

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **037475**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.04.01

(21) Номер заявки
201791844

(22) Дата подачи заявки
2016.02.18

(51) Int. Cl. **G21C 3/42 (2006.01)**
G21C 3/58 (2006.01)
G21C 3/62 (2006.01)

(54) ЯДЕРНЫЙ ШАРОВОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ И СПОСОБ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

(31) 62/118,119; 62/249,579; 15/044,706;
15/044,747

(32) 2015.02.19; 2015.11.02; 2016.02.16;
2016.02.16

(33) US

(43) 2017.12.29

(86) PCT/US2016/018500

(87) WO 2016/134163 2016.08.25

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
Экс-ЭНЭРДЖИ, ЛЛС (US)

(72) Изобретатель:
**Паппано Питер, Ван Стаден Мартин
Питер (US)**

(74) Представитель:
**Рыбина Н.А., Рыбин В.Н., Рогачева
Е.А. (RU)**

(56) US-B1-7666463
WO-A1-2005091306
WO-A1-2008086033
WO-A1-9962074
JP-A-2005195454
US-A1-2012140867

(57) Способ изготовления ядерных тепловыделяющих элементов может включать формирование графитовой основной части тепловыделяющего элемента; нанесение первого слоя графита и/или графитовых сфер на основную часть; нанесение первого слоя топливных частиц, частиц выгорающего поглотителя и/или воспроизводящих частиц на первый слой графита и/или графитовых сфер; формирование второго графитового слоя графита и/или графитовых сфер на первом слое частиц; нанесение второго слоя топливных частиц, частиц выгорающего токсичного поглотителя и/или воспроизводящих частиц на второй слой графита и/или графитовых сфер; и формирование графитовой верхней части тепловыделяющего элемента. Смежные топливные частицы, частицы выгорающего токсичного поглотителя и/или воспроизводящие частицы первого слоя пространственно разнесены, в сущности, на одинаковое расстояние, при этом смежные топливные частицы, частицы выгорающего токсичного поглотителя и/или воспроизводящие частицы второго слоя пространственно разнесены, в сущности, на одинаковое расстояние. Тепловыделяющие элементы могут представлять собой сферические тепловыделяющие элементы. Топливные частицы могут представлять собой трехструктурно-изотропические частицы, не содержащие покрытия.

B1**037475****037475****B1**

Уровень техники

Высокотемпературные реакторы с газовым охлаждением (HTGR) являются довольно перспективными в плане высокоэффективного и в сущности безопасного производства электроэнергии. Конструкции HTGR обычно содержат топливо, изолированное внутри слоев графитового замедлителя, и выполненное с множеством физических барьеров для минимизации возможности выхода продуктов деления. Кроме того, отрицательные характеристики ответной температурной реакции топлива в реакторе HTGR приводят к автоматическому прекращению цепной реакции ядерного деления при превышении температурой безопасных уровней. Такие специфические характеристики HTGR обеспечивают конструкцию в сущности безопасных реакторов с минимальным количеством аварийных систем охлаждения активной зоны реактора.

Один из типов реактора HTGR известен как реактор с засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов. В такой конструкции HTGR ядерное топливо заключено внутри многослойных керамических частиц, которые в свою очередь заключены внутри многослойных графитовых сфер, называемых "шаровыми тепловыделяющими элементами". Сферическая природа шаровых тепловыделяющих элементов позволяет газу проходить между сферами для обеспечения отвода тепла от реактора, в то же время обеспечивая самособирающуюся конструкцию активной зоны реактора. Шаровые тепловыделяющие элементы просто загружают в цилиндрическую активную зону реактора, сформированную неплотно упакованными графитовыми блоками, обеспечивающими конструктивную опору для шаровых тепловыделяющих элементов для того, чтобы они оставались в хаотично упакованной цилиндрической форме. Во время заправки топливом отработавшее топливо может быть легко удалено с помощью устройства для выгрузки шаровых тепловыделяющих элементов, которое обеспечивает удаление одного шарового тепловыделяющего элемента за один раз перед подачей отработавшего шарового тепловыделяющего элемента в контейнер для отработавшего топлива с использованием лишь силы гравитации. Свежие шаровые тепловыделяющие элементы загружают в верхнюю часть корзины активной зоны реактора также с использованием гравитационной системы подачи.

Сущность изобретения

Примеры воплощений обеспечивают способы массового производства тепловыделяющих элементов, выполненных с возможностью использования в активной зоне высокотемпературного реактора с газовым охлаждением (HTGR). Указанные способы изготовления воплощений могут включать формирование тепловыделяющих элементов с применением аддитивных способов изготовления основной части, подобных способам 3D-печати, обеспечивающим точное расположение топливных частиц в топливной зоне конструкции тепловыделяющего элемента. Способы воплощений обеспечивают эффективное и высококачественное изготовление тепловыделяющих элементов на основе графита, имеющих множество форм и размеров. Одно конкретное применение способов воплощений представляет собой изготовление сферических тепловыделяющих элементов, называемых "шаровыми тепловыделяющими элементами", предназначенных для использования в активных зонах реакторов с засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов (HTGR).

В конкретном воплощении способ изготовления может включать: формирование графитовой основной части тепловыделяющего элемента с использованием 3D-печати/аддитивных способов изготовления; формирование первого графитового слоя из одного из графитового порошка, графитовых сфер или комбинации графитового порошка и графитовых сфер на графитовой основной части с использованием 3D-печати/аддитивных способов изготовления; нанесение первого слоя топливных частиц на графитовую основную часть с использованием первой позиционирующей головки источника; формирование второго графитового слоя из одного из графитового порошка, графитовых сфер или комбинации графитового порошка и графитовых сфер на графитовой основной части с использованием 3D-печати/аддитивных способов изготовления; нанесение второго слоя топливных частиц на второй графитовый слой с использованием второй позиционирующей головки; и формирование графитовой верхней части тепловыделяющего элемента и/или последнего графитового слоя с использованием 3D-печати/аддитивных способов изготовления, при этом первая позиционирующая головка размещает топливные частицы в заданных местах на первом слое с обеспечением в сущности равномерного пространственного разнесения, и вторая позиционирующая головка размещает топливные частицы в заданных местах второго слоя с обеспечением пространственного разнесения на такое же расстояние и с вертикальным смещением относительно положений топливных частиц в первом слое.

В некоторых воплощениях графитовая основная часть шарового тепловыделяющего элемента может быть сформирована посредством последовательного формирования слоев из графита с увеличивающимися радиусами с использованием 3D-печати/аддитивных способов изготовления для формирования части сферы. В некоторых воплощениях топливная зона шарового тепловыделяющего элемента может быть сформирована посредством многократной укладки слоев, включающих топливные частицы, способом, аналогичным способу формирования первого и второго слоев, с использованием 3D-печати/аддитивных способов изготовления и позиционирующих головок различных геометрий, для формирования приблизительно сферической топливной зоны. В некоторых воплощениях формирование графитовой верхней части шарового тепловыделяющего элемента на втором графитовом слое может

быть выполнено посредством формирования множества слоев с постепенно уменьшающимися радиусами с использованием 3D-печати/аддитивных способов изготовления.

Различные воплощения обеспечивают возможность использования не содержащих покрытия трехструктурно-изотропических топливных частиц (TRISO) в тепловыделяющих элементах. Примеры воплощений включают тепловыделяющие элементы (например, шаровые тепловыделяющие элементы), изготовленные с помощью способа, кратко изложенного выше.

Примеры воплощений настоящего изобретения обеспечивают шаровой тепловыделяющий элемент, выполненный с возможностью использования в активной зоне высокотемпературного реактора с засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов и газовым охлаждением, при этом шаровой тепловыделяющий элемент содержит: слои из топливных частиц; графитовые слои, расположенные между указанными слоями из топливных частиц, при этом смежные топливные частицы по меньшей мере одного из слоев из топливных частиц пространственно разнесены друг от друга в сущности на одинаковое расстояние.

Краткое описание чертежей

Прилагаемые чертежи, включенные в настоящий документ и составляющие часть настоящего описания, показывают примерные воплощения изобретения и вместе с общим описанием, приведенным выше, и подробным описанием, приведенным ниже, служат для объяснения особенностей изобретения.

Фиг. 1 - вид в поперечном сечении высокотемпературного реактора с засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов и газовым охлаждением, пригодного для использования с различными воплощениями.

Фиг. 2 - изображение поперечного сечения шарового тепловыделяющего элемента согласно различным воплощениям.

Фиг. 3 - изображение поперечного сечения покрытой частицы ядерного топлива TRISO.

Фиг. 4 - таблица, в которой перечислены параметры примера конфигурации для шаровых тепловыделяющих элементов и топливных частиц, пригодных для использования с различными воплощениями.

Фиг. 5A - вид в поперечном сечении сбоку шарового тепловыделяющего элемента согласно различным воплощениям настоящего изобретения.

Фиг. 5B - вид сверху в поперечном сечении вдоль слоя топливных частиц шарового тепловыделяющего элемента согласно фиг. 5A, также показывающий лежащие ниже слои топливных частиц.

Фиг. 5C - перспективный вид в поперечном сечении шарового тепловыделяющего элемента согласно различным воплощениям настоящего изобретения.

Фиг. 5D - перспективный вид в поперечном сечении шарового тепловыделяющего элемента согласно различным воплощениям настоящего изобретения.

Фиг. 6A - блок-схема, на которой показан способ формирования шарового тепловыделяющего элемента согласно различным воплощениям настоящего изобретения.

Фиг. 6B - графическое изображение операций способа согласно фиг. 6A.

Фиг. 7A, 7B, 7C, 8A, 8B, 8C, 9A, 9B, 9C, 10A, 10B и 11 - увеличенные изображения операций, показанных на фиг. 6B.

Подробное описание

Различные воплощения будут подробно описаны со ссылкой на прилагаемые чертежи. По возможности, для обозначения одинаковых или подобных деталей на всех чертежах будут использоваться одинаковые ссылочные номера. Ссылки, сделанные на конкретные примеры и реализации, приведены в качестве примеров и не предназначены для ограничения объема изобретения или формулы изобретения.

Различные воплощения обеспечивают способы массового производства тепловыделяющих элементов, предназначенных для использования в активной зоне высокотемпературного реактора с газовым охлаждением (HTGR), обеспечивающие более высокую производительность, более низкую стоимость и более высокое качество, чем доступные при стандартных способах изготовления. Способы воплощений включают формирование тепловыделяющих элементов (например, шаровых тепловыделяющих элементов) с использованием аддитивных способов изготовления, таких как способы трехмерной печати (3D-печать), и точное размещение частиц топлива, выгорающего токсичного поглотителя и/или воспроизводящих материалов в топливной зоне конструкции тепловыделяющего элемента.

Частицы, размещаемые в топливной зоне тепловыделяющих элементов, могут включать топливные (например, делящиеся) элементы (например, U233, U235, Th231 и/или Pu239), воспроизводящие элементы (например, U238 и Th232), выгорающие токсичные поглотители (например, B, Hf и т.п.), а также комбинации топливных элементов, воспроизводящих элементов и выгорающих токсичных поглотителей. Как хорошо известно, топливо на основе урана включает смесь делящегося изотопа (U235) и воспроизводящего изотопа (U238) урана. Кроме того, в течение срока службы реактора воспроизводящие элементы/изотопы (например, U238 и Th232) превращаются в делящиеся (например, топливные) элементы (например, Pu239 и U233) и, таким образом, при работе реактора воспроизводящие частицы превращаются в топливные частицы. Также, некоторые конструкции реакторов могут включать выгорающие токсичные поглотители (например, B, Th), смешанные с топливными элементами. Таким образом, для простоты ссылки термин "топливная частица" в настоящем документе используется для ссылки в целом на части-

цы, включающие топливные (например, делящиеся) элементы, воспроизводящие элементы (например, элементы, превращающиеся в делящиеся элементы в результате поглощения нейтронов), выгорающие токсичные поглотители и любые их смеси.

Использование точного размещения топливных частиц и 3D-печати/аддитивных способов изготовления для формирования тепловыделяющих элементов обеспечивает возможность более точного контроля состава графита во всем тепловыделяющем элементе, а также возможность контролируемого разделения частиц топлива/токсичного поглотителя/воспроизводящего элемента в топливной зоне (т.е., в "упаковываемой фракции" топлива в топливной зоне) шарового тепловыделяющего элемента. Следовательно, способы воплощений обеспечивают изготовление более высококачественных тепловыделяющих элементов, чем изготавливаемые посредством стандартных способов, при этом они также позволяют снизить стоимость изготовления, повысить выход и улучшить процесс контроля качества. Использование 3D-печати/аддитивных способов изготовления обеспечивает эффективное и высокопроизводительное изготовление тепловыделяющих элементов, характеризующихся сложными геометриями, таких как сферические тепловыделяющие элементы. Кроме того, способы воплощений подходят для масштабирования до производственных линий, способных производить большие объемы тепловыделяющих элементов экономически эффективно и с жестким контролем качества.

Выражение "приведенный в качестве примера" используется в настоящем документе со смыслом "служащий в качестве примера, образца или иллюстрации". Любое воплощение, описанное в настоящем документе как "приведенное в качестве примера", не обязательно должно рассматриваться в качестве предпочтительного или преимущественного по сравнению с другими воплощениями.

Различные способы воплощений особенно подходят для изготовления сферических тепловыделяющих элементов для использования в реакторах HTRG с засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов. Один из примеров реактора HTGR с засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов показан на фиг. 1. На этом изображении показано размещение шаровых тепловыделяющих элементов в топливной зоне. Показанный пример шарового тепловыделяющего элемента представляет собой сферу с диаметром приблизительно 6 см (приблизительно размер бейсбольного мячика), хотя шаровые тепловыделяющие элементы могут быть больше или меньше, например, их диаметр может составлять от приблизительно 3 см до приблизительно 12 см. Шаровые тепловыделяющие элементы загружают в корзину активной зоны реактора для создания активной зоны реактора. В такой конструкции воплощения стальной сосуд высокого давления содержит внутри себя корзину активной зоны реактора, поддерживающую графитовые отражающие блоки, образующие внутреннее пространство, в котором размещаются шаровые тепловыделяющие элементы для формирования цилиндрической активной зоны реактора. Стержни регулирования мощности входят в сосуд высокого давления и затем входят в графитовые отражающие блоки. Охлаждающий газ поступает в сосуд высокого давления через выпускное отверстие для газа через графитовые отражающие блоки и активную зону, образованную шаровыми тепловыделяющими элементами, и выходит через выпускное отверстие для газа (не показано на фиг. 1). В примере реактора с засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов, показанном на фиг. 1, в активную зону реактора может содержаться приблизительно 170000 шаровых тепловыделяющих элементов, каждый из которых может включать приблизительно 9 г топлива или любого желаемого топлива на основе тяжелого металла.

Шаровые тепловыделяющие элементы изготовлены преимущественно из графита, который выступает в качестве замедлителя нейтронов в реакторе, а также обеспечивает конструктивную опору для отдельных топливных частиц. Возникающее в результате деления тепло проводится через шаровой тепловыделяющий элемент к его поверхности, где тепло удаляется посредством охлаждающего газа (например, посредством гелия или смеси гелия с аргоном), протекающего вокруг шаровых тепловыделяющих элементов, и выпускается из активной зоны реактора к системе преобразования энергии (не показана).

На фиг. 2 в поперечном сечении показан шаровой тепловыделяющий элемент 200 стандартного реактора с засыпкой из шаровых тепловыделяющих элементов. Шаровой тепловыделяющий элемент 200 выполнен из графитовой матрицы 202, заключающей в себе большое количество небольших топливных частиц 204, видимых как небольшие точки в направлении к центру 206 шарового тепловыделяющего элемента 200, показанного на фиг. 2. Внешняя поверхность шарового тепловыделяющего элемента может быть сформирована свободной от топлива керамической оболочкой 208 или покрытием, обеспечивающими конструктивную жесткость и защиту графита от эрозии и воздействия кислорода. Наружные 0,5 см шарового тепловыделяющего элемента 200 могут представлять собой свободную от топлива зону, не содержащую топливных частиц 204 и выполненную исключительно из материала графитовой матрицы 202.

Стандартные шаровые тепловыделяющие элементы 200 изготавливают посредством смешивания топливных частиц 204 с графитом, который формирует матрицу 202. Как показано на фиг. 2, такой неконтролируемый процесс может являться причиной неравномерного распределения топливных частиц 204 в матрице 202. Меры борьбы с неизбежным скоплением топливных частиц требуют снижения пределов энерговыделения и/или выгорания, свойственных для шаровых тепловыделяющих элементов. Этот процесс также представляет собой ручной групповой процесс, ограничивающий скорость производства шаровых тепловыделяющих элементов 200, при этом данный процесс также может являться причиной

непостоянного качества изготовления шаровых тепловыделяющих элементов 200.

Как показано на фиг. 3, топливная частица 204 имеет покрытую многослойную конструкцию с топливным сердечником 212, окруженным множеством слоев керамических и графитовых материалов. В частности, топливный сердечник 212 может включать делящийся оксид (например, UO_2 или ThO_2/UO_2) или карбид, окруженные буферным слоем 213. Буферный слой 213 может включать пористый углеродный материал, такой как графит. Буферный слой 213 компенсирует расширение топливного сердечника 212 и служит в качестве резервуара для газообразных продуктов деления. Буферный слой 213 окружен плотным внутренним углеродным слоем 214, например, слоем пиролитического углерода. Внутренний углеродный слой 214 закрывает буферный слой 213 и уменьшает миграцию радионуклидов. Внутренний углеродный слой 214 окружен керамическим слоем 216, например, слоем карбида кремния или карбида циркона. Керамический слой 216 сдерживает продукты деления (т.е., удерживает продукты деления внутри сердечника), тем самым предотвращая миграцию продуктов деления из сердечника и улучшая конструктивную жесткость. Керамический слой 216 покрыт внешним углеродным слоем 218, который также может содержать пиролитический углерод. Внешний углеродный слой 218 выступает в роли дополнительного барьера, препятствующего выпуску газообразных продуктов деления. Такие топливные частицы 204 могут называться трехструктурно-изотропическими (TRISO) топливными частицами. Многослойная конструкция топливных частиц была хорошо испытана и характерна для более ранних конструкций HTGR, при этом она проявляет хорошие характеристики в плане удерживания продуктов деления в экстремальных температурных условиях.

Дополнительные подробности одного из примеров шарового тепловыделяющего элемента и включенных в него топливных частиц перечислены в таблице, показанной на фиг. 4. В этой таблице перечислены диаметры используемых тепловыделяющих элементов, толщины внешней свободной от топлива графитовой оболочки, диаметры и плотности топливных сердечников, примеры материалов, составляющих покрытия топливных частиц и примеры топливных загрузок.

Обычно способы формирования графитового шарового тепловыделяющего элемента включают трудоемкие процессы, требующие множества промежуточных проверок качества для обеспечения того, чтобы человеческий фактор не стал причиной плохого качества шаровых тепловыделяющих элементов. Рассмотрим снова фиг. 2; одной из ключевых задач при изготовлении шарового тепловыделяющего элемента является обеспечение однородного распределения топливных частиц 204 во внутренней части 206 графитовой матрицы шарового тепловыделяющего элемента 200. Как правило, процесс гомогенизации, осуществляется посредством хаотичного перемешивания графитовой матрицы перед формированием шарового тепловыделяющего элемента.

Тем не менее, этот процесс основан на получении статистически однородной смеси покрытых частиц и материала графитовой матрицы. Дополнительным ограничением этого процесса является тот факт, что он не подходит для массового производства шаровых тепловыделяющих элементов. Кроме того, такие процессы не могут обеспечить точное расположение топливных частиц в шаровом тепловыделяющем элементе.

Стандартные способы формирования шаровых тепловыделяющих элементов включают этап сжатия сердцевин и этап сжатия свободной от топлива зоны. Вследствие этих этапов сжатия топливные частицы, используемые в таких способах, требуют наличия дополнительного слоя покрытия для выдерживания высоких давлений, прилагаемых во время этапов сжатия, а также для обеспечения достаточного пространственного разнесения между топливными частицами в хаотично распределенных топливных частицах/графитовой матрице.

Для преодоления таких ограничений стандартных способов различные воплощения включают способ формирования шарового тепловыделяющего элемента, обеспечивающий возможность точного размещения топливных частиц, в то же время упрощающий изготовление матрицы, удерживающей топливные частицы и/или частицы выгорающего токсичного поглотителя в сердцевине и свободной от топлива графитовой оболочке, окружающей сердцевину. В частности, различные воплощения обеспечивают способ использования 3D-печати/аддитивных способов изготовления для формирования шаровых тепловыделяющих элементов из мелкодисперсного графитового порошка и/или графитовых частиц или сфер приблизительно такого же размера, как топливные частицы. Тепловыделяющие элементы различных форм и размеров, например, приблизительно сферические тепловыделяющие элементы, формируют с использованием 3D-печати/аддитивных способов изготовления для скрепления тонких слоев графита с формированием дисков с различными диаметрами. Сформированные сферические тепловыделяющие элементы затем сжимают с использованием изостатического пресса в соответствии со стандартными способами изготовления для формирования готового шарового тепловыделяющего элемента.

Различные воплощения способа обеспечивают возможность контролируемого расположения топливных частиц и/или частиц выгорающего токсичного поглотителя в топливной зоне, сформированной послойно, благодаря чему можно контролировать расстояние пространственного разнесения между топливными частицами внутри слоев и между слоями. Этот способ также уменьшает количество отходов, поскольку поддерживающий порошок удаляется и используется повторно, в отличие от стандартного способа изготовления шарового тепловыделяющего элемента, в соответствии с которым требуется под-

резание шарового тепловыделяющего элемента до заданных размеров на станке после сжатия, в результате чего возникает потеря графита в виде стружки.

Кроме того, благодаря контролю размещения частиц топлива, токсичного поглотителя и воспроизводящего элемента внутри тепловыделяющих элементов (например, внутри шаровых тепловыделяющих элементов), способы согласно различным воплощениям не требуют учета напряжений, прикладываемых к топливным частицам, когда две или более частиц соприкасаются во время приложения высоких давлений, используемых в ходе процесса формирования шаровых тепловыделяющих элементов. Исключение вероятности возникновения высоких локальных напряжений вследствие сжатия частиц друг о друга исключает необходимость в наличии дополнительного покрытия на топливных частицах, как правило, наносимого для придания топливным частицам достаточной прочности для сопротивления таким напряжениям. Таким образом, в отличие от стандартных способов изготовления шаровых тепловыделяющих элементов, в различных воплощениях могут быть использованы топливные частицы, не содержащие покрытия, например, непокрытые топливные частицы TRISO, описанные в настоящем документе. Это сокращает количество этапов при изготовлении топливных частиц TRISO, тем самым уменьшая затраты и повышая производительность процесса.

На фиг. 5A показан вид в поперечном сечении сбоку шарового тепловыделяющего элемента 500 согласно различным воплощениям настоящего изобретения. На фиг. 5B показан вид сверху в поперечном сечении шарового тепловыделяющего элемента 500, выполненном вдоль слоя 532D топливных частиц согласно фиг. 5A, и показывающий лежащие ниже слои 532C-A топливных частиц. Опять-таки, для изготовления тепловыделяющих элементов различных форм и размеров могут быть использованы различные воплощения, и при этом они не ограничиваются изготовлением сферических тепловыделяющих элементов.

В соответствии с фиг. 5A и 5B шаровой тепловыделяющий элемент 500 содержит топливную зону 510 и свободную от топлива оболочку 520, расположенную вокруг топливной зоны 510. Топливная зона 510 и свободная от топлива оболочка 520 сформированы посредством нанесения графитовых слоев 550 со связующим веществом, нанесенным для удерживания графита вместе в виде некоторой формы до конечной обработки (например, до спекания). Например, один и тот же графитовый слой может формировать слой топливной зоны 510 и слой свободной от топлива оболочки 520. Фактически, в отличие от стандартных шаровых тепловыделяющих элементов, одни и те же процессы используются для формирования топливной зоны 510 и свободной от топлива оболочки 520, что обеспечивает возможность формирования шаровых тепловыделяющих элементов (перед сжатием и спеканием) с помощью одного непрерывного процесса. Посредством использования 3D-печати/аддитивных способов изготовления для нанесения связующего вещества на каждый слой можно контролировать форму шарового тепловыделяющего элемента 500. В некоторых воплощениях, как показано на фигурах, шаровой тепловыделяющий элемент 500 может быть сферическим. Опять же, тепловыделяющие элементы, изготовленные согласно различным воплощениям, не ограничиваются какой-либо конкретной формой или размером. Например, тепловыделяющие элементы, изготовленные согласно различным воплощениям, могут быть яйцевидными, в форме таблетки, призматическими, цилиндрическими, коническими, или они могут иметь подобные формы. Некоторые тепловыделяющие элементы могут быть изготовлены с использованием способов воплощений с внутренними каналами для протекания охлаждающего вещества через тепловыделяющий элемент, обеспечивая при этом, чтобы графит не наносился в местах внутренних каналов. В некоторых воплощениях форма шарового тепловыделяющего элемента 500 может быть выбрана в соответствии с его соответствующими характеристиками, такими как интенсивность деления и/или характеристики конвективной теплопередачи.

Как хорошо известно, в дополнение к делящемуся и способного к превращению топлива на основе тяжелого металла, в топливную зону 510 могут быть загружены выгорающие токсичные поглотители для управления активностью реакции. Выгорающие токсичные поглотители могут быть включены в шаровые тепловыделяющие элементы различными способами, один из которых представляет собой включение в форме частиц, включенных в топливную зону с топливными частицами, а другой из которых представляет собой включение в форме смесей в топливные частицы. В таких воплощениях частицы выгорающего токсичного поглотителя могут быть расположены внутри слоев топливной зоны 510 таким же образом, как и топливные частицы. Например, один или более слоев топливной зоны 510 могут включать и топливные частицы (например, делящиеся частицы), и частицы выгорающего токсичного поглотителя. Конфигурация, в виде которой расположены топливные частицы и частицы выгорающего токсичного поглотителя, может быть в сущности равномерной или она может варьироваться в соответствии с местом в топливной зоне 510. В других воплощениях топливная зона 510 также может включать воспроизводящие частицы, такие как делящиеся частицы тория. Таким образом, в целях простоты описания, все частицы, размещаемые в слоях топливной зоны 510, в настоящем документе именуется "топливными частицами," независимо от того, частицы включают или в сущности представляют собой только выгорающие токсичные поглотители или воспроизводящие частицы. Таким образом, ссылки на топливные частицы в описании воплощений и формуле изобретения не предназначены для исключения включения выгорающих токсичных поглотителей в частицы. Другими словами, ссылки на топливные частицы в опи-

сании и формуле изобретения предназначены для указания на частицы, содержащие только топливо, частицы, содержащие некоторое количество топлива и некоторое количество выгорающих токсичных поглотителей, а также частицы, содержащие только выгорающие токсичные поглотители.

Топливная зона 510 включает топливные частицы 530, расположенные между графитовыми слоями 550 и/или вложенные в них. Топливные частицы 530 могут быть подобны топливным частицам 204, описанным выше. В некоторых воплощениях шаровой тепловыделяющий элемент 500 имеет диаметр от приблизительно 5 см до приблизительно 7 см, например, приблизительно 6 см в готовом состоянии, т.е. в сжатом и спеченном. Свободная от топлива оболочка может иметь толщину от приблизительно 0,3 см до приблизительно 1,5 см, например, приблизительно 1 см. Однако, различные воплощения не ограничиваются любыми конкретными размерами шарового тепловыделяющего элемента. Способ обеспечивает возможность изготовления любого диаметра топливной зоны 510 и готового шарового тепловыделяющего элемента 500.

Топливные частицы 530 расположены в слоях 532 топливных частиц, разделенных графитовыми слоями 550 и/или вложенных в них. В качестве примера, на фиг. 5А и 5В показано только четыре слоя 532 топливных частиц (слои 532А-532D). Тем не менее, шаровой тепловыделяющий элемент 500 может содержать любое количество слоев 532 топливных частиц, пригодных для распределения топливных частиц 530 по топливной зоне 510. Например, топливная зона 510 шарового тепловыделяющего элемента 500 может включать от 10 до 32 слоев 532 топливных частиц, от 12 до 30 слоев 532 топливных частиц, от 14 до 28 слоев 532 топливных частиц, например, приблизительно 16 слоев 532 топливных частиц. Также можно варьировать конфигурации расположения частиц в соответствии с энерговыделением заданного топлива и, таким образом, различные конфигурации расположения частиц входят в объем настоящего изобретения.

Хотя шаровой тепловыделяющий элемент 500 описан, как изготовленный в виде отдельных графитовых слоев 550, как только шаровой тепловыделяющий элемент готов по завершении всех производственных этапов, эти отдельные графитовые слои 550 могут стать неразличимыми друг от друга в шаровом тепловыделяющем элементе 500. Как правило, процессы сжатия и спекания вызывают сплавление слоев. Другими словами, графитовые слои 550 могут быть сконфигурированы и обработаны так, чтобы они фактически формировали единое графитовое тело, в котором расположены слои 532 топливных частиц, в частности после сжатия и спекания шаровых тепловыделяющих элементов 500.

Для простоты пояснения, изготовление шарового тепловыделяющего элемента 500 делится на формирование основной части 560, центральной части 570, включающей топливную зону, и верхней части 580, хотя процессы формирования этих трех частей могут осуществляться в ходе одного непрерывного процесса. Основная часть 560 и верхняя часть 580 охватывают нанесенные слои, которые не включают топливные частицы, тогда как центральная часть 570 охватывает слои, изготовленные как из кольца из графита, которое формирует свободную от топлива оболочку, так и из центрального кольцевого слоя, включающего топливные частицы, формирующие топливную зону. Основная часть 560 может включать часть шарового тепловыделяющего элемента 500, расположенную ниже первого слоя 532А топливных частиц. Другими словами, основная часть 560 может включать части свободной от топлива оболочки 520 и топливной зоны 510, расположенные ниже самого нижнего слоя 532А топливных частиц. Основная часть 560 может также включать часть топливной зоны 510, в которую по меньшей мере частично вложен первый слой 532А топливных частиц. Верхняя часть 580 включает соответствующую часть шарового тепловыделяющего элемента 500, находящуюся сверху самого верхнего слоя 532 топливных частиц (не показан). Центральная часть 570 включает оставшуюся часть шарового тепловыделяющего элемента 500. Основная часть 560 и верхняя часть 580 могут характеризоваться размером хорды, равным толщине свободной от топлива оболочки в центральной части 570.

Топливные частицы 530 в каждом слое 532 топливных частиц расположены в виде некоторой конфигурации, например, с использованием размещающей головки источника, которая позиционирует отдельные топливные частицы в графитовом слое так, чтобы смежные топливные частицы 530 были равномерно пространственно разнесены друг от друга на первое расстояние. Кроме того, слои 532 могут быть равномерно пространственно разнесены друг от друга на толщину слоя, при этом частицы в каждом слое смещены относительно друг друга для обеспечения второго расстояния пространственного разнесения. Первое и второе расстояния могут быть одинаковыми или различными. Первое и второе расстояния могут зависеть от общей загрузки тяжелого металла шарового тепловыделяющего элемента 500. Топливные частицы 530 могут быть расположены в слоях в виде равномерной конфигурации, такой как шестиугольная или квадратная, для формирования трехмерных конфигураций упаковки, при этом расстояния пространственного разнесения и конфигурации упаковки выбирают для достижения требуемых параметров. В некоторых воплощениях топливные частицы 530 могут быть расположены так, чтобы минимальное расстояние между смежными топливными частицами 530 в одном и том же слое 532 и между смежными топливными частицами 530 в различных смежных слоях 532 было одинаковым.

Другими словами, слои 532 топливных частиц могут быть пространственно разнесены друг от друга и сконфигурированы так, чтобы топливные частицы 530 были пространственно разнесены от смежных топливных частиц 530 в трех измерениях на минимальное расстояние, зависящее от общей загрузки тя-

желого металла шарового тепловыделяющего элемента 500. Например, на виде в перспективе на фиг. 5В топливные частицы 530 слоя 532С могут быть расположены между топливными частицами 530 слоя 532D. Другими словами, топливные частицы смежных слоев, таких как слои 532D и 532С, могут быть расположены таким образом, чтобы непосредственно не перекрываться друг с другом в вертикальном направлении. Распределение и пространственное разнесение топливных частиц внутри тепловыделяющих элементов не ограничиваются примерами, показанными на фигурах.

В различных воплощениях топливные частицы могут быть расположены в соответствии с множеством различных конфигураций слоев, в частности, конфигураций, обеспечивающих равномерное пространственное разнесение топливных частиц 530 со смежными топливными частицами 530. Например, топливные частицы могут быть расположены в тепловыделяющих элементах с использованием способов воплощений в виде одной из двух регулярных решеток, обеспечивающих наиболее высокую среднюю плотность; в виде гранецентрированной кубической (fcc) (также называемой плотно упакованной кубической), или в виде гексагональной плотно упакованной (hcp). Обе решетки основаны на листах из сфер (т.е., топливных частиц в данном случае), расположенных в вершинах треугольной мозаики, и отличаются в плане того, как листы укладываются друг на друга. Решетка fcc также известна математикам, как решетка, генерируемая системой корней A_3 .

Однако в некоторых воплощениях топливные частицы 530 могут быть расположены в шаровых тепловыделяющих элементах 500 в виде других конфигураций. В частности, топливные частицы могут быть нанесены с различными плотностями в различных областях топливной зоны 510 шарового тепловыделяющего элемента. Например, способы изготовления различных воплощений могут быть использованы для расположения топливных частиц в заданных местах внутри шаровых тепловыделяющих элементов таким образом, чтобы по мере увеличения расстояния от центра топливной зоны 510 плотность топливных частиц 530 могла также увеличиваться. Изготовление шаровых тепловыделяющих элементов таким образом может обеспечивать преимущества в плане энерговыделения, например, посредством способствования контролю пиковой температуры в центре шаровых тепловыделяющих элементов, при этом обеспечивая возможность большей загрузки топливных частиц в шаровых тепловыделяющих элементах. В частности, изменение плотности топливных частиц в радиальном направлении может быть равномерным (например, плотность может изменяться линейно или экспоненциально по мере удаления от центра топливной зоны 510). Например, плотность топливных частиц топливной зоны 510 может увеличиваться от центра до ее внешней поверхности. В других воплощениях плотность топливных частиц топливной зоны 510 может изменяться ступенчато в зависимости от расстояния от центра шарового тепловыделяющего элемента. Например, способы изготовления различных воплощений могут быть использованы для формирования центральной области, характеризующейся относительно низкой плотностью топливных частиц в топливной зоне 510, и периферической области, окружающей центральную область, характеризующейся относительно высокой плотностью топливных частиц. В других воплощениях способы изготовления различных воплощений могут быть использованы для формирования топливной зоны 510 с множеством концентрических периферических областей с различными плотностями топливных частиц.

Вариация плотности топливных частиц внутри шаровых тепловыделяющих элементов может быть реализована посредством исключения некоторого количества топливных частиц 530 из конкретной области топливной зоны 510, например, из центральной области топливной зоны 510, но при этом сохраняя пространственное разнесение топливных частиц 530 в слоях топливных частиц. Альтернативно, плотность топливных частиц может регулироваться посредством варьирования пространственного разнесения между смежными топливными частицами 530 в различных областях топливной зоны 510. Например, расстояние между топливными частицами 530 в центральной области может быть больше, чем данное расстояние в одной или более периферических областях топливной зоны 510. Способность способов изготовления различных воплощений располагать топливные частицы в специфических местах внутри шаровых тепловыделяющих элементов обеспечивает множество используемых конфигураций загрузки топливных частиц.

Шаровые тепловыделяющие элементы, изготовленные согласно различным воплощениям, могут включать композитные слои частиц, включающие различные типы частиц, включая делящиеся частицы, воспроизводящие частицы и частицы выгорающего токсичного поглотителя. Например, каждый слой топливных частиц шарового тепловыделяющего элемента может включать делящиеся частицы и частицы токсичного поглотителя, расположенные в виде конфигурации. Распределение топливных частиц (например, делящихся частиц) и частиц токсичного поглотителя может также варьироваться в топливной зоне 510. Например, центральная область топливной зоны 510 может характеризоваться более высокой плотностью частиц выгорающего токсичного поглотителя (например, более высоким соотношением частиц выгорающего токсичного поглотителя к топливным частицам), чем одна или более периферических областей топливной зоны 510. Другими словами, одна или более из периферических областей может характеризоваться более высокой плотностью делящихся частиц, чем центральная область. Более высокая плотность топливных частиц в периферической области и/или более высокое соотношение поглотителя к топливным частицам в центральной области могут обеспечивать улучшенные характеристики теплосе-

реноса, что обеспечивает возможность более высокой загрузки топливом каждого шарового тепловыделяющего элемента и/или может улучшить эффективность использования топлива в шаровом тепловыделяющем элементе.

На фиг. 5C показан перспективный вид в поперечном сечении шарового тепловыделяющего элемента 503, включающего композитный слой 533 частиц, изготовленный согласно различным воплощениям. Применительно к фиг. 5C, композитный слой 533 частиц может включать первые частицы 535 и вторые частицы 537, расположенные в виде конфигурации. Первые и вторые частицы 535, 537 могут быть выбраны, например, из делящихся частиц, частиц выгорающего токсичного поглотителя и воспроизводящих частиц.

Относительная плотность первых и вторых частиц 535, 537 внутри шарового тепловыделяющего элемента 503 может быть выбрана в соответствии с типом частиц. Например, композитный слой частиц может включать относительно большое количество делящихся частиц и относительно малое количество частиц выгорающего токсичного поглотителя. Альтернативно, композитный слой частиц может включать относительно большое количество воспроизводящих частиц и относительно малое количество делящихся частиц. В отдельных воплощениях первые частицы 535 могут представлять собой делящиеся частицы, а в качестве вторых частиц 537 могут быть частицы выгорающего поглотителя или частицы воспроизводящего материала.

В качестве примера на фиг. 5D показано, как способы изготовления различных воплощений могут быть использованы для формирования шаровых тепловыделяющих элементов 501 с центральным объемом V, содержащим небольшое количество топливных частиц/частиц 530 поглотителя, или не содержащим таких частиц. Такая конфигурация может в результате обеспечивать шаровые тепловыделяющие элементы, характеризующиеся более плоскими температурными профилями при работе реактора. Способы изготовления различных воплощений могут также быть использованы для контроля плотности графита в центральной полости V, с тем чтобы обеспечить область с меньшей прочностью в центре для обеспечения возможности расширения внутрь для ослабления давления внутри шаровых тепловыделяющих элементов, возникающего вследствие выделения газообразных продуктов деления.

На фиг. 6A показана блок-схема способа, на которой показан способ 5 формирования шарового тепловыделяющего элемента согласно различным воплощениям. На фиг. 6B графически показаны операции способа 5. Фиг. 7A, 7B, 7C, 8A, 8B, 9A, 9B, 9C, 10A, 10B и 11 представляют собой увеличенные изображения операций, показанных на фиг. 6B.

Что касается фиг. 6A, 6B и 7A-7C, при осуществлении операции 10 способ 5 включает формирование графитовой основной части 560 шарового тепловыделяющего элемента 500, как показано на фиг. 5A. В частности, операция 10 включает нанесение графитового порошка на основу 602 для формирования графитового слоя 600 (этап 1). Графитовый порошок может быть нанесен с использованием любого подходящего способа, такого как, например, устройство 610 для нанесения со щелевой головкой или подобного. Графитовый слой 600 затем сжимают (этап 2). Графитовый слой 600 может быть сжат с использованием вала 612. Тем не менее, могут быть использованы любые подходящие сжимающие устройства, например, вертикальный пресс или подобные. Сжатие обеспечивает равномерную упаковку графитового слоя 600.

Связующее вещество 700 может быть нанесено на графитовый слой 600 (этап 3), например, с использованием 3D-печати/аддитивных способов изготовления. Связующее вещество 700 может представлять собой жидкое связующее вещество, которое может быть напечатано на графитовом слое 600 с использованием, например, струйного принтера 710 или подобного. В частности, связующее вещество 700 может представлять собой связующее вещество на основе спирта или связующее вещество на основе воды. Связующее вещество 700 наносится на графитовый слой 600 в виде определенного рисунка. Например, связующее вещество 700 может быть нанесено в виде круглого рисунка, соответствующего части поперечного сечения шарового тепловыделяющего элемента 500.

Операция 10 (т.е., этапы 1-3) может повторяться многократно для увеличения толщины графитового слоя 600, при этом каждый слой имеет больший диаметр (в случае сферического тепловыделяющего элемента), и при этом графитовый слой 600 формирует основную часть 560 в виде части сферы, характеризующейся размером хорды приблизительно равным толщине свободной от топлива оболочки шарового тепловыделяющего элемента. Например, при каждом повторе операции 10 толщина графитового слоя 600 может увеличиваться на от приблизительно 0,05 мм до приблизительно 0,2 мм, например, на приблизительно 0,1 мм. Однако, толщина графитового слоя 600 может зависеть от минимального диаметра графитовых частиц графитового слоя 600.

Эта операция 10 формирования слоя может повторяться от приблизительно 50 до приблизительно 100 раз для формирования основной части 560, которая в сферических тепловыделяющих элементах представляет собой часть сферы. Например, операция 10 может повторяться, чтобы основная часть 560 имела толщину от приблизительно 0,3 см до приблизительно 1,5 см (например, приблизительно 1 см), и чтобы при этом толщина основной части 560 соответствовала толщине свободной от топлива оболочки 520. Как описано выше, основная часть 560 может также включать часть топливной зоны 510, расположенную ниже первого слоя 532A топливных частиц. Фактически, толщина основной части 560 может

быть увеличена на дополнительную величину (или основная часть может включать первый слой графита для формирования центральной части 570), например, на величину от приблизительно 1 мм до приблизительно 2 мм (например, на приблизительно 1,5 мм), чтобы основная часть 560 включала часть топливной зоны 510, в которой могут быть вложены топливные частицы 530, как рассмотрено ниже. Другими словами, основная часть 560 может иметь толщину от приблизительно 3 мм до приблизительно 12 мм, например, приблизительно 11,5 мм в случае типичных шаровых тепловыделяющих элементов; больше или меньше для других форм и размеров тепловыделяющих элементов.

Количество нанесенного графитового порошка 600 может варьироваться в соответствии с условиями обработки и характеристиками конструкции шарового тепловыделяющего элемента. Фактически, количество повторений операции 10 может быть соответствующим образом увеличено или уменьшено.

В некоторых воплощениях вместо или в дополнение к использованию графитового порошка для формирования каждого графитового слоя, графит может находиться в форме графитовых сфер приблизительно такого же размера, как и топливные частицы, которые могут быть смешаны с графитовым порошком. Сферический графит может быть особенно предпочтительным при формировании топливной зоны тепловыделяющего элемента, если графитовые сферы близки по размерам (т.е., приблизительно одинакового размера) к топливным частицам. Один из примеров подходящей формы графитовых сфер раскрыт в патенте US 8,173,208, в котором раскрыты композиции и способы для изготовления не содержащих порошка графитовых сфер. Такие графитовые сферы могут быть сформированы из графитового порошка и смолы. Одним из преимуществ использования графитовых сфер является то, что сферы приблизительно такого же размера как топливные частицы могут лучше поддерживать топливные частицы в слое, чем слой мелкодисперсного графитового порошка, вследствие их подобного размера и плотности. В некоторых воплощениях графитовый слой 600, сформированный посредством различных этапов формирования слоя, может представлять собой комбинацию графитового порошка и графитовых сфер. В некоторых воплощениях графитовые слои 600, не содержащие топливных частиц (т.е., слои, формирующие основную часть 560 и верхнюю часть шарового тепловыделяющего элемента), могут быть сформированы с использованием мелкодисперсного графитового порошка, при этом графитовые слои, содержащие топливные частицы (т.е., топливная зона тепловыделяющего элемента), могут быть сформированы с использованием графитовых сфер или смеси из графитовых сфер и графитового порошка. Кроме того, графитовые слои, содержащие топливные частицы (топливная зона), могут быть изготовлены посредством нанесения графитовых сфер в части центральной топливной зоны, где находится топливо, а также посредством нанесения графитового порошка в окружающей части 550 (фиг. 5B) или 535 (фиг. 5D).

В ходе операции 20, показанной на фиг. 6B, 8A и 8B, устройство 800 для нанесения, такое как позиционирующая головка источника, используется для нанесения слоя топливных частиц 530 на основную часть 560 (этап 4) или на слой графита (например, графитовый порошок, графитовые сферы или комбинация графитового порошка и графитовых сфер), сформированный на основной части 560. В частности, устройство 801 для нанесения может содержать по меньшей мере одну головку 820 источника для нанесения, выполненную с возможностью подъема и управления размещением топливных частиц 530 на графитовых слоях.

В головке 820 источника для нанесения может быть использовано множество или комбинация методов подъема и удерживания топливных частиц 530, включая вакуум и электростатические силы.

В одном из воплощений головка 820 для нанесения может содержать множество вакуумных трубок 830, расположенных в виде определенной конфигурации, соответствующей рисунку нанесения. В таком воплощении вакуум обеспечивается в вакуумных трубках 830 для подъема и удерживания топливных частиц 530 в головке 820 источника для нанесения. Топливные частицы могут быть освобождены при прижатии к графитовому слою посредством снятия вакуума или подачи давления через вакуумные трубки 830. Такое воплощение головки 820 источника для нанесения может именоваться "головкой для вакуумного нанесения".

В некоторых воплощениях в одной или более головках 820 для нанесения могут быть использованы электростатические силы для подъема и удерживания топливных частиц, при этом указанные головки источника могут именоваться "головками для электростатического нанесения." Топливные частицы 530 могут быть подняты головкой 820 источника для электростатического нанесения посредством подачи напряжения (положительного или отрицательного) на головку или удерживающие частицы детали с целью притягивания топливных частиц 530, например, в позиционирующие поры, как показано. Головки 820 для нанесения могут быть расположены поверх и прижаты к основной части 560, при этом заряд, подаваемый на головки 820 для нанесения, может быть нейтрализован, или полярность может быть изменена на противоположную для освобождения топливных частиц 530 на графит.

Головка 820 для нанесения прижимается к основной части 560 для внедрения топливных частиц 530 в слой графита, сформированный на основной части. Как было рассмотрено выше, этот слой графита может представлять собой слой графитового порошка, графитовых сфер или слой в виде комбинации графитового порошка и сфер, нанесенный поверх основной части. После вдавливания топливных частиц 530 в графитовый слой вакуум снимают и топливные частицы 530 освобождают. После сжатия топлив-

ные частицы 530 вдавливают в основную часть 560, и/или графитовый слой сжимают с использованием вала 612, например (этап 5). Таким образом наносят нижний слой 532А топливных частиц.

Устройство 810 для нанесения может содержать любое количество головок 820 для нанесения. Например, устройство 810 для нанесения может содержать одну головку 820 источника для нанесения для каждой конкретной конфигурации расположения топливных частиц 530 в слое 532 топливных частиц. Альтернативно, устройство 800 для нанесения может содержать один или более массивов 840 головок 820 для нанесения, при этом головки 820 каждого массива характеризуются одинаковой конфигурацией размещения, а различные массивы характеризуются различными конфигурациями размещения. Дополнительно или альтернативно, отдельные вакуумные трубки могут быть задействованы для варьирования конфигурации размещения топливных частиц, поднимаемых и наносимых в каждом слое для формирования конфигурации размещения. Устройство 800 для нанесения может содержать приводные механизмы 850 для подъема и опускания массива 840.

Сразу после нанесения слоя топливных частиц 530 способ переходит в выполнении операции 30, как показано на фиг. 6В, 9А и 9В. В ходе операции 30 графитовый слой 550 формируется посредством нанесения графитовых частиц на основную часть 560. В частности, графитовые частицы наносят для формирования графитового слоя 600, покрывающего топливные частицы 530 (этап 6). В частности, графитовый слой 600 может служить для заполнения отверстий, сформированных посредством вдавливания топливных частиц 530 в ходе этапа 5. Графитовый слой 600 может подвергаться сжатию (этап 7). Затем наносят связующее вещество 700 (этап 8).

Операция 30 (этапы 6-8) может повторяться множество раз для увеличения толщины графитового слоя 600, тем самым формируя графитовый слой 550 на основной части 560. Например, операция 30 может повторяться приблизительно от 10 до 30 раз, например, приблизительно 16 раз. Таким образом, графитовый слой 600 может иметь толщину в диапазоне от 1 до 3 мм. Фактически графитовый слой 550 может быть тоньше, чем основная часть 560.

В ходе операции 40 способ может определять, завершено ли нанесение слоя топливных частиц (т.е., остались ли подлежащие нанесению дополнительные слои 532 топливных частиц). Если остались подлежащие нанесению дополнительные слои 532 топливных частиц, способ возвращается к операции 20, и при этом могут быть нанесены дополнительные слои 532 топливных частиц и графитовые слои 550. Если подлежащих нанесению дополнительных слоев 532 топливных частиц не осталось, способ переходит к операции 50. Операция 40 является опциональной, поскольку способ может осуществляться так, чтобы слои выполнялись определенным образом, исключая необходимость в определении.

В ходе операции 50, как показано на фиг. 6В, формируется верхняя часть 580. В частности, верхняя часть 580 формируется посредством нанесения слоя графитовых частиц (этап 9), сжатия графитового слоя (этап 10 и последующего нанесения связующего вещества (этап 11), подобно осуществлению операции 10, описанной выше. Операция 50 (этапы 9, 10 и 11) также может повторяться множество раз, как описано применительно к операции 10. В результате обеспечивается формирование верхней части.

В ходе операции 60, показанной на фиг. 6В, 10А и 10В, рыхлый графитовый порошок удаляется (этап 12), тем самым открывая тепловыделяющие элементы, например, шаровые тепловыделяющие элементы 500. Тепловыделяющие элементы затем обрабатываются в изостатическом прессе 1000 (этап 13), который прикладывает давление к шаровым тепловыделяющим элементам 500. Изостатическое сжатие может обеспечивать уменьшение тепловыделяющих элементов в размере. Например, диаметр шаровых тепловыделяющих элементов 500 может быть уменьшен от 6,5 см до 6,0 см вследствие изостатического сжатия.

В ходе операции 70, показанной на фиг. 6В и 11, тепловыделяющие элементы (например, шаровые тепловыделяющие элементы 500) спекают в высокотемпературной печи 1100 (этап 14). Тепловыделяющие элементы могут спекаться при температуре в диапазоне от 1900 до 2100°C, например, при температуре 2000°C. После спекания процесс изготовления может быть завершен, и тепловыделяющие элементы могут быть готовы к проверке качества.

В некоторых воплощениях на тепловыделяющие элементы перед спеканием может быть нанесено агломерационное связующее вещество. В частности, агломерационное связующее вещество может быть смешано с графитовым порошком или оно может быть включено в связующее вещество 700. В других воплощениях связующее вещество 700 может представлять собой агломерационное связующее вещество.

В различных воплощениях связующее вещество 700 может наноситься посредством 3D-печати/аддитивных способов изготовления в ходе этапов 3, 8 и 11. В частности, связующее вещество 700 может быть нанесено так, чтобы тепловыделяющий элемент мог быть сформирован в трех измерениях из нанесенного графитового порошка в виде послойной конфигурации. Опять же, использование 3D-печати/аддитивных способов изготовления для нанесения связующего вещества и послойного формирования тепловыделяющих элементов обеспечивает процесс изготовления для формирования тепловыделяющих элементов в множестве размеров и форм (например, сферические, как показано, яйцевидные, в форме таблетки, призматические, цилиндрические и конические) на одной производственной линии. Некоторые тепловыделяющие элементы могут быть изготовлены с использованием способов воплощений с

внутренними каналами для протекания охлаждающего вещества через тепловыделяющий элемент, обеспечивая при этом, чтобы графит не наносился в местах внутренних каналов.

Вышеприведенное описание способов изготовления различных воплощений относится к шаровым тепловыделяющим элементам в качестве одной формы тепловыделяющего элемента, которая может быть изготовлена с использованием различных воплощений. Различные воплощения могут быть использованы для изготовления графитовых тепловыделяющих элементов любой формы и конфигурации, включая призматические блоки, стержни, гранулы и т.п. Таким образом, ссылки на "шаровые тепловыделяющие элементы" приводятся для простоты описания процесса изготовления и не предназначены для ограничения объема формулы изобретения в плане изготовления шаровых тепловыделяющих элементов или сферических тепловыделяющих элементов, если в формуле конкретно не указано иное.

Количество слоев и конфигурации каждого слоя могут варьироваться в зависимости от множества факторов, включая плотность и/или количество графита, нанесенного в каждом слое, упаковываемую фракцию топлива внутри тепловыделяющего элемента, форму формируемого тепловыделяющего элемента, и т.п. Таким образом, описание технологических операций различных воплощений и повторения не предназначены для ограничения объема формулы изобретения определенным количеством слоев или циклов операций, если в формуле конкретно не указано иное.

В различных воплощениях способ изготовления может осуществляться с использованием робототехники и технологии 3D-печати/аддитивных способов изготовления и может осуществляться в виде автоматизированного процесса. Такой интегрированный процесс может обеспечивать более высокую производительность, более высокое качество продукции и более высокую однородность продукции, по сравнению со стандартными способами изготовления ядерных тепловыделяющих элементов на основе графита. Кроме того, способ может быть реализован для массового производства тепловыделяющих элементов (например, шаровых тепловыделяющих элементов), например, посредством формирования производственной линии из этапов для каждой или нескольких операций и перемещения множества тепловыделяющих элементов с этапа на этап для параллельной обработки. Также, операции проверки могут быть добавлены после каждой операции или после выбранных операций, описанных выше, с целью оценки качества каждого нанесенного слоя, при этом контрольные параметры каждой операции могут быть отрегулированы для поддержания требуемого уровня качества или требуемых допусков для каждого слоя и шарового тепловыделяющего элемента в целом.

Кроме того, способы изготовления различных воплощений обеспечивают расположение топливных частиц, частиц поглотителя и воспроизводящих частиц в заданных местах внутри слоев тепловыделяющих элементов, с тем чтобы частицы были пространственно разнесены друг от друга внутри тепловыделяющих элементов, что является усовершенствованием в сравнении с хаотично расположенными топливными частицами, как это было реализовано в уровне техники. В частности, способы изготовления различных воплощений обеспечивают возможность изготовления тепловыделяющих элементов, характеризующихся конфигурациями упаковки топливных частиц, обеспечивающими отсутствие какого-либо контакта топливных частиц друг с другом.

Также, как отмечалось выше, различные воплощения устраняют риск контакта двух или более частиц друг с другом во время приложения высоких давлений, используемых в финальных процессах изготовления тепловыделяющих элементов. В результате, исключается вероятность повреждения частицами друг друга во время сжатия. Таким образом, в отличие от стандартных способов формирования графитовых тепловыделяющих элементов, различные воплощения обеспечивают возможность использования топливных частиц, не содержащих покрытия, например, непокрытых топливных частиц TRISO, описанных выше. Это устраняет этап способа и уменьшает стоимость топливных частиц, обеспечивая в результате более эффективное изготовление тепловыделяющего элемента.

Вышеприведенное описание раскрытых воплощений обеспечено для того, чтобы любой специалист в данной области техники мог изготовить или использовать настоящее изобретение. Различные модификации этих воплощений будут очевидны для специалистов в данной области техники, и общие принципы, раскрытые в настоящем документе, могут быть использованы применительно к другим воплощениям без отклонения от сущности и объема настоящего изобретения. Таким образом, настоящее изобретение не предназначено для ограничения аспектами и/или воплощениями, раскрытыми в настоящем документе, но должно толковаться в самом широком объеме, соответствующем приведенной далее формуле изобретения, а также принципам и новым признакам, раскрытым в настоящем документе.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ изготовления тепловыделяющего элемента, предназначенного для использования в активной зоне высокотемпературного газоохлаждаемого реактора, включающий
 - формирование графитовой основной части тепловыделяющего элемента, включающей равномерные графитовые слои;
 - формирование топливной зоны тепловыделяющего элемента, включающее
 - формирование на графитовой основной части первого графитового слоя, включающего графитовый

порошок, графитовые сферы или смесь графитового порошка и графитовых сфер;

нанесение на первый графитовый слой первого слоя частиц, при котором управляют позиционированием каждой частицы в первом слое частиц так, чтобы частицы оказались разнесенными друг от друга в соответствии с заданной конфигурацией;

формирование на первом слое частиц второго графитового слоя, включающего графитовый порошок, графитовые сферы или смесь графитового порошка и графитовых сфер; и

нанесение на второй графитовый слой второго слоя частиц, при котором управляют позиционированием каждой частицы во втором слое частиц так, чтобы частицы оказались разнесенными друг от друга в соответствии с заданной конфигурацией; и

формирование графитовой верхней части тепловыделяющего элемента,

при этом частицы включают одно или более из топливных частиц, частиц выгорающего токсичного поглотителя и частиц воспроизводящего материала.

2. Способ по п.1, характеризующийся тем, что

формирование первого графитового слоя на графитовой основной части включает нанесение графитовых сфер; и

формирование второго графитового слоя на первом слое частиц включает нанесение графитовых сфер,

при этом графитовые сферы и частицы близки по размеру.

3. Способ по п.1, характеризующийся тем, что

формирование первого графитового слоя на графитовой основной части включает нанесение смеси графитового порошка и графитовых сфер; и

формирование второго графитового слоя на первом слое частиц включает нанесение смеси графитового порошка и графитовых сфер,

при этом графитовые сферы и частицы близки по размеру.

4. Способ по п.3, характеризующийся тем, что нанесение смеси из графитового порошка и графитовых сфер включает нанесение графитовых сфер в центральной части топливной зоны и нанесение графитового порошка в окружающей части.

5. Способ по любому из пп.1-3, характеризующийся тем, что частицы в первом слое частиц и втором слое частиц включают топливные частицы и частицы выгорающего токсичного поглотителя и/или частицы воспроизводящего материала.

6. Способ по любому из пп.1-3, характеризующийся тем, что частицы в первом слое частиц и втором слое частиц содержат трехструктурно-изотропические (TRISO) топливные частицы, имеющие внешнее покрытие.

7. Способ по любому из пп.1-3, характеризующийся тем, что частицы в первом слое частиц и втором слое частиц содержат трехструктурно-изотропические (TRISO) топливные частицы, не имеющие внешнего покрытия.

8. Способ по любому из пп.1-3, характеризующийся тем, что управление позиционированием каждой частицы в первом слое частиц включает позиционирование частиц в первом слое частиц так, чтобы смежные частицы первого слоя частиц были пространственно разнесены друг от друга, в сущности, на одинаковое расстояние, и управление позиционированием каждой частицы во втором слое частиц включает позиционирование частиц во втором слое частиц так, чтобы смежные частицы второго слоя были пространственно разнесены друг от друга, в сущности, на одинаковое расстояние.

9. Способ по любому из пп.1-3, характеризующийся тем, что второй графитовый слой формируют на первом слое частиц так, чтобы частицы первого слоя частиц были отделены от смежных частиц второго слоя частиц, в сущности, на одинаковое расстояние.

10. Способ по любому из пп.1-3, характеризующийся тем, что нанесение первого слоя частиц и/или нанесение второго слоя частиц включает

загрузку частиц в заданных положениях в головку источника для вакуумного нанесения;

расположение головки источника для вакуумного нанесения над графитовой основной частью или первым графитовым слоем;

освобождение частиц из головки источника для вакуумного нанесения и

вдавливание частиц в графитовую основную часть или первый графитовый слой.

11. Способ по любому из пп.1-3, характеризующийся тем, что нанесение первого слоя частиц и/или нанесение второго слоя частиц включает

загрузку частиц в заданных положениях в головку источника для электростатического нанесения;

расположение головки источника для электростатического нанесения над графитовой основной частью или первым графитовым слоем;

освобождение частиц из головки источника для электростатического нанесения и

вдавливание частиц в графитовую основную часть или первый графитовый слой.

12. Способ по любому из пп.1-3, характеризующийся тем, что формирование графитовой основной части и/или формирование верхней части включает:

А) нанесение графита;

В) сжатие графита;

С) нанесение на сжатый графит связующего вещества методом печати и

повторение операций А, В и С до формирования графитовой основной части и/или верхней части.

13. Способ по п.12, характеризующийся тем, что операции А, В и С повторяют до тех пор, пока графитовая основная часть и/или верхняя часть не будет иметь толщину от 3 до 12 мм.

14. Способ по п.12, характеризующийся тем, что операции А, В и С повторяют до тех пор, пока первый графитовый слой и/или второй графитовый слой не будет иметь толщину от приблизительно 1 до приблизительно 3 мм.

15. Способ по п.12, характеризующийся тем, что нанесенное при выполнении операции С связующее вещество образует рисунок по форме, совпадающей с формой тонкой секции тепловыделяющего элемента.

16. Способ по любому из пп.1-3, характеризующийся тем, что формирование первого графитового слоя и формирование второго графитового слоя включает сжатие графитового слоя и нанесение на сжатый графитовый слой связующего вещества методом печати.

17. Способ по любому из пп.1-3, характеризующийся тем, что первый слой частиц наносят в первой плоскости, второй слой частиц наносят во второй плоскости, в сущности, параллельной первой плоскости, при этом частицы первого слоя не перекрывают частицы второго слоя в направлении, в сущности, перпендикулярном первой или второй плоскостям.

18. Способ по любому из пп.1-3, характеризующийся тем, что изготавливаемый тепловыделяющий элемент имеет сферическую форму.

19. Тепловыделяющий элемент для использования в активной зоне высокотемпературного газоохлаждаемого реактора, включающий

графитовую основную часть, включающую равномерные графитовые слои; топливную зону, включающую

первый графитовый слой, расположенный на графитовой основной части и включающий графитовый порошок, графитовые сферы или смесь графитового порошка и графитовых сфер;

первый слой частиц, расположенный на первом графитовом слое так, чтобы частицы оказались разнесенными друг от друга в соответствии с заданной конфигурацией;

второй графитовый слой, расположенный на первом слое частиц и включающий графитовый порошок, графитовые сферы или смесь графитового порошка и графитовых сфер;

второй слой частиц расположенный на втором графитовом слое так, чтобы частицы оказались разнесенными друг от друга в соответствии с заданной конфигурацией; и

графитовую верхнюю часть тепловыделяющего элемента, расположенную на втором слое частиц, при этом частицы включают одно или более из топливных частиц, частиц выгорающего токсичного поглотителя и частиц воспроизводящего материала.

20. Тепловыделяющий элемент по п.19, характеризующийся тем, что представляет собой сферический тепловыделяющий элемент с диаметром от приблизительно 5,5 см до приблизительно 6,5 см, при этом свободная от топлива оболочка имеет толщину от приблизительно 0,3 см до приблизительно 1,5 см.

21. Способ массового производства тепловыделяющих элементов, предназначенных для использования в активной зоне высокотемпературного газоохлаждаемого реактора, осуществляемый с использованием аддитивных методов и робототехники для управления пространственным размещением и плотностью упаковки частиц внутри графитовой матрицы, включающий:

формирование графитовой основной части тепловыделяющих элементов, включающей равномерные слои графитового порошка;

многократное повторение последовательности операций, включающих нанесение слоя частиц на предыдущий слой графитового порошка так, чтобы частицы оказались разнесенными друг от друга в соответствии с заданной конфигурацией, нанесение равномерного слоя графитового порошка на слой частиц и нанесение связующего вещества с использованием аддитивных методов для прикрепления каждого слоя, имеющего последовательно увеличивающийся, а затем уменьшающийся диаметр, до формирования основной части тепловыделяющих элементов с центральной частью, выполненной в виде топливосодержащей зоны, и

многократное повторение последовательности операций, включающих нанесение равномерного слоя графитового порошка на предыдущий слой и нанесение связующего вещества с использованием аддитивных методов для прикрепления каждого слоя, имеющего последовательно уменьшающийся диаметр, до формирования верхней части тепловыделяющих элементов,

при этом частицы включают одно или более из топливных частиц, частиц выгорающего токсичного поглотителя или частиц воспроизводящего материала,

при этом тепловыделяющие элементы содержат свободную от топлива оболочку, расположенную вокруг топливной зоны.

22. Способ по п.21, характеризующийся тем, что наружные размеры графитовой основной части, части топливной зоны и верхней части задают так, чтобы обеспечить формирование тепловыделяющего элемента заданной формы, выбранной из группы, состоящей из сферической формы, яйцевидной формы,

формы драже.

23. Способ массового производства тепловыделяющих элементов для высокотемпературного газо-охлаждаемого реактора, включающий:

многократное повторение последовательности операций, включающих формирование равномерного графитового слоя на предыдущем слое и нанесение связующего вещества с использованием аддитивных методов для прикрепления каждого слоя с постепенно увеличивающимися диаметрами до формирования основной части тепловыделяющих элементов;

многократное повторение последовательности операций, включающих нанесение равномерного графитового слоя из графитового порошка и/или графитовых сфер на предыдущий слой, формирование слоя частиц на равномерном графитовом слое в пределах диаметра топливной зоны так, чтобы частицы при этом были пространственно разнесены друг от друга в соответствии с заданной конфигурацией, и нанесение связующего вещества с использованием аддитивных методов для прикрепления каждого слоя с постепенно увеличивающимися и затем уменьшающимися диаметрами с формированием центральной части тепловыделяющих элементов, включая топливо содержащую зону; и

многократное повторение последовательности операций, включающих формирование равномерного графитового слоя на предыдущем слое и нанесение связующего вещества с использованием аддитивных методов для прикрепления каждого слоя с постепенно уменьшающимися диаметрами до формирования верхней части тепловыделяющих элементов,

при этом частицы включают одно или более из топливных частиц, частиц выгорающего токсичного поглотителя или частиц воспроизводящего материала.

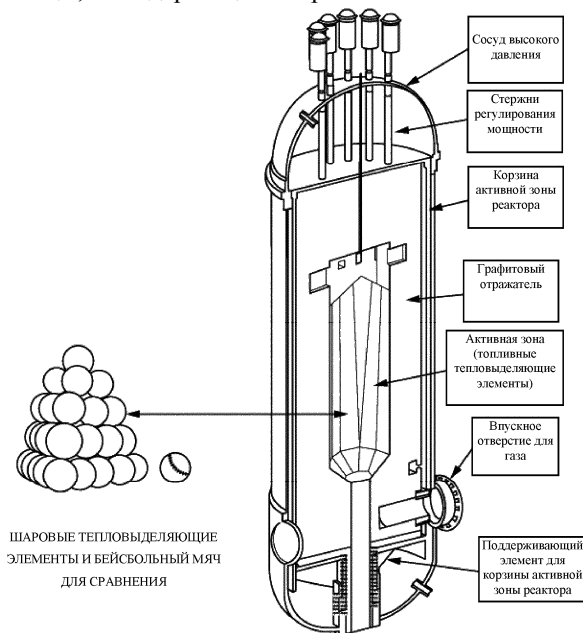
24. Способ по п.23, характеризующийся тем, что графитовые слои содержат графитовые сферы, имеющие размер, приблизительно равный размеру частиц.

25. Способ по любому из пп.21-24, характеризующийся тем, что его операции осуществляют последовательно на производственной линии, сконфигурированной так, чтобы тепловыделяющие элементы двигались по производственной линии с осуществлением применительно к ним каждой последующей операции.

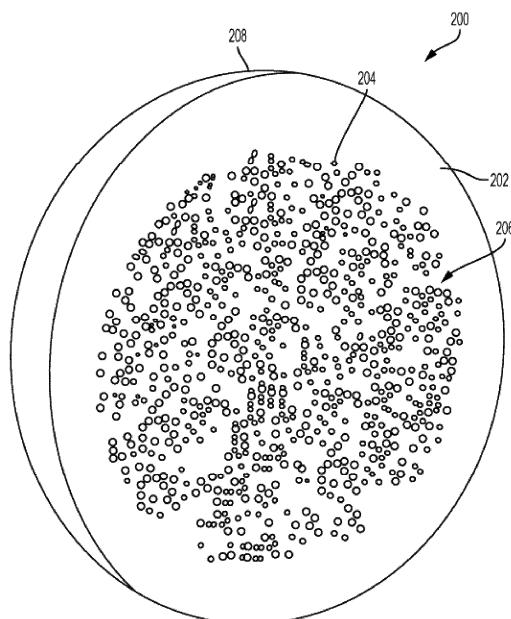
26. Способ по любому из пп.21-24, характеризующийся тем, что все операции осуществляют одновременно применительно к множеству тепловыделяющих элементов с целью массового производства тепловыделяющих элементов.

27. Способ по любому из пп.21-24, дополнительно включающий проверку результатов одной или более операций для оценки качества или соответствия производственным допускам и регулировку параметров операций на основе указанных проверок для поддержания стандарта качества изготавливаемых тепловыделяющих элементов.

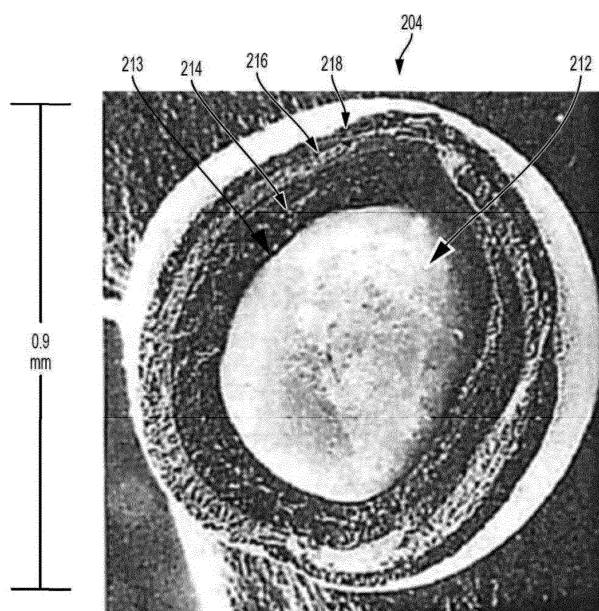
28. Способ по любому из пп.21-24, характеризующийся тем, что частицы содержат трехструктурно-изотропические (TRISO) частицы, не содержащие покрытия.



Фиг. 1



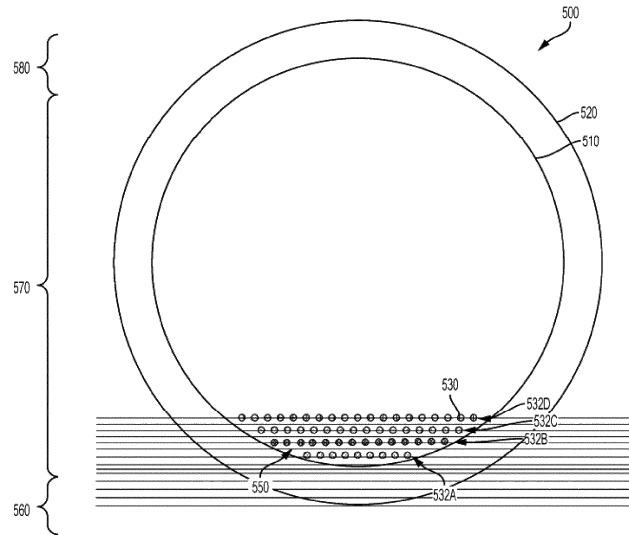
Фиг. 2



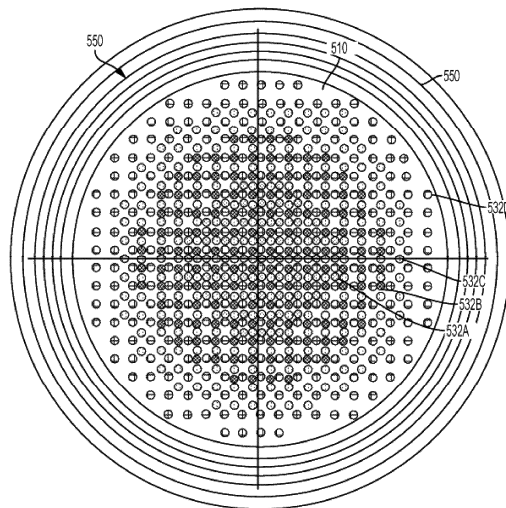
Фиг. 3

Диаметр сфер	см	6.0
Толщина внешней графитовой оболочки	см	0.5
Плотность топливной матрицы и оболочки	г/см ³	1.74
Диаметр топливных сердечников	мм	500
Плотность	г/см ³	9.5
Материал покрытий		C/C/SiC/C
Толщина покрытий	мм	95/40/35/40
Значения плотности	г/см ³	1.05/1.90/3.18/1.90
Топливо		Th/U93%
Загрузка тяжелого металла	г/сферу	20
Доля покрытых частиц в топливной матрице	%	22.8

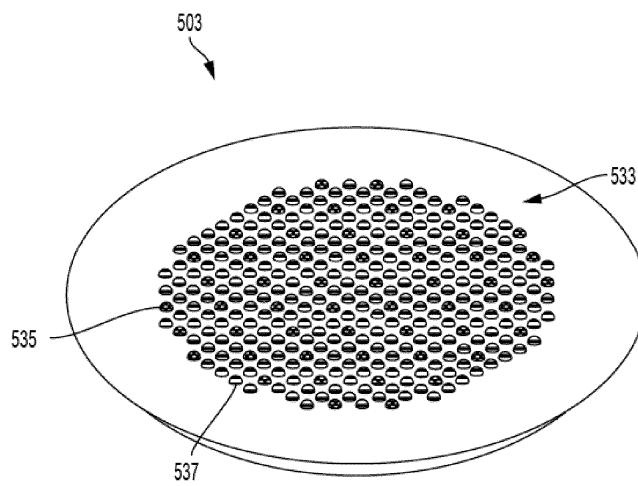
Фиг. 4



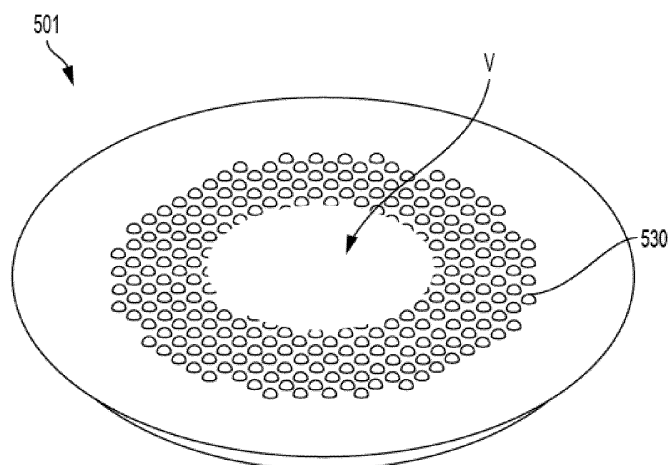
Фиг. 5А



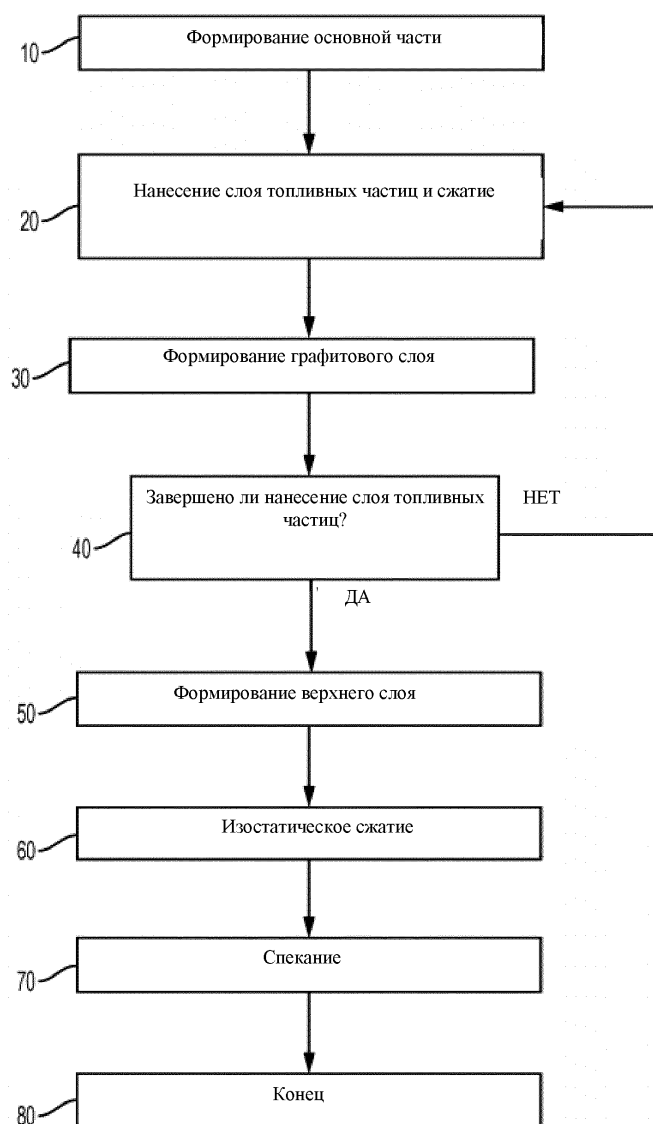
Фиг. 5В



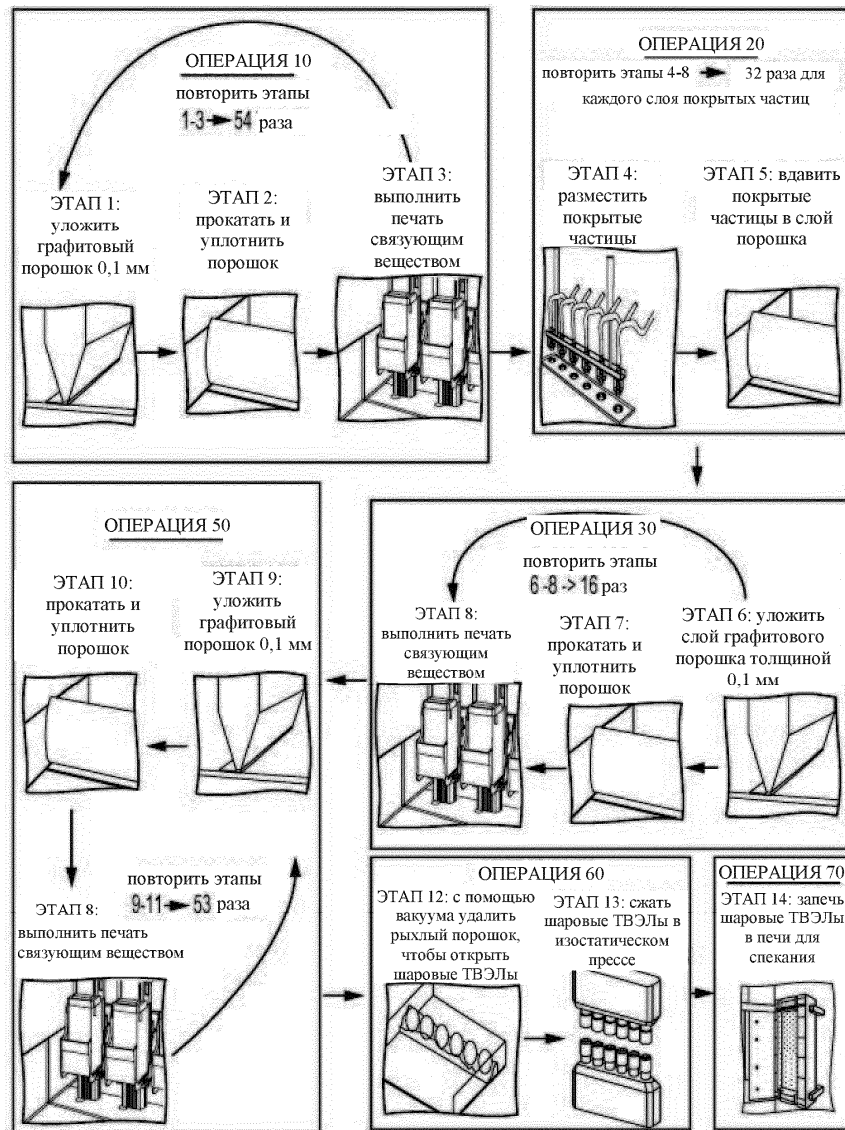
Фиг. 5С



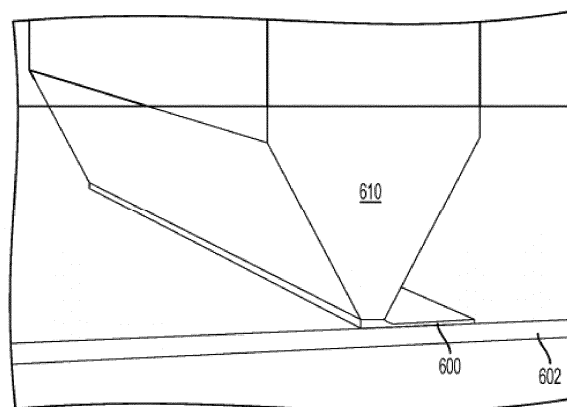
Фиг. 5D



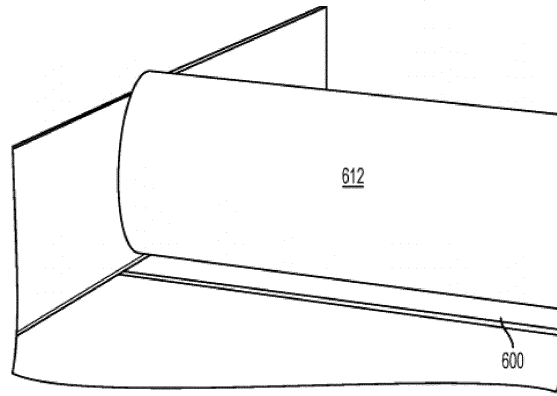
Фиг. 6A



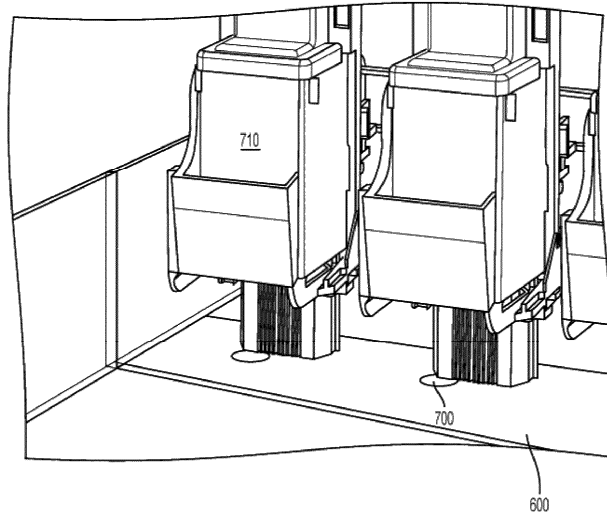
Фиг. 6В



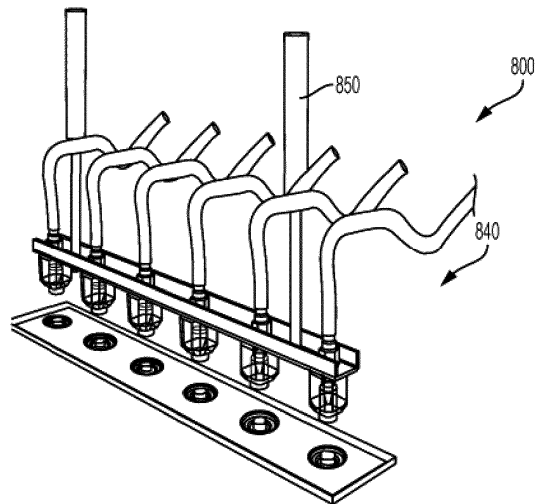
Фиг. 7А



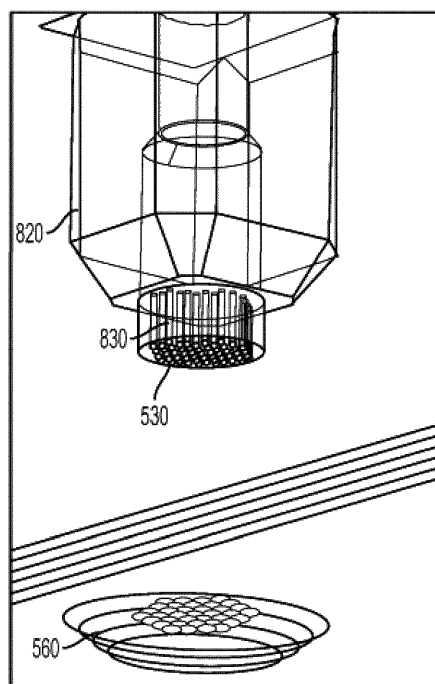
Фиг. 7В



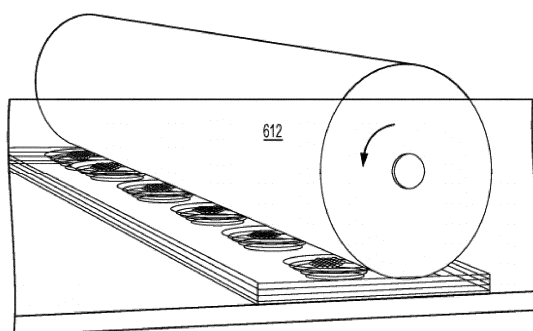
Фиг. 7С



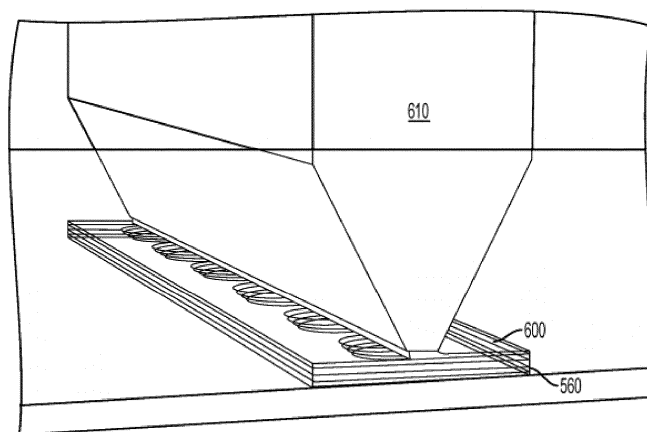
Фиг. 8А



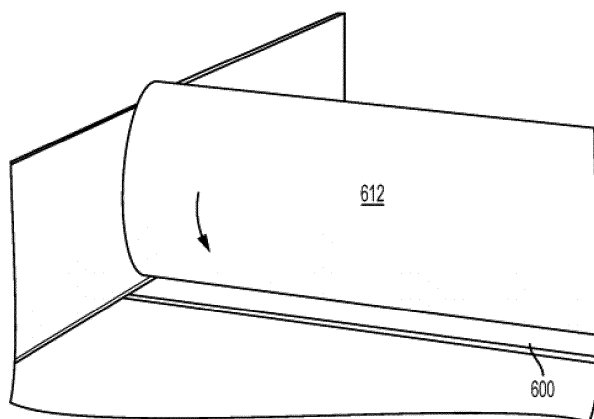
Фиг. 8В



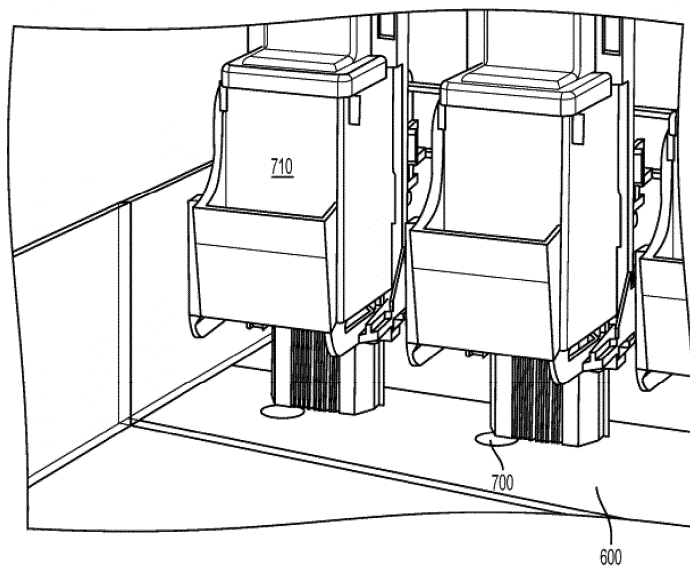
Фиг. 8С



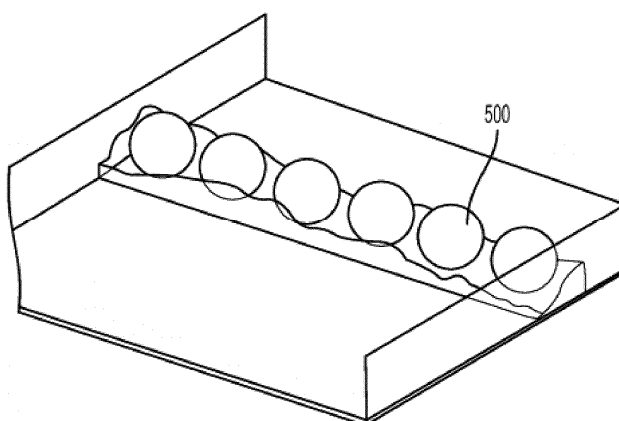
Фиг. 9А



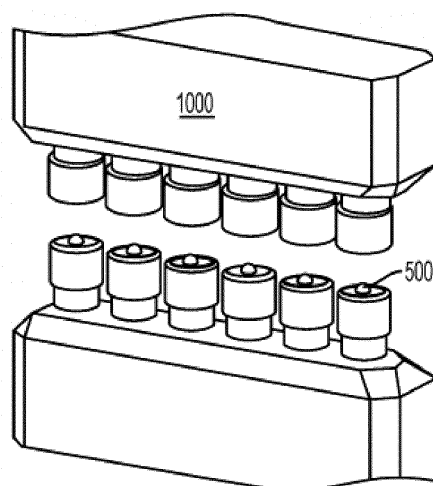
Фиг. 9В



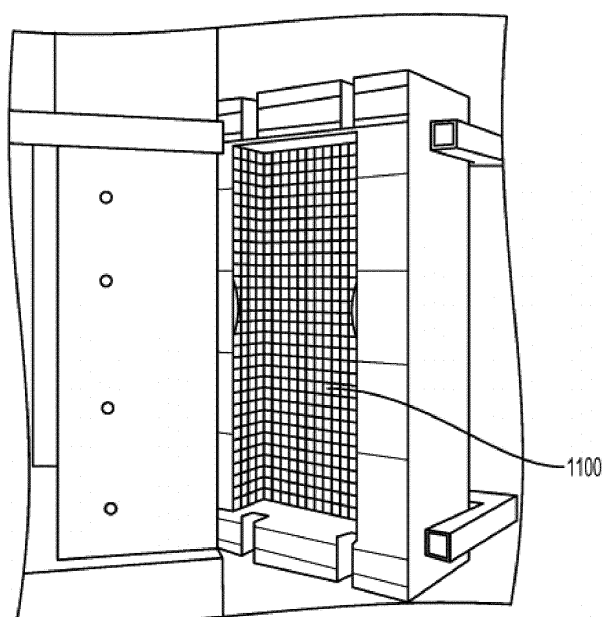
Фиг. 9С



Фиг. 10А



Фиг. 10В



Фиг. 11

