(19) Евразийское патентное ведомство

(11) 041650 (13) B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.11.18

(21) Номер заявки
202090232

(22) Дата подачи заявки
2018.07.19

(51) Int. Cl. ***G21C 3/20*** (2006.01)
G21C 21/02 (2006.01)

(54) СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СТОЙКОГО К ХИМИЧЕСКОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ МЕЖДУ ТОПЛИВОМ И ОБОЛОЧКОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

(31) **62/534,561**
(32) **2017.07.19**
(33) **US**
(43) **2020.06.29**
(86) **PCT/US2018/042886**
(87) **WO 2019/018643 2019.01.24**

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

(72) Изобретатель:
Хакетт Мика Дж., Хелмрейк Грант, Лэтта Райан Н., Повирк Гари, Склосс Филип М., Воллмер Джеймс М. (US)

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

(56) US-A-3184393
KR-A-20090085284

(57) В данном изобретении предложены стойкие к химическому взаимодействию между топливом и оболочкой (ХВТО) тепловыделяющие элементы ядерного реактора и способы их получения. Тепловыделяющие элементы ядерного реактора включают два или более слоя из различных материалов (т.е. смежные барьеры состоят из различных базовых материалов), нанесенных на стальную оболочку для уменьшения влияния ХВТО между оболочкой и ядерным материалом. В зависимости от воплощения слой может быть конструкционным элементом (т.е. слоем, достаточно толстым для обеспечения более 50% прочности всего компонента, состоящего из оболочки и барьеров) или может быть более подходящим образом описан как облицовка или покрытие, которое каким-либо образом наносят на поверхность конструкционного элемента (например, на оболочку или на топливо в форме конструкционного элемента).

041650 B1

041650 B1

Область техники

При использовании в ядерных реакторах ядерное топливо обычно помещают в оболочку. Оболочка может быть выполнена таким образом, чтобы содержать топливо, предотвращать взаимодействие топлива с внешней средой и/или предотвращать загрязнение теплоносителя продуктами деления. Например, некоторые виды ядерного топлива вступают в химическую реакцию с теплоносителями или другими материалами, которые так или иначе могут контактировать с ядерным топливом без оболочки, действующей как сепаратор.

Оболочка может иметь форму трубки, сферы или удлиненного призматического сосуда, внутри которого содержится топливо. В любом случае, сочетания топлива и оболочки часто называют "тепловыделяющим элементом", "тепловыделяющим стержнем" или "тепловыделяющим прутком".

Химическое взаимодействие между топливом и оболочкой (ХВТО) в металлических топливных системах означает химические реакции между ядерным топливом и компонентами оболочки вследствие внутренней диффузии одного или более компонентов. При более глубоком выгорании (>20%) внутренняя диффузия топлива и продуктов деления в оболочку (или к ней) или диффузия элементов сплава оболочки в топливо может привести к снижению прочности системы оболочка-топливо по одному из ряда механизмов, таких как химическое взаимодействие, охрупчивание, потеря прочности, образование нежелательных сплавов и т.д. Более конкретно, компоненты оболочки (железо и никель) могут мигрировать в топливо, образуя легкоплавкие интерметаллические соединения, как с ураном, так и с плутонием, в то время как продукты деления лантаноидов (неодим, церий и т.д.) мигрируют наружу в оболочку, образуя хрупкие интерметаллические соединения, которые также склонны к эвтектическим реакциям.

В данном описании раскрыты стойкие к химическому взаимодействию между топливом и оболочкой (ХВТО) тепловыделяющие элементы ядерного реактора и способы их получения. Тепловыделяющие элементы ядерного реактора включают два или более слоев из разных материалов (т.е. смежные барьеры состоят из разных основных материалов), нанесенных на стальную оболочку для уменьшения влияния ХВТО между оболочкой и ядерным материалом. В зависимости от воплощения, слой может быть структурным элементом (т.е. слоем, достаточно толстым для обеспечения более 50% прочности всего компонента, состоящего из оболочки и барьеров) или может быть более подходящим образом описан как облицовка или покрытие, которое каким-либо образом наносят на поверхность конструкционного элемента (например, на оболочку или на топливо в форме конструкционного элемента).

Краткое описание чертежей

На прилагаемых чертежах, которые являются частью данной заявки, проиллюстрирована описанная технология, и они не предназначены для ограничения объема заявленного изобретения, который определен формулой изобретения, прилагаемой к настоящему документу.

На фиг. 1 представлен линейный участок оболочки, снабженной двойным барьером против химического взаимодействия между топливом и оболочкой (ХВТО), или снабженная барьером оболочка (СБО).

На фиг. 2 представлено поперечное сечение воплощения СБО, представленной на фиг. 1, в виде трубки.

На фиг. 3 представлена СБО, показанная на фиг. 1, в контакте с ядерным материалом, таким как ядерное топливо.

На фиг. 4 представлено поперечное сечение трубчатого элемента, показанного на фиг. 2, с ядерным материалом, содержащимся внутри трубчатой оболочки, снабженной двойным барьером.

На фиг. 5 представлено воплощение способа выбора материалов барьерного слоя для стойкой к ХОВТ СБО и тепловыделяющего элемента.

На фиг. 6 укрупненно представлено воплощение способа получения стойкого к ХВТО тепловыделяющего элемента.

На фиг. 7 представлен вид в разрезе линейного участка оболочки, снабженной тройным ХВТО барьером.

На фиг. 8 представлено поперечное сечение воплощения тройной СБО, показанной на фиг. 7, в виде трубки.

На фиг. 9 представлена тройная СБО, показанная на фиг. 7, в контакте с ядерным материалом, таким как ядерное топливо.

На фиг. 10 представлено поперечное сечение воплощения тройной СБО в виде трубки, показанной на фиг. 8, с ядерным материалом, содержащимся внутри трубчатой оболочки, снабженной тройным барьером.

На фиг. 11a представлено неполное изображение ядерной тепловыделяющей сборки, в которой используют один или более указанных выше тепловыделяющих элементов.

На фиг. 11b представлено неполное изображение тепловыделяющего элемента в соответствии с одним воплощением.

Описание изобретения

Перед подробным описанием стойких к ХВТО тепловыделяющих элементов ядерного реактора, следует отметить, что данное описание не ограничено конкретными конструкциями, стадиями способа или материалами, раскрытыми в данном документе, а распространяется на их эквиваленты, как это будет

очевидно специалистам в данной области техники. Следует также отметить, что терминологию, используемую в настоящем документе, применяют только с целью описания конкретных воплощений, и она не является ограничением. Следует отметить, что в данном описании форма единственного числа включает множественное, если в контексте ясно не указано иное. Таким образом, например, ссылку на "гидроксид лития" не нужно рассматривать как количественное ограничение или ограничение источника, ссылка на "стадию" в единственном числе, может включать множество стадий, ссылку на "получение" или "продукты" реакции не следует рассматривать как все продукты реакции и ссылка на "осуществление реакции" может включать ссылку на одну или более стадии такой реакции. Таким образом, стадия осуществления реакции может включать многократные или повторяющиеся реакции подобных материалов с получением идентичных продуктов реакции.

В данном описании раскрыты стойкие к ХВТО тепловыделяющие элементы ядерного реактора и способы их получения. В воплощениях, описанных далее, тепловыделяющие элементы ядерного реактора включают два или более слоев из разных материалов (т.е. соседние барьеры выполнены из разных основных материалов), предусмотренных на стальной оболочке для снижения эффектов ХВТО между оболочкой и ядерным материалом. В зависимости от воплощения, слой может быть структурным элементом (т.е. слоем, имеющим достаточную толщину для обеспечения более 50% прочности всего компонента, состоящего из оболочки и барьеров) или может быть более подходящим образом описан как облицовка или покрытие, которое каким-либо образом наносят на поверхность структурного компонента (например, на оболочку или на топливо в форме конструкционного элемента). Слои далее называют "ХВТО барьерами" или просто "барьерами", чтобы подчеркнуть их функцию предотвращения или сокращения ХВТО. Сочетание оболочки и ХВТО барьеров далее называют оболочкой (СБО), снабженной ХВТО барьером. Сочетание СБО и любого ядерного материала, содержащегося в СБО, далее называют тепловыделяющим элементом.

В определенных конфигурациях топлива и оболочки, таких как стальная оболочка с урановым ядерным топливом, можно использовать множество ХВТО барьеров, причем каждую границу раздела между барьерами выбирают таким образом, чтобы минимизировать любое одно или более из указанных выше взаимодействий. Кроме того, барьеры могут быть выбраны так, что взаимодействие между границами раздела барьеров сводится к минимуму или подавляется. В некоторых случаях барьер может состоять из сплава с одним или более составляющими химическими элементами, которые препятствуют взаимодействию топлива и оболочки. В других воплощениях сплавы могут быть получены таким образом, что концентрации компонентов их составляющих подобраны таким образом, чтобы преимущественно препятствовать взаимодействиям топлива и оболочки.

Однако определенные сочетания материалов могут не подходить для глубокого выгорания топлива. Например, некоторые материалы барьеров могут обезуглероживать сталь при воздействии высоких температур в течение длительного периода времени. Другие материалы барьеров хорошо работают со сталью, но могут диффундировать в такие виды топлива, как уран. В данном изобретении описаны СБО и способы выбора материала, которые позволяют создать барьер со стороны топлива, стойкий к воздействию топлива и окруженный вторым барьером, стойким к оболочке. Барьеры также являются стойкими относительно друг друга при облучении. Раскрытые конфигурации множества ХВТО барьеров уменьшают вредные влияния на оболочку.

Для целей настоящего описания, для сравнения, характеристику ХВТО определяют путем размещения двух материалов в контакте (прикрепленными друг к другу, как обсуждается далее) и выдержки при температуре 650°C в течение 2 месяцев в инертной атмосфере. Затем материалы осматривают, например, с помощью сканирующего электронного микроскопа, определяя расстояние внутренней диффузии одного или более интересующих химических элементов (например, урана, хрома и т.д.) в различные материалы. Например, слой ванадия можно соединить со слоем урана и выдерживать при температуре 650°C в течение 2 месяцев, а затем осмотреть, чтобы определить, насколько глубоко уран диффундировал в ванадий. Многие из описанных здесь материалов представляют собой сплавы, содержащие множество элементов в различных концентрациях. При обсуждении ниже, если не указано иное, когда говорят, что материал барьера или оболочки обладает лучшей характеристикой ХВТО или лучшим расстоянием внутренней диффузии, чем второй материал по отношению к третьему материалу, это означает, что расстояние внутренней диффузии основного элемента (элемента, который имеет самое высокое массовое процентное содержание в сплаве) первого материала меньше, чем расстояние внутренней диффузии основного элемента второго материала в третьем материале. Например, вышеуказанным способом было определено, что ZrN имеет лучшую характеристику ХВТО, чем ванадий по отношению к стали HT9, т.е. наблюдали, что ZrN диффундировал на меньшее расстояние в HT9, чем ванадий, диффундировавший в HT9, после выдержки в контакте в течение 2 месяцев при температуре 650°C. Таким образом, как описано ниже, ZrN является хорошим материалом барьера для использования между слоями ванадия и HT9, особенно если HT9 является основным конструкционным слоем, а ZrN и ванадий являются тонкими покрытиями.

Механическое соединение оболочки, барьеров и топливной системы снижает термическое сопротивление между топливом и оболочкой. Это позволяет исключить традиционные связующие материалы,

такие как жидкий натрий. Если не указано иное, описанные в данном документе конкретные воплощения не содержат связующих материалов, например жидкого натрия между слоями. В альтернативном воплощении может быть сформирована металлургическая связь между слоями СБО, или тепловыделяющий элемент может быть сформирован, например, путем прессования (например, горячего изостатического прессования), чтобы уменьшить термическое сопротивление между топливом и оболочкой.

В последующем обсуждении приходят к выводам, что соседние слои оболочки могут быть соединены механической связью, металлургической связью или диффузионной связью и в них не используют традиционный связующий материал. Механически связанные слои относят к слоям, в которых сопряженные поверхности находятся в физическом контакте. Детали, соединенные посадкой с натягом, являются примером механически соединенных слоев. В то время как механически связанные слои могут иметь пустоты и могут не находиться в идеальном контакте по всей поверхности контакта, непосредственная близость и физический контакт обеспечивают хорошую передачу тепловой энергии между слоями. Это можно использовать для того, чтобы устранить необходимость в материале определенного сорта для теплопередачи между слоями. Металлургически связанные слои дополнительно каким-либо образом обработаны для создания физической границы раздела между атомами на поверхности двух слоев, которая полностью или в значительной степени не содержит пустот, что приводит к дискретной границе раздела между слоями. Металлургические связи лучше передают тепловую энергию, чем механические связи, благодаря лучшему контакту, но все же сохраняют дискретную границу раздела, в которой по существу отсутствует внутренняя диффузия материала между слоями. Границы раздела, полученные горячим изостатическим прессованием или осаждением из паровой фазы, являются примерами слоев, соединенных металлургической связью. Наконец, слои могут быть диффузионно-связанными, при этом материалы двух слоев намеренно перемешивают для создания зоны диффузии на границе раздела. При диффузионном связывании нет четкой границы раздела между двумя слоями, а есть зона, в которой материал постепенно переходит из материала одного слоя в материал другого слоя. Диффузионная связь изменяет свойства материала в зоне диффузии, в то время как механические и металлургические связи, с другой стороны, не оказывают существенного влияния на свойства обоих слоев и сохраняют дискретную границу раздела между двумя слоями.

На фиг. 1 представлен вид в разрезе линейного участка или "элемента стенки" СБО, содержащей двухслойный или двойной ХВТО барьер. СБО 100 может быть частью любого оборудования, корпуса реактора или компонента, который отделяет ядерное топливо от внешней среды. Например, СБО 100 может быть частью стенки трубы, прямоугольной призмы, куба или любой другой формы корпуса реактора или контейнера для хранения ядерного топлива. В альтернативном воплощении вместо части стенки контейнера СБО может представлять собой готовые слои на поверхности твердого ядерного топлива, полученные каким-либо осаждением или по другой технологии получения, как описано далее. Если СБО содержит ядерный материал, СБО и ядерный материал вместе называют тепловыделяющим элементом.

Независимо от применяемой технологии получения, СБО 100, представленная на фиг. 1, состоит из двух ХВТО барьеров 102, 104 из различных основных материалов и оболочки 106. Каждый из слоев СБО механически или металлургически соединен со своим соседним слоем (слоями) по границе раздела с этим слоем. Например, в трубчатом воплощении, таком как на фиг. 2, слои СБО механически или металлургически соединены между собой по границе раздела между слоями. Первый ХВТО барьер 102 называют барьером со стороны топлива. Барьер 102 со стороны топлива отделяет топливо или зону хранения, в которой размещают топливо, если топливо еще не используют, от второго ХВТО барьера 104. Второй ХВТО барьер 104, называемый барьером со стороны оболочки, расположен между барьером 102 со стороны топлива и оболочкой 106. Таким образом, барьер 102 со стороны топлива представляет собой слой материала с одной поверхностью, обращенной к топливу, и другой поверхностью, обращенной к барьеру 104 со стороны оболочки, при этом барьер 104 со стороны оболочки содержит поверхность, обращенную к барьеру со стороны топлива, и поверхность, соединенную с оболочкой 106.

Оболочка 106 находится в контакте с внешней средой по одной поверхности и барьером 104 со стороны оболочки по противоположной поверхности. Таким образом, оболочка 106 отделяет двойной ХВТО барьер от внешней среды.

В одном воплощении оболочка 106 является конструкционным элементом СБО. Т.е. она обеспечивает прочность и жесткость для сохранения формы тепловыделяющего элемента при эксплуатации. В данном воплощении барьеры 102, 104 могут иметь любую толщину, походящую для предотвращения ХВТО. Толщина барьеров 102, 104 может быть, а может и не быть достаточной для придания большей части или какой-либо части механической поддержки конструкционной целостности СБО. В одном воплощении может быть установлена минимальная толщина барьера со стороны топлива 8 мкм. В некоторых случаях барьеры 102, 104 могут быть тонкими (например, толщиной менее 50 мкм) и приравнены к покрытию. В альтернативных воплощениях один или оба барьера 102, 104 могут быть толще (толщиной 50 мкм или более) и их рассматривают как облицовку. В различных воплощениях каждый из барьеров 102, 104, независимо, может иметь толщину от 1,0; 2,0; 2,5; 3,0 или 5,0 мкм по нижнему пределу интервала толщины и вплоть до 3,0; 5,0; 7,5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 75; 100 или даже 150 мкм в качестве верхнего предела интервала толщины.

СБО 100, представленная на фиг. 1, содержит барьер 102 со стороны топлива из материала, выбранного для снижения влияний ХВТО как на свойства оболочки 106, так и на свойства хранящегося топлива, а также выбранного для снижения влияния вредных химических взаимодействий между двумя барьерами 102, 104.

Как описано ниже, материалы, используемые для барьера со стороны оболочки и барьера со стороны топлива, выбирают на основе их совместимости с материалом оболочки и ядерным материалом, соответственно. При этом, потенциально подходящие материалы барьера со стороны оболочки включают тугоплавкие металлы (например, Nb, Mo, Ta, W или Re и их сплавы) или металлы с подобными свойствами (например, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe или Ni и их сплавы), или тугоплавкую керамику (TiN, ZrN, VN, TiC, ZrC, VC). Потенциально подходящие материалы барьера со стороны топлива также включают тугоплавкие металлы (например, Nb, Mo, Ta, W или Re и их сплавы) или металлы с подобными свойствами (например, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc или Ni и их сплавы), или тугоплавкую керамику (TiN, ZrN, VN, TiC, ZrC, VC). Хотя представлены одинаковые перечни для материалов-кандидатов для каждого слоя барьера, в одном воплощении во всех реализациях используют различные основные материалы для соответствующих слоев барьеров. Под "основным материалом" или "основным химическим элементом" подразумевают химический элемент, содержащийся в наибольшем массовом количестве в материале. Например, для сплава, который содержит более 50% одного химического элемента, основным материалом является химический элемент, который составляет более 50 мас.% сплава. Для элементарных материалов, таких как V, Zr, Mo и т.д., основным материалом является этот химический элемент.

СБО 100, представленная на фиг. 1, содержит барьер 104 со стороны оболочки из материала, содержащего в качестве основного материал, отличный от материала барьера со стороны топлива (например, барьер со стороны оболочки может представлять собой сплав Ti, а барьер со стороны топлива может представлять собой любой материал, который, не является главным образом Ti, такой сплав Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, TiN, ZrN, VN, TiC, ZrC, VC или Ni). Опять же, материал барьера со стороны оболочки выбирают для снижения влияния ХВТО на свойства оболочки 106 и хранящегося ядерного материала, а также выбирают для снижения влияния вредных химических взаимодействий между двумя барьерами 102, 104.

В одном воплощении, при исходном предположении, что двухслойный ХВТО барьер необходим для удовлетворения требований совместимости как топлива, так и оболочки, два различных способа получения могут наилучшим образом подходить для создания отдельных ХВТО барьеров. Применение различных способов получения различных слоев барьеров имеет дополнительные преимущества в снижении вероятности отказа системы из-за отказа одного элемента, поскольку вероятность совмещения дефектов обоих слоев, которые получают/наносят различными способами, должна быть чрезвычайно мала. Из-за подвижной и агрессивной природы продуктов деления лантаноидов это наличие альтернативных возможностей особенно привлекательно, поскольку любые дефекты в ХВТО барьерах в высокотемпературных (температура внутренней оболочки >550°C) областях тепловыделяющих элементов, как ожидают, приведут к точкам отказа в металлических топливных системах со стальной оболочкой.

Оболочка 106 может быть выполнена из любой походящей стали или известного материала оболочки. Примеры подходящих сталей включают мартенситную сталь, ферритную сталь, аустенитную сталь, нержавеющие стали, включая алюминийсодержащие нержавеющие стали, высококачественные стали, такие как сплавы FeCrAl, HT9, дисперсионная упрочненная оксидами сталь, сталь T91, сталь T92, сталь HT9, сталь 316, сталь 304, APMT (Fe-22 мас.% Cr-5,8 мас.% Al) и сплав 33 (смесь железа, хрома и никеля, номинально 32 мас.% Fe-33 мас.% Cr-31 мас.% Ni). Сталь может иметь любой тип микроструктуры. Например, в одном воплощении по существу вся сталь в оболочке 106 содержит по меньшей мере одну фазу, выбранную из фазы отпущенного мартенсита, ферритной фазы и аустенитной фазы. В одном воплощении сталь представляет собой сталь HT9 или модифицированную сталь HT9.

В качестве альтернативы, оболочка 106 может быть изготовлена из материала или сплава, отличного стали, такого как молибден или сплав молибдена, цирконий или сплав циркония (например, любой из сплавов ZIRCALOY™, таких как Zircaloy-2 and Zircaloy-4), ниобий или сплав ниобия, сплавы цирконий-ниобия (например, M5 и ZIRLO), никель или сплав никеля (например, HASTELLOY™ N).

В одном воплощении модифицированная сталь HT9 содержит 9,0-12,0 мас.% Cr; 0,001-2,5 мас.% W; 0,001-2,0 мас.% Mo; 0,001-0,5 мас.% Si; вплоть до 0,5 мас.% Ti; вплоть до 0,5 мас.% Zr; вплоть до 0,5 мас.% V; вплоть до 0,5 мас.% Nb; вплоть до 0,3 мас.% Ta; вплоть до 0,1 мас.% N; вплоть до 0,3 мас.% C; и вплоть до 0,01 мас.% B; причем остальное составляет Fe и другие химические элементы, при этом сталь содержит не более 0,15 мас.% каждого из этих других элементов, и общее количество этих других элементов не превышает 0,35 мас.%. В других воплощениях сталь может иметь более узкий диапазон содержания Si от 0,1 до 0,3 мас.%. Сталь стального слоя 104 может включать одну или более карбидных фаз Ti, Zr, V, Nb, Ta или B, нитридных фаз Ti, Zr, V, Nb или Ta и/или карбонитридных фаз Ti, Zr, V, Nb или Ta.

В одном воплощении слои 102, 104, 106 завершенной СБО прикреплены без зазора или пространства между ними. Как более подробно описано далее, это является результатом либо механического спосо-

ба присоединения (например, пилигримовая прокатка или установка по прессовой посадке) или способа осаждения.

На фиг. 2 представлено воплощение СБО, показанной на фиг. 1, в виде трубки. В представленном воплощении элемент 200 стенки выполнен в форме трубки с внутренней поверхностью и внешней поверхностью, при этом барьер 202 со стороны топлива образует внутреннюю поверхность трубки, а оболочка 206 из стали образует внешнюю поверхность трубки. Между барьером 202 со стороны топлива и оболочкой 206 расположен барьер 204 со стороны оболочки. Область хранения топлива находится в центральной области трубки. Топливо, когда его размещают внутри трубки, защищено от реакционноспособной внешней среды, в то же время оболочка 206 отделена от топлива.

Общий термин "элемент стенки" используют в данном документе для понимания того, что трубка, призма или другая форма контейнера может иметь множество различных стенок или секций стенки, не все из которых являются СБО. Воплощения тепловыделяющих элементов включают такие, которые содержат один или более элементов стенки, которые выполнены из материалов, не являющихся СБО 100, как показано на фиг. 1, а также элементы стенки из СБО 100. Например, трубка может содержать цилиндрический элемент стенки из СБО 100, описанный на фиг. 2, но иметь концевые заглушки другой конструкции. Аналогично, конструкция многоугольного сечения, например прямоугольный (коробчатый) или шестиугольный призматический топливный контейнер, может иметь боковые стенки и нижнюю стенку, выполненную так, как показано на фиг. 1, но иметь верхнюю часть другой конструкции.

На фиг. 3 показан элемент стенки, представленный на фиг. 1, но на этот раз в качестве тепловыделяющего элемента 300 с ядерным материалом 310, включающим, но не ограниченным этим, ядерное топливо, контактирующее с барьером 302 со стороны топлива. Барьер 302 со стороны топлива отделен от оболочки 306 барьером 304 со стороны оболочки. Барьеры 302, 304, опять же, могут быть любой толщины, от тонкого покрытия, как определено выше, вплоть до 50% от толщины основного конструкционного элемента, оболочки 306.

В альтернативном воплощении, не показано, основным конструкционным элементом является один из барьеров (либо барьер 304 со стороны оболочки, либо барьер 302 со стороны топлива). В данном воплощении оболочка может представлять собой тонкий слой из стали.

Опять же, каждый из слоев СБО (т.е. оболочка 306, барьер 304 со стороны оболочки и барьер 302 со стороны топлива) механически или металлургически соединен со своим соседним слоем (слоями) по границе раздела с этим слоем. Например, в трубчатом воплощении, таком как показанный на фиг. 4, слои из СБО механически или металлургически соединены между собой по периметру границы раздела между слоями. В зависимости от воплощения, ядерный материал 310 может быть, а может и не быть механически или металлургически соединен с барьером 302 со стороны топлива, как описано более подробно далее.

На фиг. 4 аналогичным образом показано воплощение СБО, показанной на фиг. 2, в виде трубки, но на этот раз в качестве тепловыделяющего элемента 400, содержащего ядерный материал 410, включающий, но не ограниченный этим, ядерное топливо. Ядерный материал 410 расположен в полом центре СБО, в контакте с барьером 402 со стороны топлива. Барьер 402 со стороны топлива отделен от оболочки 406 барьером 404 со стороны оболочки. Барьеры 402, 404 опять же могут иметь любую толщину от тонкого покрытия, как указано выше, вплоть до 50% от толщины основного конструкционного элемента, оболочки 406.

Ядерный материал 410 может быть сплошным, как показано, или может быть материалом, выполненным в виде кольца, так что готовый тепловыделяющий элемент является полым в центре. В другом воплощении, тепловыделяющий элемент может иметь дольчатую форму или любое другое поперечное сечение, чтобы обеспечить пространство в центре тепловыделяющего элемента для расширения ядерного материала 410.

Для целей настоящей заявки ядерный материал включает любой материал, содержащий актинид, независимо от того, может ли он быть использован в качестве ядерного топлива. Таким образом, любое ядерное топливо является ядерным материалом, но в более широком смысле любые материалы, содержащие следы или большее количество U, Th, Am, Np, и/или Pu являются ядерными материалами. Другие примеры ядерных материалов включают отработанное топливо, обедненный уран, урановый концентрат, диоксид урана, металлический уран, металлический уран с цирконием и/или плутонием, металлический уран с молибденом и/или плутонием, диоксид тория, торианит, хлоридные соли урана, такие как соли, содержащие тетрахлорид урана и/или трихлорид урана, и фторидные соли урана.

С другой стороны, ядерное топливо включает любое делящееся вещество.

Делящееся вещество включает любой нуклид, способный подвергаться делению при воздействии низкоэнергетических тепловых нейтронов или высокоэнергетических нейтронов. Кроме того, делящееся вещество включает любой делящийся материал, любой воспроизводящий материал или сочетания делящегося и воспроизводящего материалов. Сюда входят известные металлические, оксидные и смешанные оксидные формы ядерного топлива. Делящийся материал может содержать металл и/или металлический сплав. В одном воплощении топливом может быть металлическое топливо. Следует принять во внимание, что металлическое топливо позволяет обеспечить относительно высокие загрузки тяжелых металлов

и отличную экономию нейтронов, что является предпочтительным для процесса деления ядерного реактора на бегущей волне. В зависимости от области применения, топливо может включать по меньшей мере один элемент, выбираемый из U, Th, Am, Np и Pu. В одном воплощении топливо может включать по меньшей мере приблизительно 90 мас.% U, например по меньшей мере 95, 98, 99, 99,5, 99,9, 99,99 мас.% или более U. Топливо может дополнительно включать огнеупорный или высокотемпературный материал, который может включать по меньшей мере один элемент, выбранный из Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os и Ir. В одном воплощении топливо может включать дополнительные выгорающие поглотители, такие как бор, гадолиний, эрбий или индий. Кроме того, металлическое топливо может быть легировано цирконием в количестве от приблизительно 3 до приблизительно 10 мас.% для обеспечения стабильности размеров при облучении.

Примеры агрессивных сред или материалов, от которых отделяют ядерные материалы, включают теплоносители реактора, такие как Na, NaK, сверхкритический CO_2, свинец и свинцово-висмутовый эвтектический сплав, и $NaCl\text{-}MgCl_2$.

На фиг. 5 представлено воплощение способа выбора материалов барьерного слоя стойкой к ХВТО СБО и тепловыделяющего элемента. В представленном воплощении способ 500 начинают с определения ядерного материала, который вмещает тепловыделяющий элемент, на стадии 502 идентификации ядерного материала. Ядерный материал может быть выбран из любых известных материалов, или выбор вариантов может быть ограничен несколькими материалами или только одним материалом из-за доступности или других ограничений. Выше указан перечень некоторых возможных ядерных материалов.

Также определяют материал оболочки на стадии 504 идентификации оболочки.

Материал оболочки может быть определен на основе одного или более факторов, таких как требования к прочности, требования к толщине, требования к нейтронам, доступность, стоимость, коррозионная стойкость к внешней среде, технологичность и долговечность, и это только небольшая часть. Перечень некоторых возможных материалов оболочки указан выше.

Независимо от того, какой материал оболочки выбран, он будет обладать определенными характеристиками химического взаимодействия по отношению к ядерному материалу. Эти характеристики будут определять, в какой степени ХВТО повредит материал оболочки, если он находится в непосредственном контакте с выбранным ядерным материалом.

При известном материале оболочки и ядерном материале, может быть выбран материал барьера со стороны топлива на стадии 506 выбора материала барьера со стороны топлива. На этой стадии 506 выбирают материал барьера со стороны топлива, который снижает или устраняет диффузию ядерного материала и продуктов ядерного деления через барьеры со стороны топлива в материал оболочки. Т.е. выбирают материал барьера со стороны топлива, который обладает лучшими свойствами химического взаимодействия с ядерным материалом, чем выбранный материал оболочки. В одном воплощении, например, материал барьера со стороны топлива обладает большей стойкостью к внутренней диффузии продуктов деления лантаноидов, чем материал оболочки. Толщина барьера также может быть определена на данной стадии 506.

Эта стадия 506 выбора учитывает ожидаемую тепловую, физическую (например, давление и конфигурацию) и нейтронную среду, воздействию которой подвергается готовый ядерный тепловыделяющий элемент во время работы реактора. Например, в одном воплощении основным функциональным требованием ХВТО барьеров является выдерживание расчетного срока службы (40-60 лет) при повышенных температурах (550-625°C) с минимальным взаимодействием с топливом, продуктами деления и компонентами оболочки.

Также, материал барьера со стороны оболочки выбирают на стадии 508 выбора материала барьера со стороны оболочки. На этой стадии 508 выбирают материал барьера со стороны оболочки, отличающийся своим основным материалом от материала барьера со стороны топлива, который снижает или устраняет вредные химические взаимодействия с материалом оболочки относительно выбранного материала барьера со стороны топлива. Т.е. выбранный материал барьера со стороны оболочки обладает лучшими характеристиками химического взаимодействия с оболочкой, чем материал барьера со стороны топлива. Например, выбранный материал со стороны оболочки может иметь повышенную стойкость к внутренней диффузии одного или более химических элементов из материала оболочки, чем материал барьера со стороны топлива. В качестве другого примера, в одном воплощении материал оболочки представляет собой углеродсодержащую сталь, а выбранный материал барьера со стороны оболочки демонстрирует меньшую степень обезуглероживания материала оболочки, чем материал барьера со стороны топлива. Известны другие характеристики химического взаимодействия, включая склонность к сплавлению с компонентами в материале оболочки. Кроме того, в одном воплощении материал барьера со стороны оболочки также выбирают по совместимости с материалом барьера со стороны топлива. Толщина барьера со стороны оболочки также может быть определена на этой стадии 508.

Например, одним из наблюдаемых вредных химических взаимодействий с углеродсодержащими сталями является обезуглероживание стали с течением времени в ядерной среде. Может быть выбран материал барьера со стороны оболочки, отличающийся по основному материалу от материала барьера со стороны топлива, который показал способность снижать наблюдаемую степень обезуглероживания, при ожидаемой тепловой, физической (например, давление и конфигурация) и нейтронной среде, воздейст-

вию которой подвергается готовый ядерный тепловыделяющий элемент в ходе работы реактора. Например, в конкретном воплощении, каждый из материалов барьера также выбирают таким образом, чтобы препятствовать диффузии присутствующих подвижных веществ.

Затем осуществляют проверку совместимости для подтверждения совместимости двух выбранных материалов барьера на стадии 510 анализа. На этой стадии 510 определяют совместимость двух выбранных материалов барьера при ожидаемых условиях эксплуатации. Если установлено, что материал барьера со стороны оболочки и материал барьера со стороны топлива недостаточно совместимы, тогда может быть изучено воплощение барьера с тремя или более слоями. Воплощение может включать выбор материала и толщины для среднего барьера, который совместим как с барьером со стороны топлива, так и с барьером со стороны оболочки. Дополнительные барьерные слои можно считать подходящими, при выборе для каждого слоя материала, толщины и способа нанесения, в отношении соседних барьеров, топлива и/или оболочки.

На фиг. 6 укрупненно представлено воплощение способа получения стойкого к ХВТО тепловыделяющего элемента. Учитывая выбранный ряд материалов и толщины для каждого из четырех или более слоев, способ 600 позволяет получить готовый тепловыделяющий элемент.

В представленном воплощении способ 600 начинают с изготовления слоя исходного компонента тепловыделяющего элемента на стадии 602 изготовления. Слой может быть любым из слоев указанных выше, т.е. оболочкой, барьером со стороны оболочки, барьером со стороны топлива или топливом. Этот исходный компонент изготавливают на стадии 602 изготовления в качестве отдельного компонента заданной формы, к которому впоследствии могут быть присоединены другие слои.

Например, в воплощении, в котором оболочка представляет собой сталь HT9, стадия 602 изготовления может включать обычную ковку стали HT9 и вытяжку ее с получением трубы или листа. Аналогичным образом, в воплощении, в котором барьер со стороны оболочки является исходным компонентом, стадия 602 изготовления может включать обычную ковку материала барьера со стороны оболочки и вытяжку его с получением трубы или листа для создания отдельного элемента. Также можно использовать трехмерную печать для изготовления исходного компонента.

После изготовления исходного компонента, осуществляют стадию 604 присоединения второго слоя, на которой второй слой прикрепляют к исходному компоненту. На стадии 604 присоединения первый и второй слои механически или металлургически соединяют между собой по границе раздела слоев. Например, в трубчатом воплощении первый и второй слои механически или металлургически соединяют между собой по периметру границы раздела в двух слоев. В качестве конкретного примера, можно вытянуть трубку HT9 и затем покрыть ее внутреннюю поверхность материалом барьера со стороны оболочки, выбранным из вышеприведенного перечня, с использованием любого из способов, описанных ниже.

Используемый способ соединения будет зависеть от типа соединяемых материалов. Примеры способов соединения более подробно рассмотрены ниже. В результате получают двухслойный промежуточный компонент. Для тепловыделяющего элемента с двойным барьером двухслойный промежуточный компонент является одним из следующих компонентов: а) промежуточный компонент из оболочки и барьера со стороны оболочки, б) промежуточный компонент из барьера со стороны оболочки и барьера со стороны топлива или в) промежуточный компонент из барьера со стороны топлива и ядерного материала, в зависимости от того, каким был исходный компонент. В рамках этой стадии 604, второй слой может быть сначала изготовлен, а затем присоединен, или присоединение и изготовление можно выполнять одновременно, например, когда второй слой осаждают на исходный компонент.

Затем осуществляют стадию 606 присоединения третьего слоя, соединяя третий слой с двухслойным промежуточным компонентом. В ходе стадии 606 присоединения третьего слоя, третий слой механически или металлургически соединяют с одним или двумя слоями двухслойного промежуточного компонента. Например, в трубчатом воплощении второй и третий слои механически или металлургически соединяют между собой по периметру границы раздела двух слоев. Это позволяет получить трехслойный промежуточный компонент. Для тепловыделяющего элемента с двойным барьером, трехслойный промежуточный компонент представляет собой либо СБО, либо промежуточный компонент из барьера со стороны оболочки, барьера со стороны топлива и ядерного материала, опять же, в зависимости от того, каким был исходный компонент и в каком порядке соединяли слои. Аналогично, в рамках данной стадии 606 третий слой может быть сначала изготовлен, а затем присоединен, или присоединение и изготовление можно выполнять одновременно, например, когда третий слой осаждают на двухслойный промежуточный компонент.

В качестве конкретного примера, можно вытянуть трубку HT9 и затем покрыть материалом барьера со стороны оболочки, затем можно изготовить трубку из материала барьера со стороны топлива и вставить ее в промежуточный компонент HT9/барьер со стороны оболочки. Затем трехслойный промежуточный компонент можно подвергнуть горячей или холодной вытяжке, чтобы улучшить связь между барьером со стороны оболочки и барьером со стороны топлива.

Затем завершают изготовление тепловыделяющего элемента с двухфазным ХВТО барьером на стадии 608 окончательного скрепления. На данной стадии последний слой, который является либо оболочкой, либо ядерным материалом, объединяют с трехслойным промежуточным компонентом с получением

готового тепловыделяющего элемента. Данная стадия может включать несколько операций обработки или скрепления для завершения скрепления всех слоев с получением готового продукта. Например, в одном воплощении стадия 608 окончательного скрепления включает процесс, в котором обеспечивают конечную металлургическую связь между одним или более слоями, которые предварительно были связаны механически на более ранней стадии.

Стадия 608 окончательного скрепления также может включать прикрепление любых внешних соединительных деталей, необходимых в эксплуатации. Например, стадия 608 окончательного скрепления может включать установку одной или более концевых заглушек на тепловыделяющий элемент. Также может быть обеспечено любое дополнительное оборудование или элементы в рамках данной стадии 608.

Промежуточные отжиги можно выполнять в вакууме или восстановительных условиях, как требуется, в рамках любой из стадий способа 600. Также может быть выполнена окончательная термическая обработка, включающая нормализацию и отпуск, если требуется.

Как указано выше, исходный компонент может быть получен на стадии 602 изготовления любым традиционным способом. Последующие стадии 604, 606, 608 присоединения включают любые соответствующие технологические приемы для получения соответствующего слоя выбранного материала и его прикрепления к исходному или промежуточному компоненту. В одном воплощении оболочка и барьеры являются герметичными, чтобы предотвратить простую миграцию газообразных продуктов деления, без сквозных дефектов или трещин в стенке, образующихся в ходе изготовления. Кроме того, применение механических или металлургических связей между слоями СБО приводит к хорошей теплопроводности без использования термосвязующих материалов, таких как жидкий натрий. Примеры соответствующих технологических приемов, в зависимости от рассматриваемых материалов, включают в себя раздельное, традиционное изготовление, например холодную вытяжку или трехмерную печать, прикрепляемого слоя и простое механическое соединение, такое как вставка, прокатка, прессование, обжатие, совместная вытяжка, совместное экструзионное прессование или пилигримовая прокатка (холодная или горячая). Способы механического соединения могут включать повышенные температуры (например, горячая пилигримовая прокатка или горячее изостатическое прессование) для содействия в получении хорошего скрепления между слоями и получении слоев без каких-либо трещин или других деформаций.

В некоторых случаях использование разницы в термическом расширении при конструировании тепловыделяющего элемента возможно в рамках стадии 608 окончательного скрепления. Таким образом, барьеры и/или ядерный материал могут "скользить" в СБО и достигать желаемого состояния после выполнения заданных термических условий, таких как установившаяся рабочая температура реактора, температура перезагрузки топлива или температура, при которой топливо отгружают после изготовления. Таким образом, хотя воплощения, представленные на фиг. 1-4 и 7-10, иллюстрируют различные слои в виде полностью связанных между собой слоев, по их границам раздела в различных точках во время способа изготовления это может быть не так, особенно когда слои соединяют механически вместе. Кроме того, несмотря на идеальность, такое совершенное соединение во всех точках по границам раздела может быть недостижимо в реальности.

Кроме того, барьеры можно получать и прикреплять путем осаждения слоев материала на целевой компонент. Это может быть достигнуто, например, с помощью электросаждения, химического осаждения из паровой фазы (ХОПФ), более конкретно, с помощью химического осаждения из паровой фазы металлорганического соединения (ХОПФМО), или физического осаждения из паровой фазы (ФОПФ) более конкретно, термического испарения, напыления, импульсного лазерного осаждения (ИЛО), катодно-дугового осаждения и электроискрового осаждения (ЭИО). Каждый из этих методов осаждения известен в технике.

В некоторых воплощениях ядерный материал не обязательно должен быть нанесен на барьер со стороны топлива, а вместо этого он просто может содержаться внутри контейнера, сформированного, по меньшей мере, частично, с помощью СБО. Например, гранулированное ядерное топливо может быть просто загружено в СБО в форме закрытой трубки или сосуда какой-либо другой формы.

В качестве альтернативы, между одним или более слоями могут быть созданы металлургические связи в ходе способа 600, например, посредством горячего прессования (например, горячего изостатического прессования). Например, в одном воплощении трехслойный промежуточный компонент, состоящий из трубчатой заготовки оболочки, барьера со стороны оболочки и барьера со стороны топлива, имеющий центральную полость, может быть получен механическим соединением отдельных трубок из материала, осаждением материалов или посредством сочетания обоих способов. Затем трехслойный промежуточный компонент можно подвергнуть горячему прессованию с использованием постоянного давления (горячее изостатическое прессование или ГИП) с получением металлургической связи между слоями трехслойного промежуточного компонента. Затем трехслойный промежуточный компонент можно экструдировать или подвергнуть пилигримовой прокатке (или сочетанию обоих способов) с последующей холодной прокаткой или вытяжкой в холодном состоянии до конечной формы.

В альтернативном воплощении первая стадия способа также может быть горячей экструзией. Например, горячая экструзия с последующим ГИП и ГИП с последующей горячей экструзией является альтернативным способом для достижения металлургических связей.

Например, СБО может быть таким образом получена посредством сборки трубки из материала оболочки, материала барьера со стороны оболочки и материала барьера со стороны топлива и затем осуществления их горячего прессования с последующей экструзией и холодной прокаткой или вытяжкой с получением конечной формы для СБО. В альтернативном воплощении металлургического соединения промежуточный компонент можно сначала экструдировать или подвергать пилигримовой прокатке (или их сочетанию) и затем обрабатывать с получением конечной формы или формы, необходимой для последующих стадий технологической обработки.

Далее в таблице представлены некоторые возможные воплощения способа получения тепловыделяющего элемента с двойным ХВТО барьером, включая различный порядок и разные возможные технологические приемы скрепления. Различные варианты способа на фиг. 6 включают, например, кольцевой тепловыделяющий элемент с покрытием, нанесенным с помощью ФОГФ (оба барьера) с оболочкой, опрессованной поверх промежуточного компонента из топлива, барьера со стороны топлива и барьера со стороны оболочки. Способ 600 также включает воплощения, в которых топливо может быть экструдировано, отлито, подвергнуто пилигримовой прокатке или сварено в виде трубки.

Более конкретно, способ на фиг. 6 включает воплощения, в которых барьеры и оболочка могут быть совместно экструдированы либо в завершение стадии 606 присоединения третьего слоя либо на стадии 608 окончательного скрепления. Например, стадия 606 присоединения третьего слоя может включать совместную экструзию или пилигримовую прокатку всех слоев СБО с получением конечной формы перед окончательной сборкой с ядерным материалом. Аналогичным образом, стадия 608 окончательного скрепления может включать стадию совместной экструзии или пилигримовую прокатку всех слоев, включая ядерный материал с получением готовой формы тепловыделяющего элемента.

В качестве другого примера воплощения, способ 600 включает холодную вытяжку "тонкого" барьера со стороны топлива, нанесение на его наружную сторону ФОПФ покрытия из барьера со стороны оболочки и затем вставку двойного барьера внутрь оболочки и осуществление стадии холодного погружения/вытяжки для механического соединения слоев.

В еще одном воплощении способа 600 (не показано) СБО или готовый тепловыделяющий элемент могут быть получены в рамках единственной стадии изготовления, где начальную стадию 602 изготовления и стадии 604, 606, 608 присоединения осуществляют одновременно, например, путем трехмерной печати всех слоев одновременно.

Также могут быть использованы способы литья для получения топлива. В некоторых случаях литье также осуществляют непосредственно внутри тепловыделяющего прутка, расположенного внутри облицовки и/или оболочки. Литье также может быть выполнено с обеспечением внутренней конструкции для собора или транспортировки продуктов деления.

Помимо воплощений двойных барьеров, указанных выше, в некоторых воплощениях также можно использовать три ХВТО барьера. Воплощения с тремя барьерами или тройным барьером включают обеспечение промежуточного слоя между барьером со стороны оболочки и барьером со стороны топлива для снижения взаимодействия между этими двумя барьерами, обеспечения лучшего скрепления между этими двумя барьерами или обеспечения дополнительной защиты от внутренней диффузии ядерного материала или продуктов деления во внешнюю среду. В остальном воплощения с тройным барьером подобны воплощениям с двойным барьером в том, что каждый барьер имеет основной материал, отличный от основного материала любого соседнего барьера или барьеров. Оболочка может быть основным структурным элементом или, в качестве альтернативы, одним из трех барьеров может быть основной структурный элемент.

На фиг. 7-10 представлено воплощение тройного барьера для СБО и стойкого к ХВТО тепловыделяющего элемента. На фиг. 7-10 отражено представление воплощений двойных барьеров, показанных на фиг. 1-4.

На фиг. 7 показан вид в разрезе линейного участка или "элемента стенки" СБО, содержащей тройной ХВТО барьер. Опять же, СБО 700 может быть частью любого оборудования, корпуса реактора или компонента, который отделяет ядерное топливо от внешней среды. СБО 700 состоит из трех ХВТО барьеров 702, 704, 708 и оболочки 706. Барьер 702 со стороны топлива отделяет топливо или зону хранения, в которой размещают топливо, если топливо еще не используют, от промежуточного ХОВТ барьера 708. Промежуточный барьер 708 ХВТО находится между барьером 702 со стороны топлива и барьером 704 со стороны оболочки. Барьер 704 со стороны оболочки находится между промежуточным барьером 708 и оболочкой 706. Оболочка 706 находится в контакте с окружающей средой одной поверхностью и с барьером 704 со стороны оболочки противоположной поверхностью.

ХВТО барьеры 702, 704, 708 могут быть выполнены из любых материалов, описанных выше со ссылкой на барьеры на фиг. 1-4. Однако в одном воплощении никакие два соседних барьеров не могут быть выполнены из одного и того же основного материала. Т.е. в данном воплощении барьер 702 со стороны топлива и барьер 704 со стороны оболочки могут быть выполнены из одного и того же основного материала, а промежуточный барьер 708 выполнен из материала, отличного как от основного материала барьера 702 со стороны топлива, так и от основного материала барьера 704 со стороны оболочки. Во всех других аспектах СБО 700 является такой же, как описано выше со ссылкой на фиг. 1.

Воплощения способа изготовления
тепловыделяющего элемента с двойным ХВТО барьером

Исходный компонент	Двухслойный промежуточный компонент	Способ прикрепления второго слоя	Трехслойный промежуточный компонент	Способ прикрепления третьего слоя	Готовый продукт	Способ соединения последнего слоя
Оболочка	Оболочка и барьер со стороны оболочки	Изготовление и механическая сборка или прикрепление, электроосаждение, ХОПФ или ФОПФ	СБО	Изготовление и механическая сборка, электроосаждение, ХОПФ или ФОПФ	Тепловыделяющий элемент	Изготовление и механическая сборка или прикрепление
Барьер со стороны оболочки	Оболочка и барьер со стороны оболочки	Изготовление и механическая сборка или прикрепление	СБО	Изготовление и механическая сборка, электроосаждение, ХОПФ или ФОПФ	Тепловыделяющий элемент	Изготовление и механическая сборка или прикрепление
Барьер со стороны топлива	Барьер со стороны оболочки и барьер со стороны топлива	Изготовление и механическая сборка или прикрепление, электроосаждение, ХОПФ или ФОПФ	СБО	Изготовление и механическая сборка	Тепловыделяющий элемент	Изготовление и механическая сборка или прикрепление
Барьер со стороны топлива	Топливо и барьер со стороны топлива	Изготовление и механическая сборка или прикрепление	Топливо, барьер со стороны топлива и барьер со стороны оболочки	Изготовление и механическая сборка, электроосаждение, ХОПФ или ФОПФ	Тепловыделяющий элемент	Изготовление и механическая сборка или прикрепление
Топливо	Барьер со стороны топлива	Изготовление и механическая сборка или прикрепление, электроосаждение, ХОПФ или ФОПФ	Топливо, барьер со стороны топлива и барьер со стороны оболочки	Изготовление и механическая сборка, электроосаждение, ХОПФ или ФОПФ	Тепловыделяющий элемент	Изготовление и механическая сборка или прикрепление

На фиг. 8 представлено воплощение тройной СБО, показанной на фиг. 7, в виде трубки. В представленном воплощении, элемент 800 стенки имеет форму трубки с внутренней поверхностью и внешней поверхностью, причем барьер 802 со стороны топлива образует внутреннюю поверхностью трубки, а оболочка 806 из стали образует внешнюю поверхность трубки. Между барьером 802 со стороны топлива и барьером 804 со стороны оболочки расположен промежуточный ХВТО барьер 808. Зона хранения топлива расположена в центральной области трубки. Топливо, когда его размещают внутри трубки, защищено от реакционноспособной внешней среды, в то же время оболочка отделена и защищена от химических взаимодействий с топливом. В свою очередь, общий термин "элемент стенки" используют для понимания того, что трубка или контейнер другой формы может содержать несколько различных стенок или секций стенки, не все из которых состоят из СБО.

На фиг. 9 представлен элемент стенки с тройным барьером, показанный на фиг. 7, но на этот раз в виде тепловыделяющего элемента с ядерным материалом 910, включающим, но не ограниченным этим, ядерное топливо, в контакте с барьером 902 со стороны топлива. Барьер 902 со стороны топлива отделен от барьера 904 со стороны оболочки промежуточным барьером 908. В свою очередь, барьеры 902, 904, 908 могут иметь любую толщину, от тонкого покрытия до 50% толщины основного конструкционного элемента, оболочки 906.

Аналогичным образом, на фиг. 10 представлено воплощение тройной СБО, показанной на фиг. 8, в вид трубки, но на этот раз в качестве тепловыделяющего элемента 1000, содержащего ядерный материал 1010, включающий, но не ограниченный этим, ядерное топливо. Ядерный материал 1010 находится в полом центре СБО, в контакте с барьером 1002 со стороны топлива. Барьер 1002 со стороны топлива отделен от барьера 1004 со стороны оболочки промежуточным барьером 1008 из другого материала. В свою очередь барьеры 1002, 1004, 1008 могут иметь любую толщину, от тонкого покрытия до 50% толщины основного конструкционного элемента, оболочки 1006. Во всех других аспектах, СБО 1000 является такой же, как описано выше со ссылкой на фиг. 3.

Ядерный материал 1010 может быть сплошным, как показано, или может представлять собой кольцо материала так, что готовый тепловыделяющий элемент является полым в центре. В другом воплощении тепловыделяющий элемент может иметь дольчатое или любое другое поперечное сечение, обеспечивающее пространство внутри тепловыделяющего элемента для расширения ядерного материала 1010. Во всех других аспектах тепловыделяющий элемент 1000 является таким же, как описано выше со ссылкой на фиг. 4.

Тройные тепловыделяющие элементы и СБО, показанные на фиг. 7-10, могут быть изготовлены с использованием способов, аналогичных способам, показанным на фиг. 5 и 6. Способ на фиг. 5 выбора материала модифицируют так, что он включает дополнительную операцию для выбора материала промежуточного барьера. Операция включает выбор материала, химически совместимого с материалом барьера со стороны оболочки и материалом барьера со стороны топлива. В одном воплощении материал промежуточного барьера обладает одной или более характеристиками химического взаимодействия с каждым из соседних барьеров, которые лучше, чем эти характеристики взаимодействия этих барьеров друг с другом.

Подобным образом, способ изготовления, показанный на фиг. 6, модифицируют так, что он включает дополнительную операцию прикрепления слоя. Конечно, добавление третьего барьера увеличивает матрицу на еще один компонент, и это означает, что существует много различных возможных порядков изготовления и присоединения различных слоев.

Тепловыделяющие элементы и тепловыделяющие сборки.

На фиг. 11а представлено неполное изображение ядерной тепловыделяющей сборки 10, в которой

используют один или более двойных или тройных СБО, описанных выше. Тепловыделяющая сборка 10, как показано, включает ряд отдельных тепловыделяющих элементов (или "тепловыделяющие прутки" или "тепловыделяющие стержни") 11, удерживаемые внутри несущей конструкции 16 защитной оболочки реактора.

На фиг. 11b представлено неполное изображение тепловыделяющего элемента 11 в соответствии с одним воплощением. Как показано в данном воплощении, тепловыделяющий элемент включает двойную или тройную СБО 13, топливо 14 и, в некоторых примерах, по меньшей мере один зазор 15. Хотя и представленная в виде одного элемента, двойная или тройная СБО 13 состоит, полностью или, по меньшей мере, частично, из оболочек с двумя барьерами или тремя бартерами, описанных выше.

Топливо герметизировано внутри полости, образованной внешней СБО 13. В некоторых примерах многочисленные топливные материалы могут быть наложены друг на друга в осевом направлении, как показано на фиг. 11b, но это не является обязательным. Например, тепловыделяющий элемент может содержать только один топливный материал.

В одном воплощении зазор(ы) 15 могут присутствовать между топливным материалом и СБО, хотя зазор(ы) не обязательно должны присутствовать. В одном воплощении зазор заполнен атмосферой под давлением, такой как атмосфера гелия под давлением.

В одном воплощении отдельные тепловыделяющие элементы 11 могут содержать тонкую проволоку 12 диаметром от приблизительно 0,8 мм до приблизительно 1,6 мм, спирально обернутую по окружности трубки оболочки, чтобы обеспечить пространство для теплоносителя и механическое разделение отдельных тепловыделяющих элементов 11 внутри корпуса тепловыделяющих сборок 10 (которые также служат каналом для теплоносителя). В одном воплощении двойная или тройная СБО 13 и/или проволочная обмотка 12 могут быть изготовлены из ферритно-мартенситной стали из-за ее поведения при облучении, как показано совокупностью эмпирических данных.

Тепловыделяющий элемент может иметь любую геометрию, как внешнюю, так и для внутренней области хранения топлива. Например, в некоторых воплощениях, указанных выше, тепловыделяющий элемент является цилиндрическим и может принимать форму цилиндрического стержня. Кроме того, особенно эффективными могут быть некоторые геометрические формы призматоида. Например, тепловыделяющие элементы могут быть прямыми, наклонными или усеченными призмами, которые имеют три или более сторон и любую полигональную форму основания. Шестиугольные призмы, прямоугольные призмы, квадратные призмы и треугольные призмы - все это потенциально эффективные формы для укладки тепловыделяющей сборки.

Тепловыделяющие элементы и тепловыделяющая сборка могут входит в состав энергетического реактора, который входит в состав атомной электростанции. Тепло, выделяемое в результате ядерной реакции, используют для нагрева теплоносителя, находящегося в контакте с внешней поверхностью тепловыделяющих элементов. Затем это тепло извлекают и используют для приведения в действие турбин или другого оборудования полезного сбора энергии из извлеченного тепла.

Несмотря на прилагаемую формулу изобретения, сущность изобретения также определяется следующими пунктами.

1) Способ получения стойкого к химическому взаимодействию между топливом и оболочкой (ХВТО) тепловыделяющего элемента, включающий: определение ядерного материала для использования в тепловыделяющем элементе в качестве топливного компонента; изготовление исходного компонента, выбираемого из оболочки, барьера со стороны оболочки, барьера со стороны топлива и топливного компонента; прикрепление второго слоя к исходному компоненту, с получением двухслойного промежуточного элемента; прикрепление третьего слоя к двухслойному промежуточному элементу с получением трехслойного промежуточного элемента и прикрепление последнего слоя к трехслойному промежуточному элементу с получением тепловыделяющего элемента, причем тепловыделяющий элемент содержит оболочку, барьер со стороны оболочки, барьер со стороны топлива и топливный компонент, где барьер со стороны оболочки расположен между оболочкой и барьером со стороны топлива, и барьер со стороны топлива расположен между барьером со стороны оболочки и топливным компонентом.

2) Способ по п.1, дополнительно включающий: выбор материала оболочки для использования в качестве оболочки тепловыделяющего элемента, причем ядерный материал характеризуется первым расстоянием внутренней диффузии в материал оболочки, когда материал оболочки размещают в контакте с ядерным материалом в течение 2 месяцев и выдерживают при 650°C, и выбор материала барьера со стороны топлива для использования в качестве барьера со стороны топлива тепловыделяющего элемента, причем ядерный материал характеризуется вторым расстоянием внутренней диффузии в материал барьера со стороны топлива, когда материал со стороны топлива размещают в контакте с ядерным материалом в течение 2 месяцев и выдерживают при 650°C, при этом второе расстояние внутренней диффузии меньше, чем первое расстояние внутренней диффузии.

3) Способ по п.2, в котором по меньшей мере один химический элемент в материале барьера со стороны топлива характеризуется третьим расстоянием внутренней диффузии в материал оболочки, при размещении в контакте с материалом оболочки в течение 2 месяцев и выдержке при 650°C, и по меньшей

мере один химический элемент в материале барьера со стороны оболочки характеризуется четвертым расстоянием внутренней диффузии в материал оболочки, при размещении в контакте с материалом оболочки в течение 2 месяцев и выдержке при 650°C, причем третье расстояние внутренней диффузии больше, чем четвертое расстояние внутренней диффузии.

4) Способ по любому из пп.1-3, в котором исходный компонент представляет собой оболочку, второй слой представляет собой барьер со стороны оболочки, третий слой представляет собой барьер со стороны топлива, и последний слой представляет собой топливный компонент.

5) Способ по любому из пп.1-4, в котором исходный компонент представляет собой барьер со стороны оболочки, второй слой представляет собой оболочку, третий слой представляет собой барьер со стороны топлива3, и последний слой представляет собой топливный компонент.

6) Способ по любому из пп.1-5, в котором исходный компонент представляет собой барьер со стороны топлива, второй слой представляет собой барьер со стороны оболочки, третий слой представляет собой оболочку, и последний слой представляет собой топливный компонент.

7) Способ по любому из пп.1-6, в котором исходный компонент представляет собой барьер со стороны топлива, второй слой представляет собой топливный компонент, третий слой представляет собой барьер со стороны оболочки, и последний слой представляет собой оболочку.

8) Способ по любому из пп.1-7, в котором исходный компонент представляет собой топливный компонент, второй слой представляет собой барьер со стороны топлива, третий слой представляет собой барьер со стороны оболочки, и последний слой представляет собой оболочку.

9) Способ по любому из пп.2-8, в котором барьер со стороны оболочки прикрепляют к оболочке посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны оболочки на оболочку.

10) Способ по любому из пп.2-8, в котором барьер со стороны топлива прикрепляют к барьеру со стороны оболочки посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны оболочки на барьер со стороны топлива.

11) Способ по любому из пп.2-8, в котором барьер со стороны оболочки прикрепляют к барьеру со стороны топлива посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны топлива на барьер со стороны оболочки.

12) Способ по любому из пп.2-8, в котором барьер со стороны топлива прикрепляют к топливному компоненту посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны топлива на топливный компонент.

13) Способ по любому из пп.2-8, в котором материал барьера со стороны оболочки выбирают из Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, Ni, сплава любого из перечисленных материалов, керамики TiN, керамики ZrN, керамики VN, керамики TiC, керамики ZrC или керамики VC.

14) Способ по любому из пп.2-8, в котором материал барьера со стороны топлива выбирают из Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, Ni, сплава любого из перечисленных материалов, керамики TiN, керамики ZrN, керамики VN, керамики TiC, керамики ZrC или керамики VC.

15) Способ по любому из пп.9-14, в котором прикрепление осуществляют посредством химического осаждения из паровой фазы металлорганического соединения (ХОПФМО); термического испарения, напыления, импульсного лазерного осаждения (ИЛО), катодно-дугового осаждения и электроискрового осаждения (ЭИО).

16) Способ по любому из пп.1-15, в котором тепловыделяющий элемент состоит из: оболочки, барьера со стороны оболочки, барьера со стороны топлива и топливного компонента, где барьер со стороны оболочки находится между оболочкой и барьером со стороны топлива, а барьер со стороны топлива находится между барьером со стороны оболочки и топливным компонентом.

17) Способ по любому из пп.1-16, в котором исходный компонент, второй слой и третий слой совместно экструдируют.

18) Способ по любому из пп.2-17, в котором материал оболочки содержит основной химический элемент, составляющий более 50 мас.% материала оболочки, и по меньшей мере один химический элемент в материале оболочки является основным химическим элементом материала оболочки.

19) Способ по любому пп.2-18, в котором материал барьера со стороны топлива содержит основной химический элемент, составляющий более 50 мас.% материала барьера со стороны топлива, и по меньшей мере один химический элемент в материале барьера со стороны топлива представляет собой основной химический элемент материала барьера со стороны топлива.

20) Способ по любому пп.2-19, в котором материал барьера со стороны оболочки содержит основной химический элемент, составляющий более 50 мас.% материала барьера со стороны оболочки, и по меньшей мере один химический элемент в материале барьера со стороны оболочки представляет собой основной химический элемент материала барьера со стороны оболочки.

21) Способ по любому из пп.2-17, в котором материал оболочки содержит основной химический элемент, составляющий более 50 мас.% материала оболочки, и по меньшей мере один химический элемент в материале оболочки отличается от основного химического элемента материала оболочки.

22) Способ по любому из пп.2-18, в котором материал барьера со стороны топлива содержит основной химический элемент, составляющий более 50 мас.% материала барьера со стороны топлива, и по меньшей мере один химический элемент в материале барьера со стороны топлива отличается от основного химического элемента материала барьера со стороны топлива.

23) Способ по любому из пп.2-19, в котором материал барьера со стороны оболочки содержит основной химический элемент, составляющий более 50 мас.% материала барьера со стороны оболочки, и по меньшей мере один химический элемент в материале барьера со стороны оболочки отличается от основного химического элемента материала барьера со стороны оболочки.

24) Снабженная двойным барьером оболочка для удерживания ядерного материала, включающая: оболочку, выполненную из материала оболочки, выбранного из нержавеющей стали, сплавов FeCrAl, стали HT9, дисперсионно-упрочненной оксидами стали, стали T91, стали T92, стали 316, стали 304, стали APMT, стали Alloy 33, молибдена, сплава молибдена, циркония, сплава циркония, ниобия, сплава ниобия, сплавов циркония и ниобия, никеля или сплава никеля; барьер со стороны топлива и барьер со стороны оболочки между барьером со стороны топлива и оболочкой, где барьер со стороны топлива представляет собой первый материал, а барьер со стороны оболочки представляет собой второй материал, содержащий основной химический элемент, отличный от основного химического элемента первого материала.

25) Снабженная двойным барьером оболочка для удерживания ядерного материала по п.24, в которой первый материал характеризуется меньшей внутренней диффузией урана, чем второй материал, при помещении в контакт с ураном в течение 2 месяцев и выдержке при 650°C.

26) Снабженная двойным барьером оболочка для удерживания ядерного материала по п.24, в которой второй материал характеризуется меньшей внутренней диффузией первого материала, чем материал оболочки, при помещении в контакт в течение 2 месяцев и выдержке при 650°C.

27) Снабженная двойным барьером оболочка для удерживания ядерного материала по любому из пп.24 и 25, в которой первый материал выбран из Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, Ni, сплава любого из перечисленных материалов, керамики TiN, керамики ZrN, керамики VN, керамики TiC, керамики ZrC или керамики VC, и барьер со стороны топлива имеет от толщину 1,0 до 150,0 мкм.

28) Снабженная двойным барьером оболочка для удерживания ядерного материала по любому из пп.24-26, в которой второй материал выбран из Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, Ni, сплава любого из перечисленных материалов, керамики TiN, керамики ZrN, керамики VN, керамики TiC, керамики ZrC или керамики VC, и барьер со стороны оболочки имеет от толщину от 1,0 до 150,0 мкм.

29) Снабженная тройным барьером оболочка для удерживания ядерного материала, включающая: оболочку, выполненную из материала оболочки, выбранного из нержавеющей стали, сплавов FeCrAl, стали HT9, дисперсионно-упрочненной оксидами стали, стали T91, стали T92, стали 316, стали 304, стали APMT, стали Alloy 33, молибдена, сплава молибдена, циркония, сплава циркония, ниобия, сплава ниобия, сплавов циркония и ниобия, никеля или сплава никеля; ХВТО барьер со стороны топлива и ХВТО барьер со стороны оболочки между ХВТО барьером со стороны топлива и оболочкой, и промежуточный ХВТО барьер между ХВТО барьером со стороны оболочки и ХВТО барьером со стороны топлива; в которой ХВТО барьер со стороны топлива представляет собой первый материал, промежуточный ХВТО барьер представляет собой второй материал из другого основного материала, отличного от основного материала первого материала, и ХВТО барьер со стороны оболочки представляет собой третий материал с основным химическим элементом, отличным от основного химического элемента второго материала.

30) Снабженная тройным барьером оболочка для удерживания ядерного материала по п.29, в которой первый материал характеризуется меньшей внутренней диффузией урана, чем второй материал, при помещении в контакт в течение 2 месяцев и выдержке при 650°C.

31) Снабженная тройным барьером оболочка для удерживания ядерного материала по п.29, в которой второй материал характеризуется меньшей внутренней диффузией первого материала, чем третий материал, при помещении в контакт в течение 2 месяцев и выдержке при 650°C.

32) Снабженная тройным барьером оболочка для удерживания ядерного материала по п.29, в которой третий материал характеризуется меньшей внутренней диффузией второго материала, чем материал оболочки, при помещении в контакт в течение 2 месяцев и выдержке при 650°C.

33) Снабженная тройным барьером оболочка для удерживания ядерного материала по любому из пп.29-32, в которой первый материал выбран из Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, Ni, сплава любого из перечисленных материалов, керамики TiN, керамики ZrN, керамики VN, керамики TiC, керамики ZrC или керамики VC.

34) Снабженная тройным барьером оболочка для удерживания ядерного материала по любому из пп.29-32, в которой второй материал выбран из Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, Ni, сплава любого из перечисленных материалов, керамики TiN, керамики ZrN, керамики VN, керамики TiC, керамики ZrC или керамики VC.

35) Снабженная тройным барьером оболочка для удерживания ядерного материала по п.34, в которой третий материал выбран из Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, Ni, сплава любого из перечисленных материалов, керамики TiN, керамики ZrN, керамики VN, керамики TiC, керамики ZrC или керамики VC.

36) Снабженная тройным барьером оболочка для удерживания ядерного материала по любому из пп.29-32 или 35, в которой каждый из барьера со стороны топлива, барьера со стороны оболочки и промежуточного ХВТО барьера имеет толщину от 1,0 до 150,0 мкм.

37) Способ получения стойкого к ХВТО тепловыделяющего элемента, включающий: определение ядерного материала для использования в тепловыделяющем элементе в качестве топливного компонента; изготовление исходного компонента, выбираемого из оболочки, барьера со стороны оболочки, барьера со стороны топлива и топливного компонента; прикрепление второго слоя к исходному компоненту с получением двухслойного промежуточного элемента; прикрепление третьего слоя к двухслойному промежуточному элементу с получением трехслойного промежуточного элемента; и прикрепление последнего слоя к трехслойному промежуточному элементу с получением тепловыделяющего элемента, причем тепловыделяющий элемент содержит оболочку, барьер со стороны оболочки, барьер со стороны топлива и топливный компонент, где барьер со стороны оболочки расположен между оболочкой и барьером со стороны топлива, а барьер со стороны топлива расположен между барьером со стороны оболочки и топливным компонентом.

38) Способ по п.37, дополнительно включающий: выбор материала оболочки для использования в качестве оболочки тепловыделяющего элемента, причем материал оболочки имеет первую характеристику химического взаимодействия с ядерным материалом; выбор материала барьера со стороны топлива для использования в качестве барьера со стороны топлива тепловыделяющего элемента, который имеет первую характеристику химического взаимодействия с ядерным материалом, которая лучше, чем эта характеристика материала оболочки, и вторую характеристику химического взаимодействия с материалом оболочки, и выбор материала барьера со стороны оболочки для использования в качестве барьера со стороны оболочки тепловыделяющего элемента, который имеет вторую характеристику химического взаимодействия с материалом оболочки, которая лучше, чем эта характеристика материала барьера со стороны топлива.

39) Способ по п.37, в котором исходный компонент представляет собой оболочку, второй слой представляет собой барьер со стороны оболочки, третий слой представляет собой барьер со стороны топлива, и последний слой представляет собой топливный компонент.

40) Способ по п.37, в котором исходный компонент представляет собой барьер со стороны оболочки, второй слой представляет собой оболочку, третий слой представляет собой барьер со стороны топлива, и последний слой представляет собой топливный компонент.

41) Способ по п.37, в котором исходный компонент представляет собой барьер со стороны топлива, второй слой представляет собой барьер со стороны оболочки, третий слой представляет собой оболочку, и последний слой представляет собой топливный компонент.

42) Способ по п.37, в котором исходный компонент представляет собой барьер со стороны топлива, второй слой представляет собой топливный компонент, третий слой представляет собой барьер со стороны оболочки, и последний слой представляет собой оболочку.

43) Способ по п.37, в котором исходный компонент представляет собой топливный компонент, второй слой представляет собой барьер со стороны топлива, третий слой представляет собой барьер со стороны оболочки, и последний слой представляет собой оболочку.

44) Способ по п.37, в котором барьер со стороны оболочки прикрепляют к оболочке посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы, экструзии в горячем состоянии, горячего изостатического прессования или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны оболочки на оболочку.

45) Способ по п.37, в котором барьер со стороны топлива прикрепляют к барьеру со стороны оболочки посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы, экструзии в горячем состоянии, горячего изостатического прессования или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны оболочки на барьер со стороны топлива.

46) Способ по п.37, в котором барьер со стороны оболочки прикрепляют к барьеру со стороны топлива посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы, экструзии в горячем состоянии, горячего изостатического прессования или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны топлива на барьер со стороны оболочки.

47) Способ по п.37, в котором барьер со стороны топлива прикрепляют к топливному компоненту посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы, экструзии в горячем состоянии, горячего изостатического прессования или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны топлива на топливный компонент.

48) Способ по п.37, в котором материал барьера со стороны оболочки выбирают из Nb, Mo, Ta, W,

Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, Ni, сплавов любого из перечисленных материалов, керамики TiN, керамики ZrN, керамики VN, керамики TiC, керамики ZrC или керамики VC.

49) Способ по п.37, в котором материал барьера со стороны топлива выбирают из Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, Ni, сплавов любого из перечисленных материалов, керамики TiN, керамики ZrN, керамики VN, керамики TiC, керамики ZrC или керамики VC.

50) Способ по любому из пп.44-49, в котором прикрепление осуществляют посредством химического осаждения из паровой фазы металлорганического соединения (ХОПФМО), термического испарения, экструзии в горячем состоянии, горячего изостатического прессования, электроосаждения, импульсного лазерного осаждения (ИЛО), катодно-дугового осаждения или электроискрового осаждения (ЭИО).

51) Способ по любому из пп.37-49, в котором тепловыделяющий элемент состоит из оболочки, барьера со стороны оболочки, барьера со стороны топлива и топливного компонента, где барьер со стороны оболочки расположен между оболочкой и барьером со стороны топлива, а барьер со стороны топлива расположен между барьером со стороны оболочки и топливным компонентом.

52) Снабженная тройным барьером оболочка для удерживания ядерного материала, включающая: оболочку, выполненную из материала оболочки, выбранного из нержавеющей стали, сплавов FeCrAl, стали HT9, дисперсионно-упрочненной оксидами стали, стали T91, стали T92, стали 316, стали 304, стали APMT, стали Alloy 33, молибдена, сплава молибдена, циркония, сплава циркония, ниобия, сплава ниобия, сплавов циркония и ниобия, никеля или сплава никеля; ХВТО барьер со стороны топлива и ХВТО барьер со стороны оболочки между ХВТО барьером со стороны топлива и оболочкой, и промежуточный ХВТО барьер между ХВТО барьером со стороны оболочки и ХВТО барьером со стороны топлива; где ХВТО барьер со стороны топлива выполнен из первого материала, который обладает улучшенной характеристикой химического взаимодействия с ядерным материалом по сравнению с материалом оболочки, промежуточный ХВТО барьер представляет собой второй материал из основного материала, отличного от первого материала, и ХВТО барьер со стороны оболочки представляет собой третий материал с основным химическим элементом, отличным от основного химического элемента второго материала.

Если не указано иное, все числа, выражающие количество компонентов, свойства, такие как молекулярная масса, условия реакции и т.д., используемые в описании и формуле изобретения, следует понимать как скорректированные во всех примерах термином "приблизительно". Соответственно, если не указано иное, численные параметры, указанные в приведенном выше описании и прилагаемой формуле изобретения, являются приближенными величинами, которые могут варьироваться в зависимости от заданных свойств, которые необходимо получить.

Несмотря на то, что численные диапазоны и параметры, определяющие широкий объем технологии, являются приближенными, численные значения, приведенные в конкретных примерах, указаны насколько возможно точно. Однако любое численное значение, по своей сути, содержит определенные ошибки, обязательно возникающие в результате стандартного отклонения, установленного в ходе соответствующих проверок измерений.

Очевидно, что системы и способы, описанные в данном документе, хорошо подходят для достижения отмеченных целей и преимуществ, так же как и других, им присущих. Специалисту в данной области понятно, что способы и системы в рамках данного описания могут быть реализованы различными способами, и сами по себе не ограничены приведенными выше примерами и воплощениями. В этом отношении, любое количество признаков различных воплощений, описанных в настоящем документе, может быть объединено в одно воплощение, и возможны альтернативные воплощения, содержащие меньшее или большее количество из всех признаков, описанных в настоящем документе.

Хотя для целей настоящего описания описаны различные воплощения, могут быть внесены различные изменения и модификации, которые вполне попадают в объем защиты настоящего изобретения. Могут быть сделаны другие изменения, которые легко придут в голову специалисту в данной области техники и которые не изменяют сущность данного изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ получения стойкого к химическому взаимодействию между топливом и оболочкой (ХВТО) тепловыделяющего элемента, включающий: определение ядерного материала (310, 410) для использования в тепловыделяющем элементе в качестве топливного компонента; выбор материала оболочки, при этом ядерный материал характеризуется первым расстоянием внутренней диффузии в материал оболочки, когда материал оболочки размещают в контакте с ядерным материалом в течение 2 месяцев и выдерживают при 650°C, и выбор материала барьера со стороны топлива, при этом ядерный материал характеризуется вторым расстоянием внутренней диффузии в материал барьера со стороны топлива, когда материал барьера со стороны топлива размещают в контакте с ядерным материалом в течение 2 месяцев и выдерживают при 650°C, при этом второе расстояние внутренней диффузии меньше, чем первое расстояние внутренней диффузии; изготовление (602) исходного компонента; прикрепление (604) второго слоя к исходному компоненту с получением двухслойного промежуточного элемента; прикрепление (606) третьего слоя к двухслойному промежуточному элементу с получением трехслойного промежуточ-

ного элемента и прикрепление (608) последнего слоя к трехслойному промежуточному элементу с получением тепловыделяющего элемента, при этом исходный компонент, второй слой, третий слой и последний слой тепловыделяющего элемента представляют собой оболочку (106), состоящую из материала оболочки, барьер (104) со стороны оболочки, барьер (102) со стороны топлива, состоящий из материала барьера со стороны топлива, и топливный компонент, где барьер со стороны оболочки расположен между оболочкой и барьером со стороны топлива, а барьер со стороны топлива расположен между барьером со стороны оболочки и топливным компонентом, в котором прикрепление осуществляют посредством химического осаждения из паровой фазы металлорганического соединения (ХОПФМО); термического испарения, напыления, импульсного лазерного осаждения (ИЛО), катодно-дугового осаждения или электроискрового осаждения (ЭИО), и материал оболочки содержит основной химический элемент, составляющий более 50 мас.% материала оболочки, и по меньшей мере один другой химический элемент, который отличается от основного химического элемента материала оболочки, и/или материал барьера со стороны топлива содержит основной химический элемент, составляющий более 50 мас.% материала барьера со стороны топлива, и по меньшей мере один другой химический элемент, который отличается от основного химического элемента материала барьера со стороны топлива, и/или материал барьера со стороны оболочки содержит основной химический элемент, составляющий более 50 мас.% материала барьера со стороны оболочки, и по меньшей мере один другой химический элемент, который отличается от основного химического элемента материала барьера со стороны оболочки.

2. Способ по п.1, в котором по меньшей мере один химический элемент в материале барьера со стороны топлива характеризуется третьим расстоянием внутренней диффузии в материал оболочки при размещении в контакте с материалом оболочки в течение 2 месяцев и выдержке при 650°C, и по меньшей мере один химический элемент в материале барьера со стороны оболочки характеризуется четвертым расстоянием внутренней диффузии в материал оболочки при размещении в контакте с материалом оболочки в течение 2 месяцев и выдержке при 650°C, причем третье расстояние внутренней диффузии больше, чем четвертое расстояние внутренней диффузии.

3. Способ по п.1, в котором исходный компонент представляет собой оболочку, второй слой представляет собой барьер со стороны оболочки, третий слой представляет собой барьер со стороны топлива, и последний слой представляет собой топливный компонент.

4. Способ по п.1, в котором исходный компонент представляет собой барьер со стороны оболочки, второй слой представляет собой оболочку, третий слой представляет собой барьер со стороны топлива, и последний слой представляет собой топливный компонент.

5. Способ по п.1, в котором исходный компонент представляет собой барьер со стороны топлива, второй слой представляет собой барьер со стороны оболочки, третий слой представляет собой оболочку, и последний слой представляет собой топливный компонент.

6. Способ по п.1, в котором исходный компонент представляет собой барьер со стороны топлива, второй слой представляет собой топливный компонент, третий слой представляет собой барьер со стороны оболочки, и последний слой представляет собой оболочку.

7. Способ по п.1, в котором исходный компонент представляет собой топливный компонент, второй слой представляет собой барьер со стороны топлива, третий слой представляет собой барьер со стороны оболочки, и последний слой представляет собой оболочку.

8. Способ по п.3, в котором барьер со стороны оболочки прикрепляют к оболочке посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны оболочки на оболочку.

9. Способ по п.3, в котором барьер со стороны топлива прикрепляют к барьеру со стороны оболочки посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны оболочки на барьер со стороны топлива.

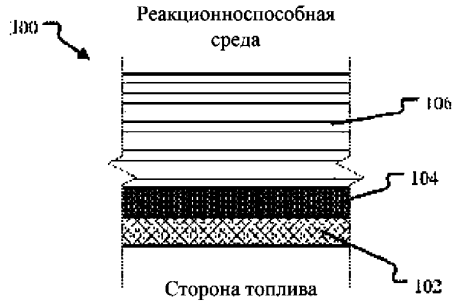
10. Способ по п.7, в котором барьер со стороны оболочки прикрепляют к барьеру со стороны топлива посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны топлива на барьер со стороны оболочки.

11. Способ по п.7, в котором барьер со стороны топлива прикрепляют к топливному компоненту посредством одного способа из механического прикрепления, электроосаждения, химического осаждения из паровой фазы или физического осаждения из паровой фазы материала барьера со стороны топлива на топливный компонент.

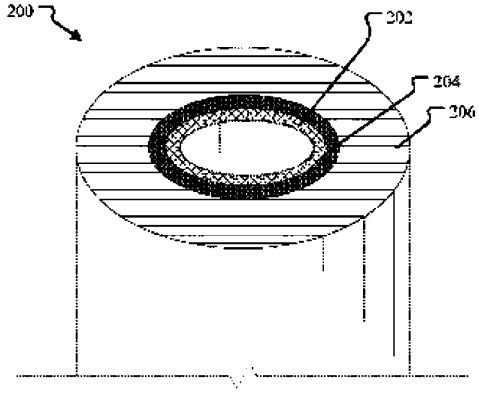
12. Способ по п.1, в котором материал барьера со стороны оболочки выбирают из Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, Ni, сплава любого из перечисленных материалов, керамики TiN, керамики ZrN, керамики VN, керамики TiC, керамики ZrC или керамики VC.

13. Способ по п.1, в котором материал барьера со стороны топлива выбирают из Nb, Mo, Ta, W, Re, Zr, V, Ti, Cr, Ru, Rh, Os, Ir, Sc, Fe, Ni, сплава любого из перечисленных материалов, керамики TiN, керамики ZrN, керамики VN, керамики TiC, керамики ZrC или керамики VC.

14. Способ по п.1, в котором исходный компонент, второй слой и третий слой совместно экструдируют.

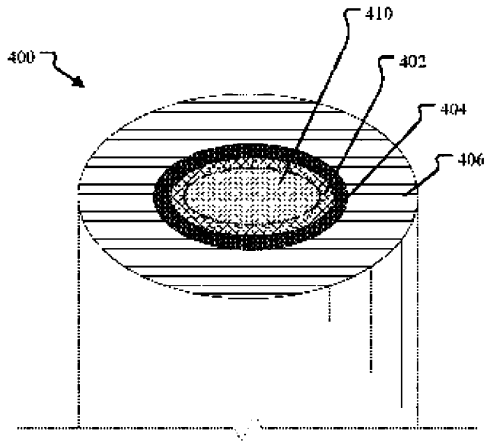


Фиг. 1

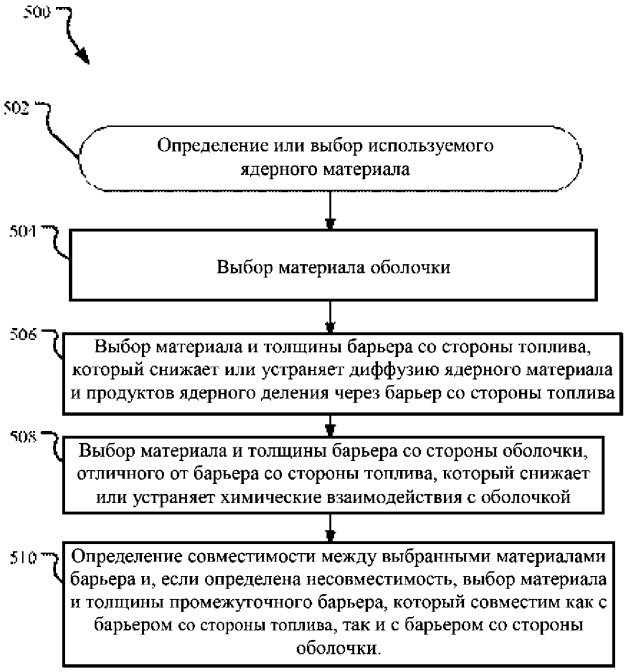


Фиг. 2

Фиг. 3

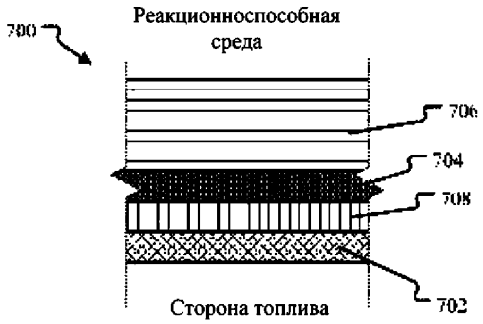


Фиг. 4

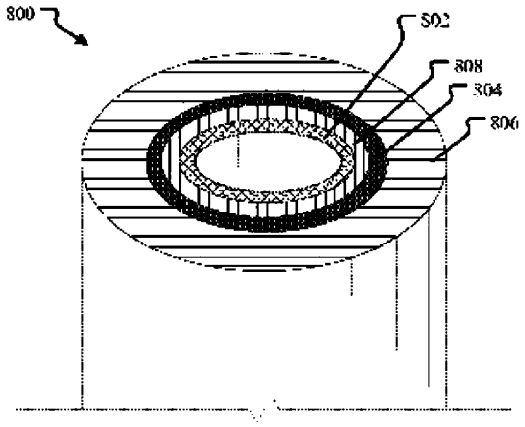


Фиг. 5

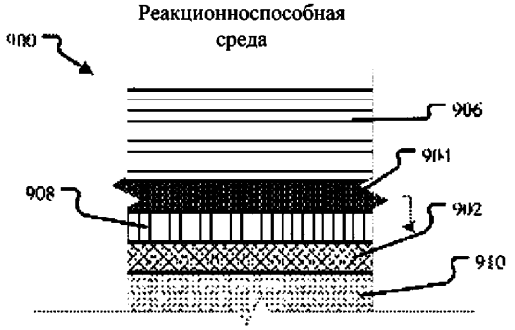
Фиг. 6



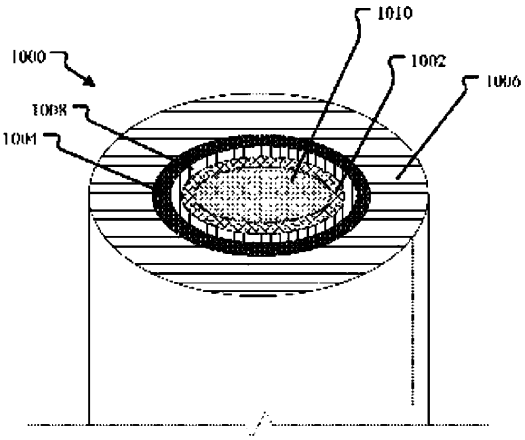
Фиг. 7



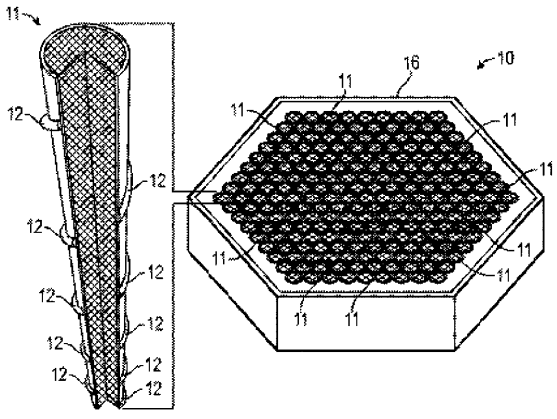
Фиг. 8



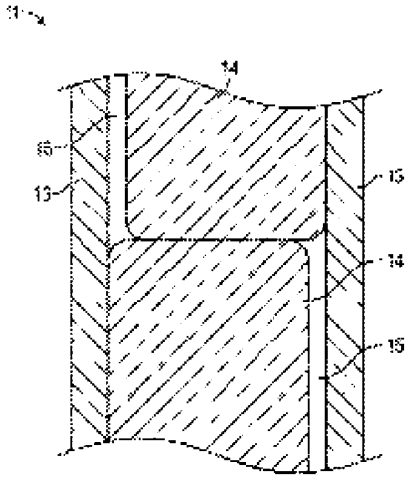
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11а



Фиг. 11b