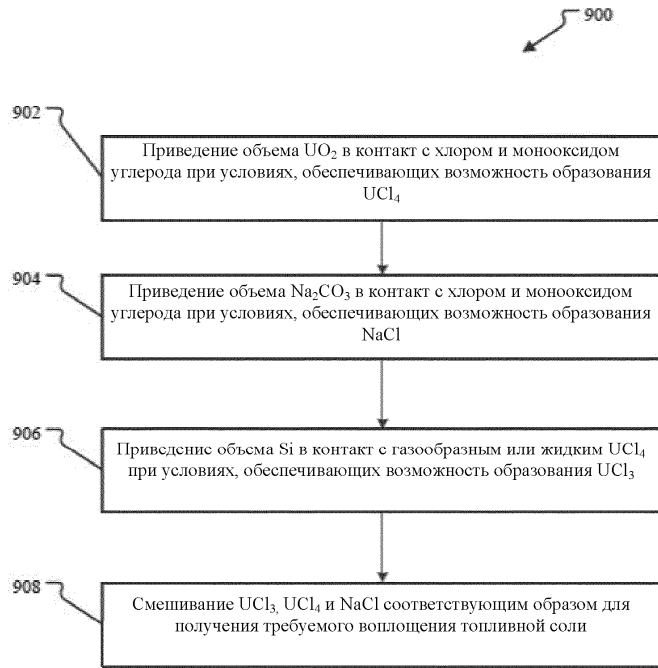
Фиг. 6



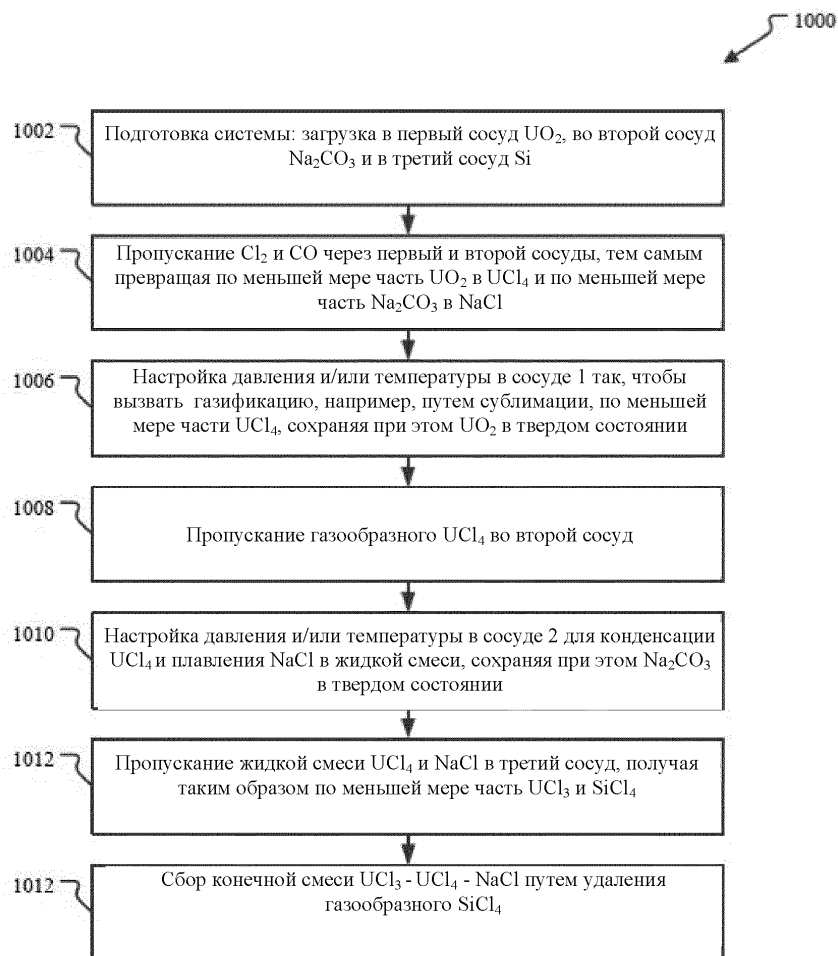
Фиг. 7



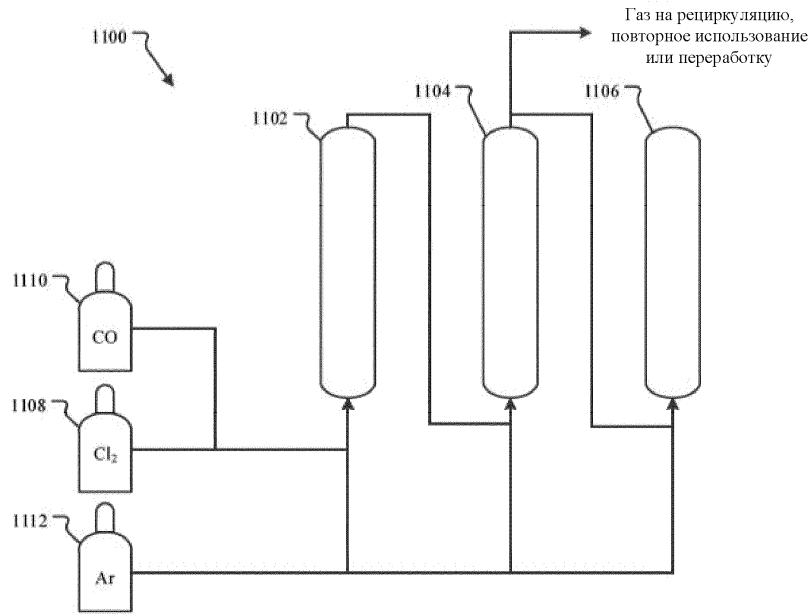
Фиг. 8



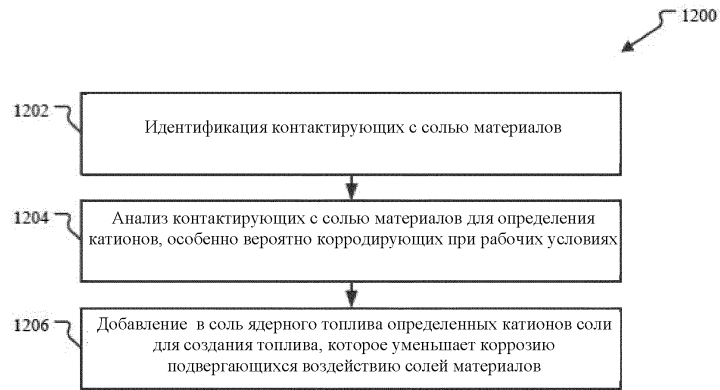
Фиг. 9



Фиг. 10



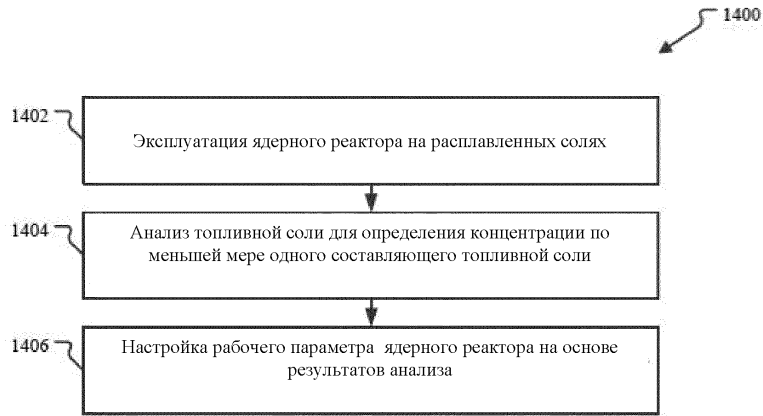
Фиг. 11



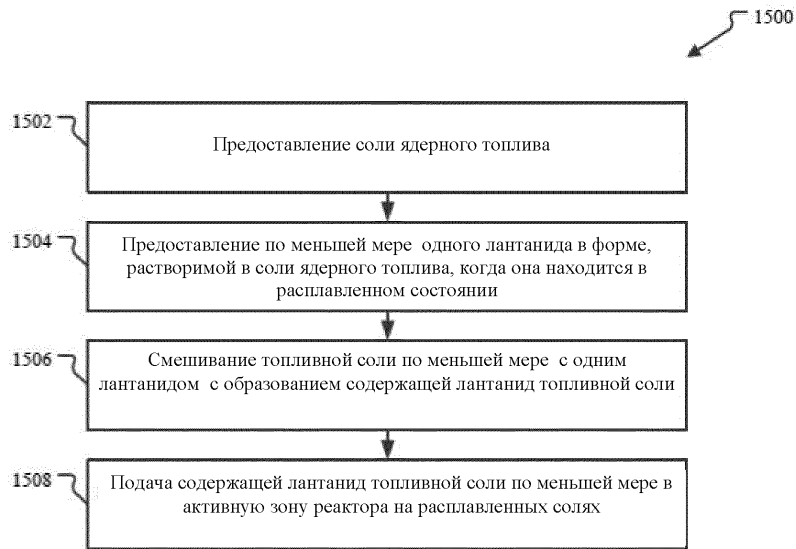
Фиг. 12

Сплав	Элементный состав, %	
	Основные компоненты, %	Второстепенные компоненты, %
Mo-La	Mo	La
MoRe	Mo-5Re	La
304 SS, LN	Fe - 19Cr - 10Ni - 2Mn	C, N, P, Si
316 SS, LN	Fe - 17Cr - 12Ni - 2.5Mo	C, Mn, P, Si
Nickel 200	Ni	C, Cu, Fe, Mn, Si
Inconel 617	44.5Ni - 22Cr - 12.5Co - 9Mo	Al, C, Fe, Mn, Si, Ti
Incoloy 740H	51Ni - 24.5Cr - 20Co	Al, Nb, Ti
Incoloy 800H	32.5Ni - 21Cr - 39.5Fe	Al, C, Ti

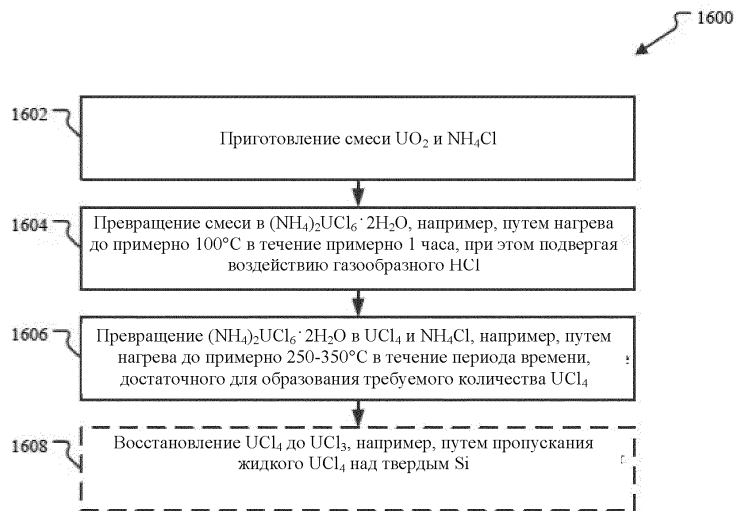
Фиг. 13



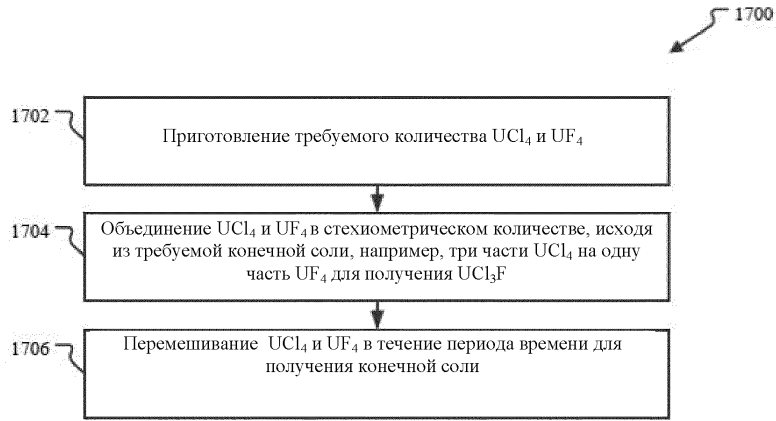
Фиг. 14



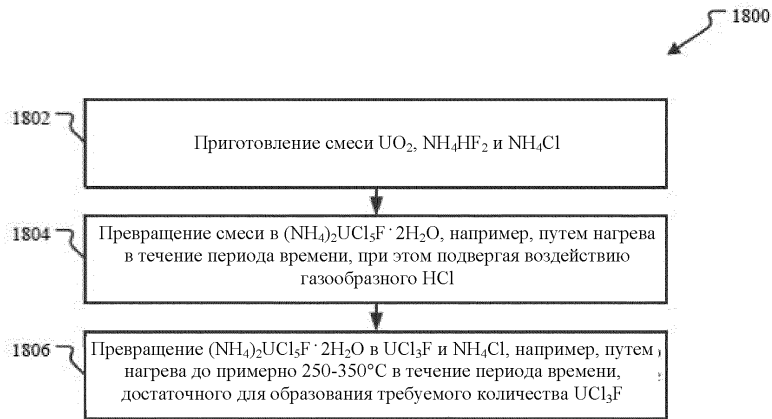
Фиг. 15



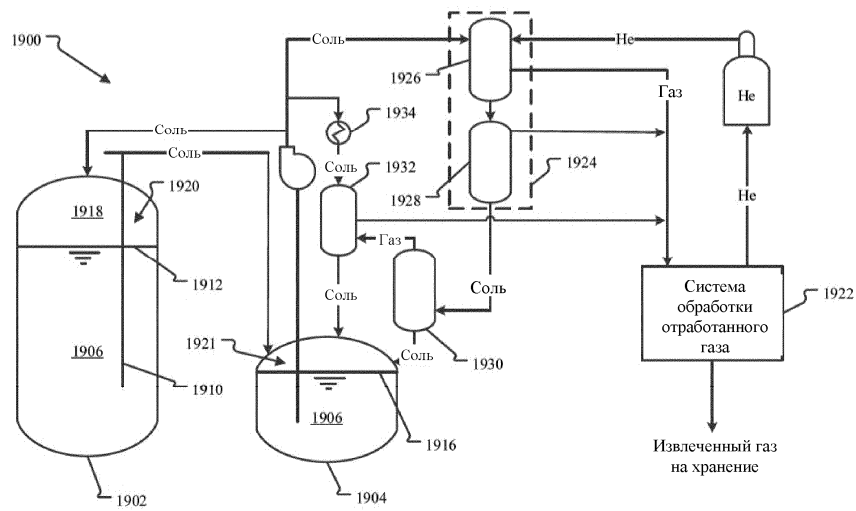
Фиг. 16



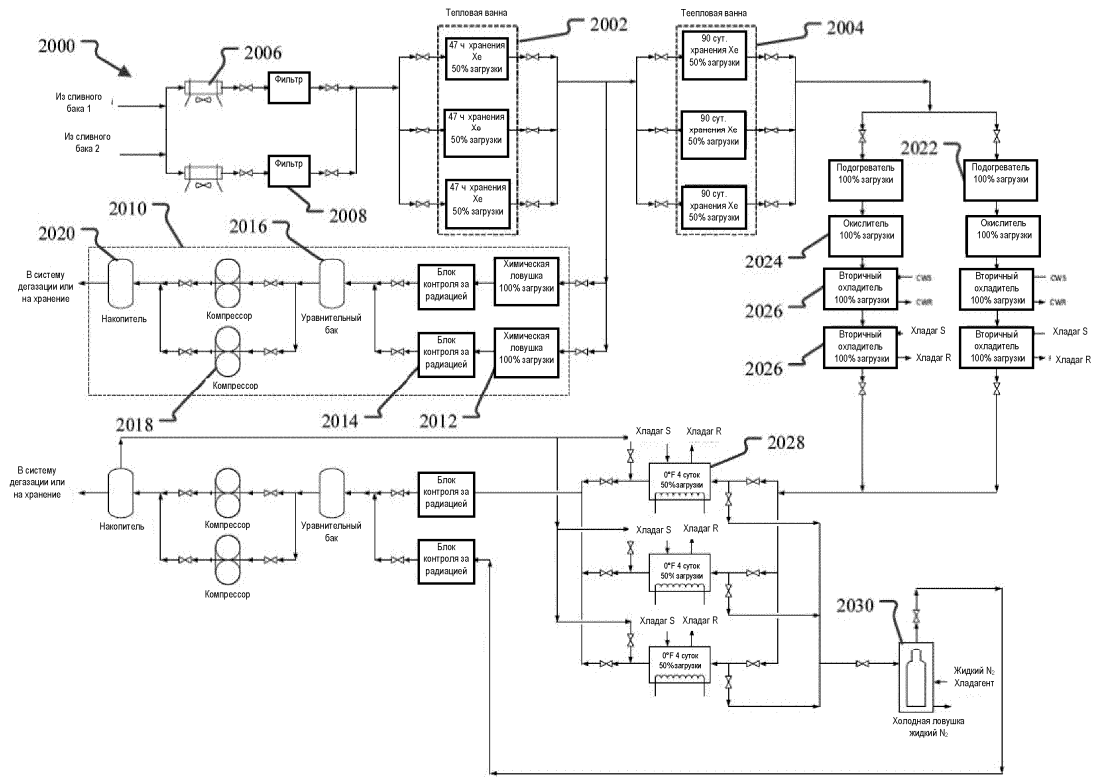
Фиг. 17



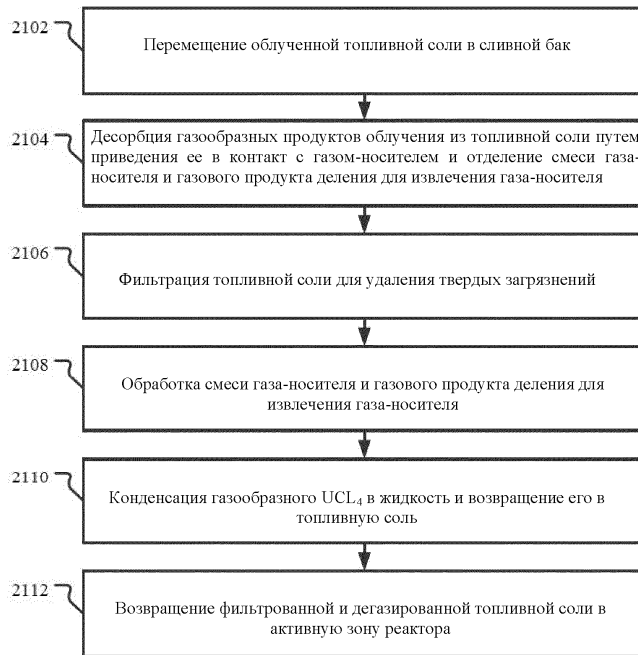
Фиг. 18



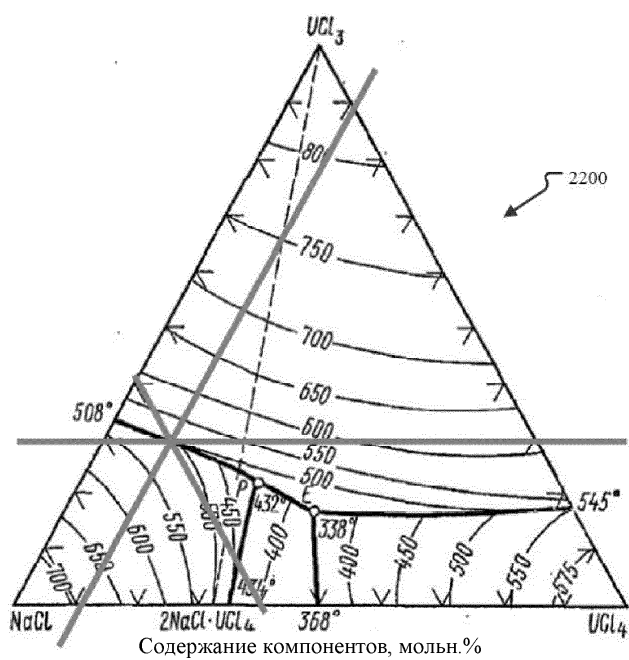
Фиг. 19



Фиг. 20



Фиг. 21



Фиг. 22



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2