

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **202091297** (13) **A1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2020.09.23

(51) Int. Cl. *G21C 3/60* (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2018.12.21

(54) КОЛЬЦЕВОЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО И СПОСОБЫ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

(31) 62/609,831

(32) 2017.12.22

(33) US

(86) PCT/US2018/067361

(87) WO 2019/126790 2019.06.27

(71) Заявитель:
ТЕРРАПАУЭР, ЭлЭлСи (US)

(72) Изобретатель:

Чой Чжун Хён, Хакетт Мика Дж.,
Гейзлар Павел, Лэтта Райан Н.,
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.,
Бучака С.М., Бельтюкова М.В. (RU)

(57) Описаны кольцевое металлическое топливо и топливные стержни, которые имеют улучшенные характеристики по сравнению с топливными стержнями на основе оксида урана. Кольцевое металлическое топливо может быть изготовлено из пористого металлического ядерного топлива, генерирует больше энергии и работает при гораздо более низкой температуре, чем топливо на основе оксида урана. Кольцевые металлические топливные стержни могут использоваться в реакторах с бегущей волной и в других реакторах на быстрых нейтронах. Водо-водяные энергетические реакторы также могут быть оснащены кольцевыми металлическими топливными стержнями для улучшения эксплуатационных характеристик реактора.

A1

202091297

202091297

A1

КОЛЬЦЕВОЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО И СПОСОБЫ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

ССЫЛКА НА РОДСТВЕННЫЕ ЗАЯВКИ

[0001] Настоящая заявка подана 21 декабря 2018 г. в качестве международной заявки, и ее приоритет испрашивается по предварительной заявке № 62/609831 на патент США, озаглавленной «Кольцевое металлическое ядерное топливо и способы его изготовления», поданной 22 декабря 2017 г., причем эта заявка включена в настоящий документ в качестве ссылки.

ВВЕДЕНИЕ

[0002] Одним из показателей эффективности ядерных топливных стержней является способность передачи тепла, выделяемого в топливе, первичному теплоносителю через оболочку топливного стержня. Предложенное усовершенствование ядерных топливных стержней на основе оксида урана, обеспечивающее более высокую теплопередачу и, следовательно, более высокую мощность реактора из того же объема активной зоны, заключается во включении центральной пустой области с дополнительной оболочкой, проходящей по длине топливного стержня. Теплоноситель пропускается через эту область, а также через наружную поверхность топливного стержня, что приводит к увеличению общей площади поверхности, по которой протекает теплоноситель и через которую может передаваться тепло.

[0003] Однако, фактические характеристики этой кольцевой конструкции ограничены несколькими факторами. Во-первых, топливо на основе оксида урана имеет тенденцию к расширению при рабочих температурах, что приводит к отделению топлива от внутренней оболочки и снижению теплопроводности между внутренней оболочкой и топливом. Во-вторых, реакция деления вызывает разбухание топлива на основе оксида урана из-за образования продуктов деления в топливе. В результате требуется либо использование достаточно прочных оболочек для поддержания давления, создаваемого разбуханием твердого топлива на основе оксида урана, либо создание пространства для расширения между оболочкой и топливом в предвидении разбухания. Оба этих компромисса негативно влияют на общую теплопроводность между топливом и наружной оболочкой. В-третьих, топливо на основе диоксида урана низкой плотности требует

относительно высокого обогащения, чтобы обеспечить увеличение мощности без сокращения продолжительности цикла и дополнительного поглощения паразитных нейтронов во второй оболочке. Наконец, топливо на основе диоксида урана работает при относительно высокой температуре, что создает дополнительные конструктивные проблемы.

[0004] Другой показатель характеристик конструкций ядерного топливного стержня связан с устойчивостью к авариям. Было доказано, что многие традиционные конструкции топлива хорошо работают при нормальных условиях эксплуатации атомной станции, но не работают так же хорошо при сценариях с серьезными авариями. Это может привести к разрушению топливной оболочки и выбросу продуктов деления в случае аварий с тяжелыми последствиями, таких как те, которые произошли как в авариях на АЭС Три Майл Айленд, так и на АЭС Фукусима.

Кольцевое Металлическое Ядерное Топливо И Способы Его Изготовления

[0005] Кольцевое металлическое топливо и топливные стержни, описанные ниже, имеют улучшенные характеристики по сравнению с топливными стержнями на основе оксида урана. Кольцевое металлическое топливо может быть изготовлено из пористого металлического ядерного топлива и будет генерировать больше энергии и работать при гораздо более низкой температуре, чем топливо на основе оксида урана. Кольцевые металлические топливные стержни могут использоваться в любом реакторе со спектром быстрых нейтронов, включая, например, реакторы на бегущей волне. Водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) также могут быть оснащены кольцевыми металлическими топливными стержнями для улучшения эксплуатационных характеристик реактора. Металлическое топливо может представлять собой одно или несколько колец твердого топлива, называемыми кольцевыми блоками, или может быть выполнено в форме частиц топлива или топливного порошка, помещенных в кольцевую область, ограниченную внутренней оболочкой и наружной оболочкой. Металлическое топливо может быть изначально пористым или может стать пористым в результате облучения. Поскольку кольцевые металлические топлива имеют более высокую плотность урана, чем это было бы возможно при использовании типичных топлив на основе оксида урана (например, UO_2), выработка электроэнергии в существующих реакторах может быть увеличена при незначительной модификации или без изменения существующего оборудования. Это в первую очередь обеспечивается благодаря дополнительной теплообменной поверхности внутренней оболочки. Кроме того, повышенная загрузка

металлического топлива ураном потенциально позволяет увеличить продолжительность или время выгорания. Например, в одном варианте выполнения можно предположить, что кольцевое металлическое топливо обеспечивает увеличение мощности до 50% в ВВЭР по сравнению с традиционным оксидным топливом в том же объеме активной зоны.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

[0006] Следующие чертежи, которые составляют часть настоящей заявки, иллюстрируют описанную технологию и не предназначены для ограничения каким-либо образом заявленного объема изобретения, который должен быть основан на прилагаемой формуле изобретения.

[0007] Фиг.1А и 1В изображают виды в разрезе вдоль ортогональных осей одного варианта выполнения кольцевого ядерного топливного стержня из пористого металлического топлива.

[0008] Фиг.2 изображает другие конфигурации, отличные от кольцевой конфигурации, показанной на Фиг.1А и 1В, которые также могут быть использованы для топливных стержней.

[0009] Фиг.3 изображает вид в разобранном состоянии тепловыделяющей сборки для использования в реакторе на бегущей волне.

[0010] Фиг.4 изображает часть одного варианта выполнения топливного стержня, состоящего из множества сегментов, включающих соединительный сегмент, который обеспечивает поток между центральной областью и периферией топливного стержня.

[0011] Фиг.5 изображает промежуточные элементы в способе изготовления двухкомпонентного промежуточного элемента, описанного выше.

[0012] Фиг.6 изображает вид в разрезе части кольцевого пространства между оболочками, показывающий топливо и прижимное устройство.

[0013] Фиг.7 изображает вид сбоку тепловыделяющей сборки для использования в водо-водяном энергетическом реакторе.

[0014] Фиг.8 изображает вариант выполнения способа изготовления кольцевого ядерного топливного стержня.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

Прежде чем раскрыть и описать кольцевые металлические топливные стержни, которые в качестве альтернативы могут называться прутковыми тепловыделяющими элементами, и способы их изготовления, следует понимать, что это описание не

ограничено конкретными конструкциями, этапами процесса или материалами, раскрытыми в настоящем документе, но распространяется на их эквиваленты, которые могут быть признаны специалистами в данной области техники. Следует также понимать, что используемая в настоящем документе терминология используется исключительно с целью описания конкретных вариантов выполнения кольцевого металлического топлива и не предназначена быть ограничивающей. Следует отметить, что, как используется в настоящем описании, формы единственного числа также включают и множественное число, если из контекста явным образом не следует иное. Так, например, ссылка на «гидроксид лития» не должна приниматься количественно или в качестве ограничения, ссылка на «стадию» может включать несколько стадий, ссылка на «получение» или «продукты» реакции не должна восприниматься как все продуктами реакции, а ссылка на «реакцию» может включать ссылку на одну или несколько таких стадий реакции. Как таковая, стадия реакции может включать множественные или повторные реакции схожих материалов с получением идентифицируемых продуктов реакции.

Кольцевые металлические топливные стержни

[0015] Фиг.1А и 1В изображают виды в разрезе вдоль ортогональных осей одного варианта выполнения кольцевого ядерного топливного стержня из пористого металлического топлива. Фиг.1А изображает вид в разрезе в плоскости, перпендикулярной продольной оси топливного стержня 120, а Фиг.1В изображает вид в разрезе по продольной оси топливного стержня 120. Топливный стержень 120 имеет кольцевое пространство или трубку из пористого металлического топлива 102, ограниченного на внутренней поверхности внутренней оболочкой 104, а на наружной поверхности - наружной оболочкой 106. Как более подробно обсуждается ниже, металлическое топливо может представлять собой одно или несколько кольцевых или твердых топлив, называемых кольцевыми блоками, или может иметь форму частиц топлива или топливного порошка, помещенных в кольцевую область, ограниченную внутренней оболочкой 104 и наружной оболочкой 106. Металлическое топливо 102 может быть изначально пористым или может стать пористым в результате облучения во время использования в ядерном реакторе.

[0016] Центральная пустая область 108 кольцевого топливного стержня, которая также может называться центральным каналом для теплоносителя, является внутренним каналом, проходящим через топливные блоки 102. Эта центральная область 108 обеспечивает путь потока для теплоносителя и контактную поверхность (с внутренней

оболочкой 104), проходящую через центр топливного стержня 120. Центральная область 108 может быть соосна с продольной осью топливного стержня (как показано) или может быть смещена.

[0017] Как показано на Фиг.1В, топливный стержень 120 может быть закрыт на своем одном или обоих концах торцевой крышкой 122, как это известно в традиционных топливных стержнях. На одном или на обоих концах топливного стержня 120 также может быть предусмотрена камера 126, содержащая пружину 124, предназначенную для приложения прижимного усилия к топливу и обеспечения надлежащего размещения кольцевых топливных блоков 102 в основной части топливного стержня 120. Зажимы представляют собой альтернативную форму прижимного элемента, которые можно использовать вместо или в сочетании с одной или несколькими пружинами камеры для удержания топливной загрузки на месте. Пружина 124 камеры может находиться в непосредственном контакте с топливными блоками 102, или же для более равномерного распределения на топливо приложенного усилия между пружиной 124 камеры и топливом 102 может быть расположена шайба или другая промежуточная конструкция (не показана). В одном варианте выполнения камера 126 и пружина 124 камеры могут быть частью торцевой крышки 122. В альтернативном варианте выполнения камера 126 просто представляет собой пространство между топливными блоками 102 и началом торцевой крышки 122.

[0018] В показанном варианте выполнения центральная область 108 проходит по всей длине топливного стержня 120, включая торцевые крышки 122. В альтернативном варианте выполнения в одной или обеих торцевых крышках 122 или в камере (камерах) 126 может быть предусмотрено устройство типа коллектора, поэтому центральная область 108 проходит только через кольцевые топливные блоки 102 и через некоторые или все камеры 126.

[0019] Топливные стержни 120 могут быть выполнены с учетом форм-фактора и требований к конструкции для существующих конструкций водо-водяного энергетического ядерного реактора (ВВЭР). Это позволяет модифицировать существующие конструкции реакторов с использованием топливных стержней, содержащих кольцевые металлические топлива. Поскольку кольцевые металлические топлива имеют большую плотность урана, чем это возможно при использовании типичных топлив на основе оксида урана (например, UO_2), выработка электроэнергии существующих реакторов может быть увеличена с небольшой модификацией существующего оборудования или вообще без какой-либо модификации. Это, в первую

очередь, обеспечивается благодаря дополнительной теплообменной поверхности внутренней оболочки. Кроме того, повышенная загрузка металлического топлива ураном потенциально позволяет увеличить продолжительности циклов или выгорание. Например, в одном варианте выполнения кольцевое металлическое топливо оценивается как обеспечивающее увеличение мощности до 50% в ВВЭР по сравнению с традиционным оксидным топливом в том же объеме активной зоны.

[0020] Еще одно преимущество заключается в том, что кольцевые металлические топливные стержни могут нагреваться быстрее, чем традиционные топливные стержни из UO_2 , без риска повредить топливную матрицу и оболочку. Топлива на основе UO_2 могут разламываться из-за перепада температурных напряжений в топливе, если топливо нагревается слишком быстро, а механическое взаимодействие оболочки и топлива с твердыми гранулами UO_2 может привести к повреждению оболочки. Это ограничивает скорость, с которой традиционные ядерные реакторы, оборудованные UO_2 , могут быть доведены до полной мощности, и, таким образом, ограничивает использование таких реакторов в качестве нагрузки после электростанций, которые должны регулировать выходную мощность в ответ на потребность в электроэнергии. Кольцевые металлические топливные стержни, как описано в настоящем документе, могут нагреваться намного быстрее, чем топливные стержни на основе UO_2 (например, считается, что уран-циркониевые топливные стержни могут нагреваться примерно в 6 раз быстрее, чем топливные стержни на основе UO_2). Это позволяет более эффективно использовать существующие реакторы, оснащенные кольцевыми металлическими топливными стержнями, в качестве нагрузки после электростанций.

[0021] Фиг.2 иллюстрирует другие конфигурации, отличные от кольцевой конфигурации, показанной на Фиг.1, которые также могут быть использованы для топливных стержней 120 и/или для кольцевых топливных блоков 102 внутри топливных стержней. Любая форма может быть использована для любой оболочки. Форма поперечного сечения может представлять собой правильные многоугольники, такие как треугольники, квадраты, шестиугольники, восьмиугольники и т.д. Углы могут быть более или менее скругленными, а поперечное сечение может иметь любую лепестковую форму, такую как показанный четырехлепестковый топливный стержень.

[0022] Как показано, форма поперечного сечения наружной части топливного стержня и внутренней области может быть одинаковой или различной. В одном варианте выполнения конфигурация топливного стержня может поддерживать регулирующий стержень и направляющие кольцевые трубки.

[0023] Кроме того, нецилиндрические топливные стержни могут иметь спиральную канавку вдоль своей длины, либо на внутренней поверхности, либо на наружной поверхности, либо на обоих. Например, конструкция может также включать канавки на внутренней поверхности внутренней оболочки или наружной поверхности для лучшей теплопередачи и оптимизации распределения потока между внутренней оболочкой и наружной оболочкой. В качестве альтернативы, наружная поверхность топливных стержней может иметь спиральную проволочную обертку (не показана) и/или к одной из наружной или внутренней поверхностей или к ним обоим может быть прикреплена жесткая спиральная конструкция.

[0024] Между оболочками и топливом также могут быть использованы тонкие вкладыши (не показаны), если необходимо предотвратить химическое взаимодействие оболочки с топливом, а в случае нарушения оболочки, можно ожидать, что они снизят реакцию металлического топлива с водным теплоносителем.

[0025] Фиг.3 изображает тепловыделяющую сборку 300 для использования в реакторе на бегущей волне или в другом реакторе на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем в разобранном виде. Сборка 300 содержит удлиненный канал 302 для теплоносителя, имеющий ось А. Канал 302 имеет шестиугольное поперечное сечение. Сервисный разъем 304 с внутренним проходом для потока прикреплен к первому концу 306 канала 302 и имеет внутренние или наружные элементы, которые позволяют захватывать его механизмами внутри корпуса реактора для подъема, опускания и иного перемещения сборки 300 вовнутрь, наружу или внутри активной зоны. Ко второму концу 310 канала 302 прикреплен входной патрубок 308. Для прикрепления сервисного разъема 304 и входного патрубка 308 к каналу 302 используются опорные кольца 312 и стопорные кольца 314. Вблизи конца входного патрубка 308 имеются стопорные пластины 316 (две в этом примере) и разделительные направляющие 318 для стержней. Вместе стопорные пластины 316 и разделительные направляющие 318 для стержней соединяют пучок 320 топливных стержней с входным патрубком 308. В одном варианте выполнения все топливные стержни в пучке 320 топливных стержней представляют собой кольцевые металлические топливные стержни, как описано выше. В альтернативном варианте выполнения только некоторые из топливных стержней могут быть кольцевыми металлическими топливными стержнями, при этом другие топливные стержни имеют другой тип или конструкцию. Также изображены уплотнительные кольца 322 и ограничитель потока 324.

[0026] Кольцевые металлические топливные стержни могут представлять собой

цельную конструкцию, как показано на Фиг.1. В качестве альтернативы, кольцевые металлические топливные стержни могут состоять из большого числа сегментов, связанных, привинченных или соединенных друг с другом иным образом для создания требуемой длины. Это позволяет изготавливать топливные стержни любой длины, а также обеспечивает определенную модульность и гибкость при изготовлении отдельных элементов. Сегменты топливных стержней могут включать топливосодержащие сегменты, сегменты торцевой крышки (которые могут содержать или не содержать камеры и пружины камеры, отдельные сегменты камеры и другие сегменты).

[0027] Фиг.4 иллюстрирует часть одного варианта выполнения топливного стержня из множества сегментов, включая соединительный сегмент, который обеспечивает протекание потока между центральной областью и наружной стороной топливного стержня. Топливный стержень 420 имеет конструкцию, аналогичную конструкции, показанной на Фиг.1А и 1В. Сегменты 452 кольцевого металлического топлива содержат один или несколько пористых металлических топливных блоков 402, содержащихся во внутренней оболочке 404 и наружной оболочке 406. На любом конце топливного стержня 420 могут быть выполнены сегменты торцевой крышки и один или несколько сегментов камеры (не показаны).

[0028] Топливный стержень 420В в своей показанной части содержит два сегмента 452 кольцевого топлива, соединенных соединительным сегментом 454. Соединительный сегмент 454 содержит две камеры 456, соединяющие центральную область 408 с наружной стороной топливного стержня 420. В зависимости от варианта выполнения, в сегменте 454 может быть использовано большее или меньшее количество камер. Камеры 456 обеспечивают потоку между центральной областью 408 и наружной частью топливного стержня 420 возможность усиления циркуляции теплоносителя.

[0029] Кольцевое металлическое топливо может быть изготовлено из пористого металлического ядерного топлива. Металлические топлива включают уран, плутоний, сплавы уран-цирконий (U-Zr), сплавы уран-цирконий-ниобий (U-Zr-Nb), сплавы уран-плутоний-цирконий (U-Pu-Zr), сплавы уран-плутоний-молибден (U-Pu-Mo), сплавы уран-плутоний-ниобий (U-Pu-Nb), сплавы уран-плутоний-титан (U-Pu-Ti), сплавы уран-молибден (U-Mo), сплавы уран-ниобий (U-Nb), сплавы уран-ванадий (U-V), сплавы уран-хром (U-Cr) и сплавы уран-титан (U-Ti). Для определенности этого описания варианты выполнения кольцевого металлического топлива будут представлены в терминах U-Zr в качестве ядерного топлива. Однако в любом из вариантов выполнения, описанных ниже, может использоваться любое металлическое ядерное топливо. В альтернативном варианте

выполнения топливо изначально не является пористым, а становится пористым во время работы, поскольку топливо разбухает во время облучения. Хотя металлическое топливо не включает оксиды, такие как диоксид урана, в некоторых вариантах выполнения наружная поверхность кольцевого топливного стержня или частицы металлического топлива могут подвергаться воздействию кислорода, что приводит к образованию следовых количеств (менее 0,1 мас.%) оксидов, образующихся на поверхности. Для целей настоящего описания термин «металлическое топливо» включает топливо с такими следовыми количествами оксидов и не ограничивается топливом, не имеющим абсолютно никаких измеримых оксидов.

[0030] В частности, в отношении металлического топлива, содержащего Zr (например, U-Zr и U-Pu-Zr), процентное содержание сплава Zr может составлять от 1 до 20 мас.% (например, 1 мас.%, 5 мас.%, 7,5 мас.%, 10 мас.%, 12,5 мас.%, 15 мас.% или 20 мас.% или любое количество между ними) и может быть оптимизировано для функционирования в ВВЭР. Также сплавы Zr топлива показаны в качестве примера и могут быть заменены или объединены с одним или несколькими другими компонентами сплава (Cr, Ti, V, Ni, Nb, Al, Si, Mo). Такие сплавы могут иметь улучшенные характеристики (то есть пониженную реактивность) при воздействии воды. Также для достижения требуемых характеристик, в частности, стойкости к реакции с водой в случае нарушения целостности оболочки, к топливу могут быть добавлены легирующие присадки.

[0031] Тогда как тепловые характеристики традиционных топливных стержней на основе оксида урана понижаются благодаря наличию заполненного гелием зазора между топливными таблетками и оболочкой и теплопроводности самих таблеток на основе оксида урана, описанные в настоящем документе металлические топливные стержни не являются ограниченными таким образом. Металлические топлива подвергаются большему тепловому расширению и имеют более высокую теплопроводность, чем традиционные топливные таблетки на основе оксида урана. Даже если для обеспечения возможности вставления топливного блока в оболочку может потребоваться посадка с зазором или зазор, сплавы, описанные выше, и, в частности, сплавы U-Zr демонстрируют большее тепловое расширение, чем материалы оболочки, так что при рабочих температурах зазор устраняется, приводя, при рабочих температурах, к очень хорошему тепловому контакту между топливом и внутренней и наружной оболочками. Высокая теплопроводность топлива позволяет ему работать со значительными нарушениями связности, а благодаря низкому пределу ползучести топлива он способен заполнять

зазоры. Кольцевое топливо работает при гораздо более низких температурах, чем твердое топливо. Для топлива UO_2 его максимальная температура составляет 2200 °C. Максимальная температура для кольцевого металлического топлива оценивается в 400-500 °C, если кольцевое топливо работает на 50% более высокой мощности, чем реакторы, работающие на UO_2 . В дополнение к существенному уменьшению длины проводимости из-за кольцевой геометрии именно устранение зазора и более высокая внутренняя теплопроводность обеспечивают кольцевым металлическим тепловыделяющим элементам возможность работать при таких низких температурах, все еще генерируя такую же или большую мощность, чем реактор на UO_2 .

[0032] Низкая максимальная температура топлива является еще одним преимуществом конструкции кольцевого металлического топлива по сравнению с традиционными видами топлива. Кроме того, более низкая теплоемкость металлического топлива еще больше сокращает запасенную энергию и улучшает рабочие характеристики реактора при аварии с потерей теплоносителя (LOCA). Кроме того, его преимущество улучшает устойчивость активной зоны реактора к серьезной аварии (SA), такой как отключение станции (SBO) во время катастрофы на Фукусиме. Высокая теплопроводность топлива также способствует более быстрому запуску установки и повышению эксплуатационной гибкости реактора для использования в качестве нагрузки после электростанций, как описано выше.

[0033] Как обсуждалось выше, металлическое топливо может представлять собой кольцевой блок металлического топлива или может иметь форму частиц топлива или топливного порошка, содержащихся в кольцевой области, ограниченной внутренней оболочкой 104 и наружной оболочкой 106. Металлическое топливо, даже твердые пористые блоки, обеспечивает возможность укладки большего количества тяжелого металла в тот же объем, чем оксидное топливо. Это уменьшает требуемое обогащение и уменьшает колебание реактивности во время цикла и, следовательно, необходимое количество выгорающего поглотителя или борной кислоты в теплоносителе. Укладка с более высоким содержанием тяжелых металлов также обеспечивает возможность использования различных материалов оболочек, помимо материалов на основе циркония, которые могут иметь лучшие характеристики при высоких температурах или повышенные показатели безопасности. Металлическое топливо также более склонно выпускать свои газообразные продукты ядерного деления в открытое пространство внутри топливного стержня, что может способствовать уменьшению локальных напряжений.

[0034] Топливо в виде частиц, такие как частицы топлива или топливный порошок

(порошок, определенный как частицы диаметром 0,5 мм или менее), может быть помещено в кольцевую область с уплотнением для достижения требуемой пористости топлива. В одном варианте выполнения частицы могут быть уплотнены в топливном стержне посредством вибрации для достижения расчетной объемной плотности и, таким образом, достижения соответствующей расчетной пористости.

[0035] Металлический топливный порошок может быть изготовлен любым подходящим способом. Кроме того, смешивание материалов выгорающего поглотителя, таких как гадолиний, бор и эрбий, может улучшить эффективность активной зоны реактора. Для улучшения уплотнения топливного порошка и предотвращения массивного перемещения топливного порошка во время транспортировки и обработки может быть использована небольшая концентрация связующего материала, такого как стеарат цинка или бегенат цинка. Другие порошковые добавки, которые могут быть подходящими, включают смазывающие вещества (такие как парафиновый воск, стеараты, включая стеарат алюминия, лития, бутила, магния и натрия, олеиновую кислоту, полигликоли, графит и нитрид бора) и другие связующие, такие как полиэтиленгликоль.

[0036] Прижимное устройство, такое как сплошное кольцо или кольцевой стержень из циркония или какого-либо другого материала, который не взаимодействует с ураном в верхней части массы порошка, может минимизировать перемещение порошка, обеспечивая сжимающие нагрузки под действием силы тяжести. Прижимное устройство может быть временным для использования только во время транспортировки, обработки или хранения и может быть удалено перед использованием. Одно из потенциальных преимуществ топливного порошка состоит в том, что вероятность разрушения оболочки в результате механического взаимодействия топливной таблетки с оболочкой может быть значительно ниже, чем у топливной таблетки из твердого оксида. Другой причиной является низкая стоимость выполнения уплотнения путем вибрации по сравнению со сложным процессом спекания оксидной топливной таблетки.

[0037] Пористость, определенная как отношение объема пустого пространства к общему объему материала кольцевого металлического топлива, может составлять от 0,1 до 0,5. Это эксплуатационная пористость, которая может первоначально проявляться в топливе или которая может быть достигнута после определенного периода облучения (например, после достижения номинальной рабочей температуры реактора, через 1 час при рабочей температуре, через 1 день, через 1 неделю, или даже через 1 месяц). Пористая природа металлического топлива обеспечивает преимущество, заключающееся в получающейся общей теплопроводности топливного стержня при рабочих температурах,

по сравнению с непористыми топливами с гелиевыми зазорами между топливом и оболочкой, поскольку пористая структура обеспечивает возможность теплового расширения без существенного влияния на структурную целостность топлива, создавая в то же самое время хороший тепловой контакт между топливом и оболочками. Пористость также имеет другой полезный эффект, заключающийся в том, что она обеспечивает пустое пространство для сбора продуктов ядерного деления без заметного разбухания топлива с течением времени из-за продолжающегося ядерного деления.

[0038] Используемые оболочки могут быть выполнены из любого материала, известного в настоящее время, или из того, что будет разработан позднее, который подходит для использования в качестве оболочки с металлическим топливом. Они могут варьироваться в зависимости от фактических видов используемого топлива, но подходящие оболочки включают нержавеющие стали и ферритные мартенситные стали, такие как те, которые раскрыты в опубликованной заявке на патент США № 2017/0292179, озаглавленной «ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСТОЙЧИВЫЕ К РАДИАЦИИ ФЕРРИТНЫЕ МАРТЕНСИТНЫЕ СТАЛИ», включенной в настоящий документ в качестве ссылки для оболочек, которые он раскрывает. Оболочки могут также представлять собой дуплексные или триплексные слои, такие как те, которые описаны в находящейся на рассмотрении заявке на патент США № 15/623119, озаглавленной «ОБОЛОЧКА ИЗ СПЛАВА СТАЛЬ-ВАНАДИЙ ДЛЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА», включенной в настоящий документ в качестве ссылки для оболочек, которые она раскрывает.

[0039] Циркониевые сплавы, такие как ZIRLO™ и сплавы на основе циркаллоя, могут использоваться в качестве материала оболочки. В качестве альтернативы, в некоторых вариантах выполнения кольцевые металлические топлива используют оболочки, которые не содержат циркония. При использовании с ВВЭР это дает возможность исключить контактирующий с водой цирконий из активной зоны и, следовательно, уменьшает вероятность возникновения реакции циркония с водой (с соответствующим образованием водорода, приведшим к взрыву при катастрофе в Фукусиме), которая при высоких температурах может происходить как неуправляемая реакция.

[0040] Оболочки могут представлять собой отдельные элементы, которые впоследствии объединяют с топливом для создания топливных стержней, или же они могут быть совместно экструдированы или нанесены на наружную поверхность металлического топлива. В еще одном варианте выполнения оболочки и/или топливо

могут быть созданы с использованием процесса аддитивного производства, либо по отдельности, а затем собраны, либо оболочка и топливо могут быть созданы в одном процессе аддитивного производства в качестве цельного элемента.

[0041] Фиг.7 иллюстрирует вид сбоку тепловыделяющей сборки 700 для использования в водо-водяном энергетическом реакторе. Сборка содержит набор топливных стержней 720, проходящих насквозь и удерживаемых на месте несколькими (показаны шесть) дистанционирующими решетками 730. Хвостовик 740 поддерживает тепловыделяющую сборку 700 внутри активной зоны реактора. В верхней части сборки 700 установлена головка 710, включая несколько направляющих кольцевых трубок 702. Направляющие кольцевые трубки 702 проходят от головки 710 до хвостовика 740. Дистанционирующие решетки 730 могут быть прикреплены к направляющим кольцевым трубкам 702 для устойчивости. Над головкой 710 в верхней части сборки 700 установлена прижимная пружина 712 для обеспечения надлежащей величины прижимного усилия, действующего на элементы тепловыделяющей сборки.

[0042] Следует отметить, что топливные стержни, описанные выше, не обязательно должны быть однородными по своей длине. Например, вдоль длины топливного стержня могут быть расположены области большего или меньшего обогащения. Это может быть достигнуто путем выполнения разных кольцевых блоков топлива или разных топливных частиц в разных областях во время сборки. Аналогичным образом, конкретные области могут быть снабжены выгорающим поглотителем, другими добавками или различными видами металлического топлива. В дополнение к разным материалам, разные области могут иметь различные свойства, такие как разные пористости, объемные плотности или разные размеры кольцевого блока, даже если материал металлического топлива остается тем же самым.

[0043] Тепловыделяющие сборки, изображенные на Фиг.3 и 7, являются всего лишь двумя примерами такой сборки, которые могут быть усовершенствованы с использованием вариантов выполнения кольцевых металлических топливных стержней, описанными выше. Для использования в других типах реакторов существуют многие другие конструкции тепловыделяющих сборок. Расположение топливных стержней и других типов стержней (например, регулирующих стержней, отражателей и измерительных стержней) в конкретной сборке для конкретного реактора по мере необходимости может быть модифицировано. Форма и расположение стержней в сборке, а также форма, ориентация и расположение сборок в активной зоне реактора могут различаться в зависимости от конкретной конструкции реактора, а также от количества,

типа и характеристик используемых кольцевых металлических топливных стержней.

Способы изготовления кольцевых металлических топливных стержней

[0044] Кольцевые металлические топливные стержни, описанные выше, могут быть изготовлены несколькими различными способами. В зависимости от типа топлива, требуемой пористости топлива и других выбранных пользователем критериев, конкретные способы могут быть более или менее подходящими.

[0045] Один способ состоит в том, что изготавливают кольцевое металлическое топливо и оболочку в виде отдельных элементов, а затем собирают их в топливный стержень. В одном варианте выполнения этого способа топливо, внутреннюю оболочку и наружную оболочку изготавливают по отдельности, а затем собирают в один или несколько сегментов. Если для получения требуемой длины используют несколько сегментов, то эти сегменты затем собирают вместе. После сборки на обоих концах устанавливают торцевые крышки, и стержень готов к использованию. Другие внутренние элементы, такие как прижимное устройство и/или пружина камеры, также могут быть включены и собраны в это время, в зависимости от конструкции. В альтернативном варианте выполнения этого способа внутренняя и наружная оболочки могут быть соединены с торцевой крышкой, а затем может быть вставлен один или несколько кольцевых сегментов металлического топлива, после чего стержень может быть закрыт другой торцевой крышкой. Также возможны и другие порядки сборки. Как описано выше, при использовании в реакторе металлическое топливо будет расширяться, достигать своей расчетной пористости и устранять любые зазоры между топливом и оболочками, создавая, тем самым, топливный стержень с хорошей теплопроводностью между топливом и оболочками.

[0046] Для создания одного или нескольких элементов, как было упомянуто выше, может быть использована трехмерная (3D) печать или другие технологии аддитивного производства. В одном варианте выполнения топливо и оболочки могут быть напечатаны в 3D как отдельные элементы, или же наружная оболочка – топливо - внутренняя оболочка могут быть напечатаны в 3D как единый интегрированный промежуточный элемент, который затем закрывают для получения готового топливного стержня.

[0047] Другой способ включает совместную экструзию по меньшей мере двух элементов топливного стержня. Например, внутренняя оболочка и металлическое топливо могут быть совместно экструдированы, а затем собраны вместе с наружной оболочкой. В качестве альтернативы, наружная оболочка и металлическое топливо могут быть

совместно экструдированы, а затем собраны вместе с внутренней оболочкой. В еще одном варианте выполнения три элемента (внутренняя оболочка, топливо и наружная оболочка) могут быть совместно экструдированы одновременно. Стержни, созданные с использованием способов аддитивного производства и совместной экструзии, могут или не могут полагаться на тепловое расширение топлива для создания хорошей теплового соединения между оболочками и топливом. Например, в одном варианте выполнения технология изготовления создает стержни с металлургическими связями между одной или обеими оболочками и топливом. В этих вариантах выполнения пористость является полезной для снятия напряжения, которое в противном случае могло бы возникнуть из-за теплового расширения топлива при рабочих температурах, что позволяет снизить требования к прочности оболочки.

[0048] Вариантом способа совместной экструзии является способ изготовления двухкомпонентного промежуточного элемента. Этот вариант выполнения показан на Фиг.8. В этом варианте 800 выполнения создают 802 наружную оболочку с кольцевым топливом на внутренней части наружной оболочки, например, путем сборки, совместной экструзии в виде одной детали, аддитивного производства в виде одной детали или путем осаждения одного материала (т.е. материала оболочки или топлива) на деталь другого. В качестве второй детали отдельно создают 804 внутреннюю оболочку с кольцевым топливным на наружной поверхности внутренней оболочки. Эти два промежуточных элемента затем собирают 806 вместе и закрывают 808 с торцов для получения готового топливного стержня.

[0049] Фиг.5 иллюстрирует промежуточные элементы, полученные способом изготовления двухкомпонентного промежуточного элемента, описанного выше. Наружную оболочку 502 и по меньшей мере некоторое количество металлического топлива 504 совместно экструдировать или иным образом изготавливают в качестве первого промежуточного элемента 506. Внутреннюю оболочку 508 и по меньшей мере некоторое количество металлического топлива 504 создают в качестве второго промежуточного элемента 510. Два промежуточных элемента 506 510 затем собирают вместе в третий промежуточный элемент 512, который готов к закрытию с торца. Внутренний диаметр первого промежуточного элемента 506 и наружный диаметр второго промежуточного элемента 510 могут быть выполнены с обеспечением легкого скольжения (например, с расстоянием от 0,01 до 1 мм или приблизительно от 0,05 до 0,1 мм между внутренним диаметром первого промежуточного элемента 506 и наружным диаметром второго промежуточного элемента 510) или может быть еще больше увеличен для

создания большего зазора 514 между двумя кольцевыми топливами.

[0050] Ожидается, что топливные стержни, полученные способом совместной экструзии с двухкомпонентным промежуточным элементом, будут иметь лучшие характеристики, чем те, которые созданы некоторыми из других способов, описанных выше. Способ изготовления двухкомпонентного промежуточного элемента, особенно при использовании совместной экструзии, создает более плотный контакт и лучшую контактную поверхность между топливом и оболочками, чем достигается простыми способами сборки. Это улучшает теплопроводность между топливом и оболочками по сравнению с другими способами изготовления. Кроме того, этот способ также обеспечивает пространство (то есть зазор 514 между указанными двумя поверхностями топлива промежуточных элементов 506, 510) для теплового расширения топлива, которое не оказывает отрицательного влияния на теплопроводность между топливом и любой из оболочек 502, 508. Пористая природа металлического топлива обеспечивает дополнительное преимущество, создавая пространство для сбора продуктов ядерного деления.

[0051] Еще один способ изготовления применим при изготовлении кольцевых металлических топливных стержней из частиц металлического топлива, таких как порошок U-Zr. В этом способе внутреннюю и наружную оболочки собирают вместе, а затем топливный порошок вводят в область между двумя оболочками. Топливный порошок затем может быть уплотнен либо с помощью виброуплотнения, либо с помощью традиционных технологий трамбовки, чтобы получить в топливе требуемую объемную плотность и пористость. Затем для создания готового топливного стержня может быть наложена торцевая крышка или крышки. Виброуплотнение может включать воздействие на порошок в оболочках вибрацией с выбранной амплитудой на выбранной частоте в течение выбранного периода времени. В одном варианте выполнения для достижения требуемой пористости задают амплитуду, частоту и время вибрации. В альтернативном варианте выполнения контролируют пористость и/или объемную плотность порошка, а одно или несколько из следующих параметров: амплитуда, частота и время вибрации, изменяют до тех пор, пока не будут достигнуты требуемые расчетные значения. Как было упомянуто выше, прижимное устройство, такое как стержень, кольцо или трубка из циркония или другого нереакционноспособного металла или материала, может создавать дополнительные силы уплотнения во время процесса уплотнения и может минимизировать риск массивного перемещения порошка во время транспортировки и манипулирования с ним.

[0052] Фиг.6 иллюстрирует вид в разрезе части кольцевого пространства между оболочками, показывающий топливо и прижимное устройство. На Фиг.6 прижимное устройство 618 представляет собой кольцо из Zr с размером, обеспечивающим его размещение во внутренней оболочке 604 и в наружной оболочке 606. Прижимное устройство 618 либо опирается, либо с повторениями прижимается к топливному порошку 602 в кольцевом пространстве. Топливный стержень 600 также может вибрировать, как описано выше.

[0053] Кроме того, устройство 618 может представлять собой сетку, пористый кольцевой стержень или другое устройство, выполненное с возможностью обеспечения протекания газа через устройство или вокруг него, что позволяет продуктам ядерного деления выделяться из топлива в область объема внутри топливного стержня, например, у торцевых крышек.

[0054] В дополнение к описанным выше вариантам выполнения, дополнительные варианты выполнения раскрыты в следующих пронумерованных вариантах:

1. Ядерный топливный стержень, содержащий:
наружную оболочку,
внутреннюю оболочку, расположенную внутри наружной оболочки, причем внутренняя оболочка образует канал для теплоносителя, и
металлическое топливо, расположенное между наружной оболочкой и внутренней оболочкой.
2. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором металлическое топливо имеет пористость от 0,1 до 0,5.
3. Ядерный топливный стержень по п.1 или 2, в котором металлическое топливо выбрано из урана, плутония, смеси урана и плутония, сплава урана, сплава плутония или сплава урана и плутония.
4. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором металлическое топливо выбрано из урана, плутония, сплава урана или сплава плутония и имеет пористость от 0,1 до 0,5.
5. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-4, в котором канал для теплоносителя проходит по всей длине топливного стержня.
6. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-5, также содержащий торцевую крышку на каждом конце топливного стержня, так что металлическое топливо удерживается внутри топливного стержня.
7. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-6, также содержащий по меньшей мере один прижимной элемент между наружной оболочкой и внутренней

оболочкой, который прикладывает к пористому металлическому топливу прижимное усилие.

8. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-7, в котором металлическое топливо содержит по меньшей мере одно кольцо из твердого металлического топлива, расположенное между внутренней оболочкой и наружной оболочкой.

9. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-8, в котором металлическое топливо имеет пористость от 0,1 до 0,5 после одного месяца облучения.

10. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-9, в котором металлическое топливо представляет собой некоторое количество металлического топливного порошка, помещенного в пространство между внутренней оболочкой и наружной оболочкой.

11. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-10, в котором металлическое топливо выбрано из сплава U-Zr, сплава U-Zr-Nb, сплава U-Pu-Zr, сплава U-Pu-Mo, сплава U-Pu-Nb и сплава U-Pu-Ti.

12. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-11, в котором металлическое топливо представляет собой сплав урана и один или несколько из Cr, Ti, V, Ni, Nb, Al, Si и Mo.

13. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-12, в котором наружная оболочка имеет поперечное сечение в форме, выбранной из квадрата, круга, прямоугольника, шестиугольника, восьмиугольника, многоугольника и лепестковой формы.

14. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-13, в котором наружная поверхность ядерного топливного стержня имеет спиральную канавку вдоль своей длины.

15. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-14, в котором канал для теплоносителя имеет поперечное сечение в форме, выбранной из квадрата, круга, прямоугольника, шестиугольника, восьмиугольника, многоугольника и лепестковой формы.

16. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-15, в котором канал для теплоносителя имеет внутреннюю структуру.

17. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-16, в котором канал для теплоносителя имеет внутреннюю структуру, которая спирально закручена по длине стержня.

18. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-17, в котором внутренняя оболочка, или наружная оболочка, или они обе выполнены из стали.

19. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-18, в котором внутренняя

оболочка, или наружная оболочка, или они обе выполнены из циркония или сплава циркония.

20. Ядерный топливный стержень по любому из пп.1-19, в котором между внутренней оболочкой и металлическим топливом, или между наружной оболочкой и металлическим топливом, или в обоих этих местах установлен по меньшей мере один вкладыш.

21. Тепловыделяющая сборка для использования в водо-водяном энергетическом реакторе (ВВЭР), содержащая:

корпус, сформированный и приспособленный для активной зоны ВВЭР, и топливные стержни, расположенные внутри корпуса,

причем по меньшей мере один из указанных топливных стержней представляет собой топливный стержень по п.1.

22. Тепловыделяющая сборка по п.21, в которой указанный по меньшей мере один из топливных стержней представляет собой топливный стержень по меньшей мере по одному из п.п.2-20.

23. Водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), содержащий по меньшей мере одну тепловыделяющую сборку по п.21 или 22.

24. Способ изготовления кольцевого ядерного топливного стержня, включающий:

создание первого промежуточного элемента, причем первый промежуточный элемент содержит наружную оболочку, имеющую внутреннюю поверхность и наружную поверхность и имеющую первый слой металлического топлива на внутренней поверхности;

создание второго промежуточного элемента, причем второй промежуточный элемент содержит внутреннюю оболочку, имеющую внутреннюю поверхность и наружную поверхность и имеющую второй слой металлического топлива на наружной поверхности; и

сборку вместе первого промежуточного элемента со вторым промежуточным элементом для получения кольцевого ядерного топливного стержня.

25. Способ по п.24, в котором закрывают ядерный топливный стержень по меньшей мере на одном конце.

26. Способ по п.24 или 25, в котором при создании первого промежуточного элемента совместно экструдировать материал наружной оболочки и металлическое топливо для создания первого промежуточного элемента.

27. Способ по любому из пп.24-26, в котором при создании первого

промежуточного элемента осаждают материал наружной оболочки на пористое металлическое топливо или металлическое топливо на наружную оболочку, чтобы создать первый промежуточный элемент.

28. Способ по любому из пп.24-27, в котором при создании второго промежуточного элемента совместно экструдируют материал внутренней оболочки и металлическое топливо для создания второго промежуточного элемента.

29. Способ по любому из пп.24-28, в котором при создании второго промежуточного элемента осаждают материал внутренней оболочки на металлическое топливо или металлическое топливо на внутреннюю оболочку для создания второго промежуточного элемента.

30. Способ по любому из пп.24-29, в котором металлическое топливо имеет пористость от 0,1 до 0,5 только после облучения.

31. Способ по любому из пп.24-30, в котором по меньшей мере один из первого слоя металлического топлива и второго слоя металлического топлива имеет начальную пористость от 0,1 до 0,5.

32. Способ изготовления кольцевого ядерного топливного стержня, включающий:
создание первого промежуточного элемента, причем первый промежуточный элемент содержит внутреннюю оболочку внутри наружной оболочки с образованием кольцевого пространства между внутренней оболочкой и наружной оболочкой;

размещение порошка из металлического топлива в кольцевом пространстве между внутренней и наружной оболочками;

уплотнение порошка из металлического топлива в кольцевом пространстве между внутренней и наружной оболочками до тех пор, пока в металлическом топливе не будет достигнута расчетная пористость; и

закрытие уплотненного порошка внутри кольцевого пространства между внутренней и наружной оболочками.

33. Способ по п.32, в котором при уплотнении порошка из металлического топлива выполняют вибрацию порошка в течение некоторого периода времени с выбранной частотой.

34. Способ по п.32 или 33, в котором при вибрации порошкового металлического топлива подвергают порошок воздействию вибрации с заданной амплитудой и с заданной частотой в течение заданного периода времени.

35. Способ по любому из пп.32-34, в котором при уплотнении порошка из металлического топлива выполняют контроль пористости и/или объемной плотности

порошка во время уплотнения порошка.

36. Способ по любому из пп.32-35, в котором при вибрации порошкового металлического топлива изменяют одно или несколько из следующих параметров: амплитуда, частота и время вибрации, до достижения требуемой расчетной пористости.

37. Способ изготовления кольцевого ядерного топливного стержня по любому из пп.1-20, включающий:

создание первого промежуточного элемента, причем первый промежуточный элемент содержит наружную оболочку, имеющую внутреннюю поверхность и наружную поверхность и имеющую первый слой металлического топлива на внутренней поверхности;

создание второго промежуточного элемента, причем второй промежуточный элемент содержит внутреннюю оболочку, имеющую внутреннюю поверхность и наружную поверхность и имеющую второй слой металлического топлива на наружной поверхности; и

сборку вместе первого промежуточного элемента со вторым промежуточным элементом для получения кольцевого ядерного топливного стержня.

38. Способ по п.37, в котором закрывают ядерный топливный стержень по меньшей мере на одном его конце.

39. Способ по п.37 или 38, в котором при создании первого промежуточного элемента совместно экструдируют наружную оболочку и металлическое топливо.

40. Способ по любому из пп.37-39, в котором при создании первого промежуточного элемента осаждают материал наружной оболочки на пористое металлическое топливо или осаждают металлическое топливо на наружную оболочку.

41. Способ по любому из пп.37-40, в котором при создании второго промежуточного элемента совместно экструдируют материал внутренней оболочки и металлическое топливо.

42. Способ по любому из пп.37-41, в котором при создании второго промежуточного элемента осаждают материал внутренней оболочки на металлическое топливо или осаждают металлическое топливо на внутреннюю оболочку.

43. Способ по любому из пп.37-42, в котором металлическое топливо имеет пористость от 0,1 до 0,5 только после облучения.

44. Способ по любому из пп.37-43, в котором по меньшей мере один из первого слоя металлического топлива и второго слоя металлического топлива имеет начальную пористость от 0,1 до 0,5.

45. Способ изготовления кольцевого ядерного топливного стержня по любому из пп.1-20, включающий:

создание первого промежуточного элемента, причем первый промежуточный элемент содержит внутреннюю оболочку внутри наружной оболочки с образованием кольцевого пространства между внутренней оболочкой и наружной оболочкой;

размещение металлического топливного порошка в кольцевом пространстве между внутренней и наружной оболочками;

уплотнение металлического топливного порошка в кольцевом пространстве между внутренней и наружной оболочками до тех пор, пока в металлическом топливе не будет достигнута расчетная пористость; и

закрытие уплотненного металлического топливного порошка в кольцевом пространстве между внутренней и наружной оболочками.

46. Способ по п.45, в котором при уплотнении металлического топливного порошка выполняют вибрацию металлического топливного порошка в течение некоторого периода времени с выбранной частотой.

47. Способ по п.45 или 46, в котором при вибрации металлического топливного порошка подвергают металлический топливный порошок воздействию вибрации с заданной амплитудой и с заданной частотой в течение заданного периода времени.

48. Способ по любому из пп.45-47, в котором при уплотнении металлического топливного порошка выполняют контроль его пористости и/или объемной плотности.

49. Способ по любому из пп.45-48, в котором при вибрации металлического топливного порошка изменяют одно или несколько из следующих параметров: амплитуда, частота и время вибрации, до достижения требуемой расчетной пористости.

[0055] Следует понимать, что системы и способы, описанные в настоящем документе, хорошо приспособлены для достижения упомянутых целей и преимуществ, а также целей и преимуществ, которые присущи им. Специалистам будет понятно, что способы и системы в этом описании могут быть реализованы многими способами и, как таковые, не должны ограничиваться вышеприведенными иллюстративными вариантами выполнения и приведенными примерами. В этом отношении любое количество признаков различных вариантов выполнения, описанных в настоящем документе, может быть объединено в один единственный вариант выполнения, и возможны альтернативные варианты выполнения, имеющие меньше или больше, чем все описанные в настоящем документе признаки.

[0056] Несмотря на то, что различные варианты выполнения были описаны для

целей этого раскрытия, могут быть сделаны различные изменения и модификации, которые находятся в пределах объема, предусмотренного настоящим раскрытием. Могут быть сделаны многочисленные другие изменения, которые легко могут быть предложены специалистам и которые охватываются сущностью изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Ядерный топливный стержень, содержащий:
наружную оболочку,
внутреннюю оболочку, расположенную внутри наружной оболочки, причем внутренняя оболочка образует канал для теплоносителя, и
металлическое топливо, расположенное между наружной оболочкой и внутренней оболочкой.
2. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором металлическое топливо имеет пористость от 0,1 до 0,5.
3. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором металлическое топливо выбрано из урана, плутония, смеси урана и плутония, сплава урана, сплава плутония или сплава урана и плутония.
4. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором металлическое топливо выбрано из урана, плутония, сплава урана или сплава плутония и имеет пористость от 0,1 до 0,5.
5. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором канал для теплоносителя проходит по всей длине топливного стержня.
6. Ядерный топливный стержень по п.1, также содержащий торцевую крышку на каждом конце топливного стержня, так что металлическое топливо удерживается внутри топливного стержня.
7. Ядерный топливный стержень по п.1, также содержащий по меньшей мере одну пружину между наружной оболочкой и внутренней оболочкой, прикладываемую к пористому металлическому топливу прижимное усилие.
8. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором металлическое топливо содержит по меньшей мере одно кольцо из твердого металлического топлива, расположенное между внутренней оболочкой и наружной оболочкой.
9. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором металлическое топливо имеет пористость от 0,1 до 0,5 после одного месяца облучения.
10. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором металлическое топливо представляет собой некоторое количество металлического топливного порошка, помещенного в пространство между внутренней оболочкой и наружной оболочкой.
11. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором металлическое топливо выбрано из сплава U-Zr, сплава U-Zr-Nb, сплава U-Pu-Zr, сплава U-Pu-Mo, сплава U-Pu-Nb и сплава U-Pu-Ti.

12. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором металлическое топливо представляет собой сплав урана и один или несколько из Cr, Ti, V, Ni, Nb, Al, Si и Mo.

13. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором наружная оболочка имеет поперечное сечение в форме, выбранной из квадрата, круга, прямоугольника, шестиугольника, восьмиугольника, многоугольника и лепестковой формы.

14. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором наружная поверхность ядерного топливного стержня имеет спиральную канавку вдоль своей длины.

15. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором канал для теплоносителя имеет поперечное сечение в форме, выбранной из квадрата, круга, прямоугольника, шестиугольника, восьмиугольника, многоугольника и лепестковой формы.

16. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором канал для теплоносителя имеет внутреннюю структуру.

17. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором канал для теплоносителя имеет внутреннюю структуру, спирально закрученную по длине ядерного топливного стержня.

18. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором внутренняя оболочка, или наружная оболочка, или они обе выполнены из стали.

19. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором внутренняя оболочка, или наружная оболочка, или они обе выполнены из циркония или сплава циркония.

20. Ядерный топливный стержень по п.1, в котором между внутренней оболочкой и металлическим топливом, или между наружной оболочкой и металлическим топливом, или в обоих этих местах установлен по меньшей мере один вкладыш.

21. Тепловыделяющая сборка для использования в водо-водяном энергетическом реакторе (ВВЭР), содержащая:

корпус, сформированный и приспособленный для активной зоны ВВЭР, и

топливные стержни, расположенные внутри корпуса,

причем по меньшей мере один из указанных топливных стержней представляет собой топливный стержень по п.1.

22. Тепловыделяющая сборка по п.21, в которой указанный по меньшей мере один из топливных стержней представляет собой топливный стержень по меньшей мере по одному из п.п.2-20.

23. Водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), содержащий по меньшей мере одну тепловыделяющую сборку по п.21 или п.22.

24. Способ изготовления кольцевого ядерного топливного стержня, включающий:

создание первого промежуточного элемента, причем первый промежуточный

элемент содержит наружную оболочку, имеющую внутреннюю поверхность и наружную поверхность и имеющую первый слой металлического топлива на внутренней поверхности,

создание второго промежуточного элемента, причем второй промежуточный элемент содержит внутреннюю оболочку, имеющую внутреннюю поверхность и наружную поверхность и имеющую второй слой металлического топлива на наружной поверхности, и

сборку вместе первого промежуточного элемента со вторым промежуточным элементом для получения кольцевого ядерного топливного стержня.

25. Способ по п.24, в котором закрывают кольцевой ядерный топливный стержень по меньшей мере на одном конце.

26. Способ по п.24, в котором при создании первого промежуточного элемента совместно экструдировать материал наружной оболочки и металлическое топливо.

27. Способ по п.24, в котором при создании первого промежуточного элемента осаждают материал наружной оболочки на пористое металлическое топливо или осаждают металлическое топливо на наружную оболочку.

28. Способ по п.24, в котором при создании второго промежуточного элемента совместно экструдировать материал внутренней оболочки и металлическое топливо.

29. Способ по п.24, в котором при создании второго промежуточного элемента осаждают материал внутренней оболочки на металлическое топливо или осаждают металлическое топливо на внутреннюю оболочку.

30. Способ по п.24, в котором металлическое топливо имеет пористость от 0,1 до 0,5 только после облучения.

31. Способ по п.24, в котором по меньшей мере один из первого слоя металлического топлива и второго слоя металлического топлива имеет начальную пористость от 0,1 до 0,5.

32. Способ изготовления кольцевого ядерного топливного стержня, включающий:
создание первого промежуточного элемента, причем первый промежуточный элемент содержит внутреннюю оболочку внутри наружной оболочки с образованием кольцевого пространства между внутренней оболочкой и наружной оболочкой,

размещение металлического топливного порошка в кольцевом пространстве между внутренней и наружной оболочками,

уплотнение металлического топливного порошка в кольцевом пространстве между внутренней и наружной оболочками до тех пор, пока в металлическом топливном

порошке не будет достигнута расчетная пористость, и

закрытие уплотненного металлического топливного порошка внутри кольцевого пространства между внутренней и наружной оболочками.

33. Способ по п.32, в котором при уплотнении металлического топливного порошка выполняют вибрацию металлического топливного порошка в течение некоторого периода времени с выбранной частотой.

34. Способ по п.32, в котором при вибрации металлического топливного порошка подвергают металлический топливный порошок воздействию вибрации с заданной амплитудой и с заданной частотой в течение заданного периода времени.

35. Способ по п.32, в котором при уплотнении металлического топливного порошка выполняют контроль пористости и/или объемной плотности металлического топливного порошка во время его уплотнения.

36. Способ по п.32, в котором при вибрации металлического топливного порошка изменяют одно или несколько из следующих параметров: амплитуда, частота и время вибрации, до достижения требуемой расчетной пористости.

37. Способ изготовления кольцевого ядерного топливного стержня по любому из пп.1-20, включающий:

создание первого промежуточного элемента, причем первый промежуточный элемент содержит наружную оболочку, имеющую внутреннюю поверхность и наружную поверхность и имеющую первый слой металлического топлива на внутренней поверхности,

создание второго промежуточного элемента, причем второй промежуточный элемент содержит внутреннюю оболочку, имеющую внутреннюю поверхность и наружную поверхность и имеющую второй слой металлического топлива на наружной поверхности, и

сборку вместе первого промежуточного элемента со вторым промежуточным элементом для получения кольцевого ядерного топливного стержня.

38. Способ по п.37, в котором закрывают кольцевой ядерный топливный стержень по меньшей мере на одном его конце.

39. Способ по п.37, в котором при создании первого промежуточного элемента совместно экструдировать наружную оболочку и металлическое топливо.

40. Способ по п.37, в котором при создании первого промежуточного элемента осаждают материал наружной оболочки на пористое металлическое топливо или осаждают металлическое топливо на наружную оболочку.

41. Способ по п.37, в котором при создании второго промежуточного элемента совместно экструдировывают материал внутренней оболочки и металлическое топливо.

42. Способ по п.37, в котором при создании второго промежуточного элемента осаждают материал внутренней оболочки на металлическое топливо или осаждают металлическое топливо на внутреннюю оболочку.

43. Способ по п.37, в котором металлическое топливо имеет пористость от 0,1 до 0,5 только после облучения.

44. Способ по п.37, в котором по меньшей мере один из первого слоя металлического топлива и второго слоя металлического топлива имеет начальную пористость от 0,1 до 0,5.

45. Способ изготовления кольцевого ядерного топливного стержня по любому из пп.1-20, включающий:

создание первого промежуточного элемента, причем первый промежуточный элемент содержит внутреннюю оболочку внутри наружной оболочки с образованием кольцевого пространства между внутренней оболочкой и наружной оболочкой,

размещение металлического топливного порошка в кольцевом пространстве между внутренней и наружной оболочками,

уплотнение металлического топливного порошка в кольцевом пространстве между внутренней и наружной оболочками до тех пор, пока в металлическом топливном порошке не будет достигнута расчетная пористость, и

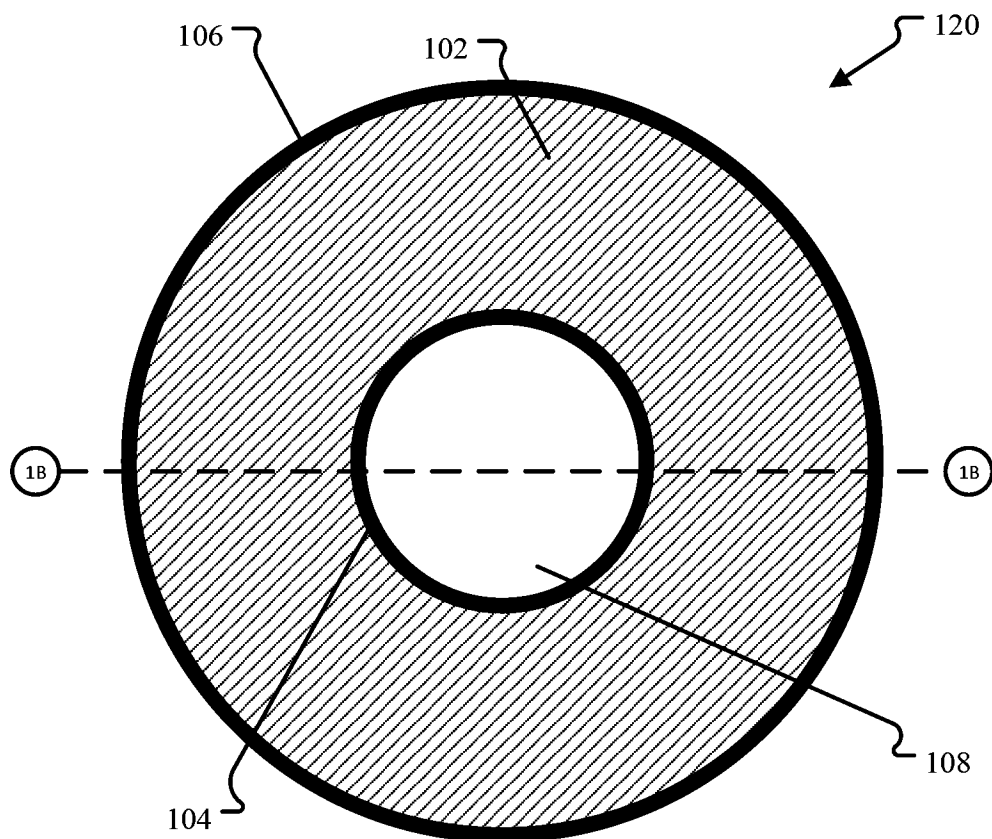
закрытие уплотненного металлического топливного порошка в кольцевом пространстве между внутренней и наружной оболочками.

46. Способ по п.45, в котором при уплотнении металлического топливного порошка выполняют вибрацию металлического топливного порошка в течение некоторого периода времени с выбранной частотой.

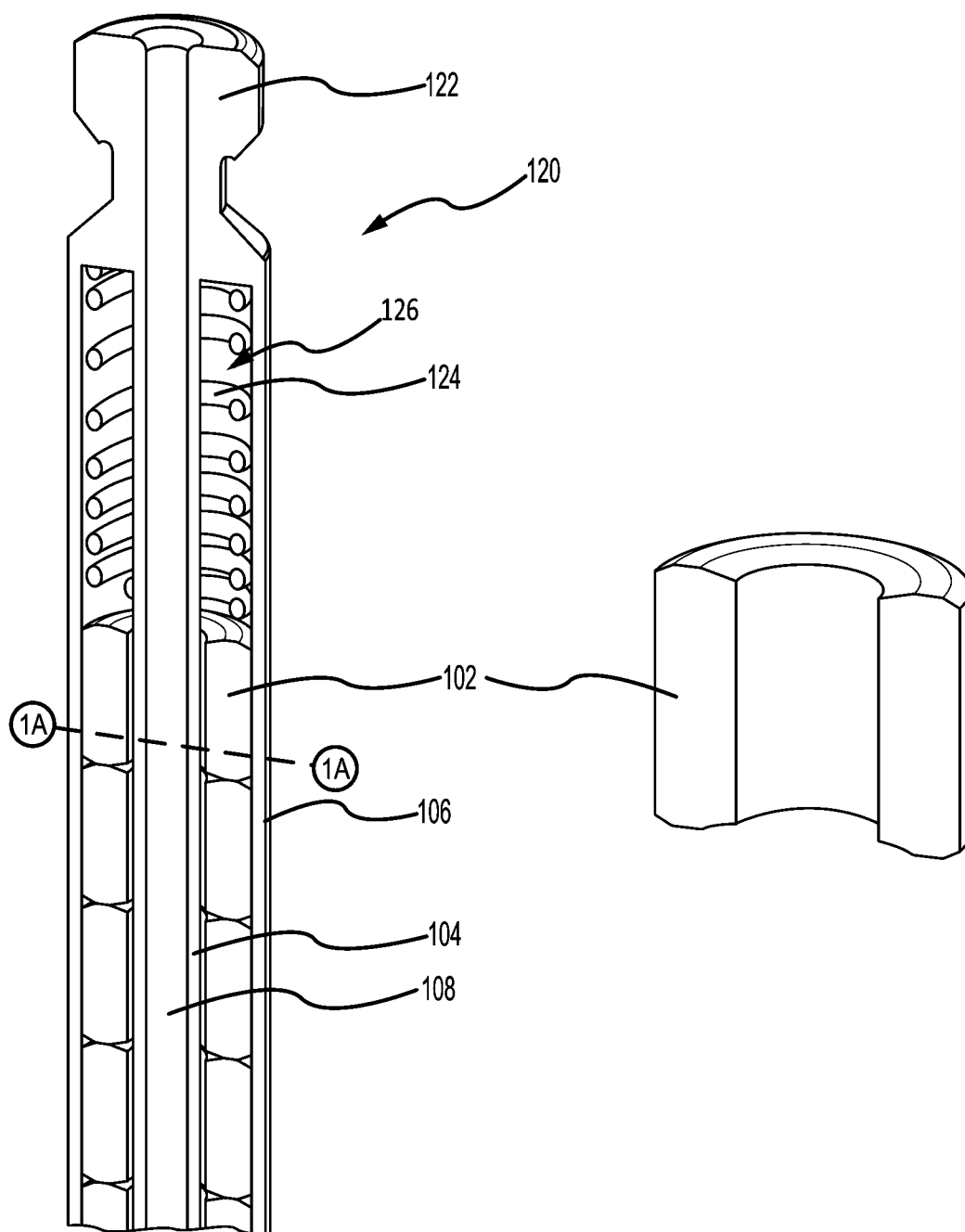
47. Способ по п.45, в котором при вибрации металлического топливного порошка подвергают металлический топливный порошок воздействию вибрации с заданной амплитудой и с заданной частотой в течение заданного периода времени.

48. Способ по п.45, в котором при уплотнении металлического топливного порошка выполняют контроль пористости и/или объемной плотности металлического топливного порошка.

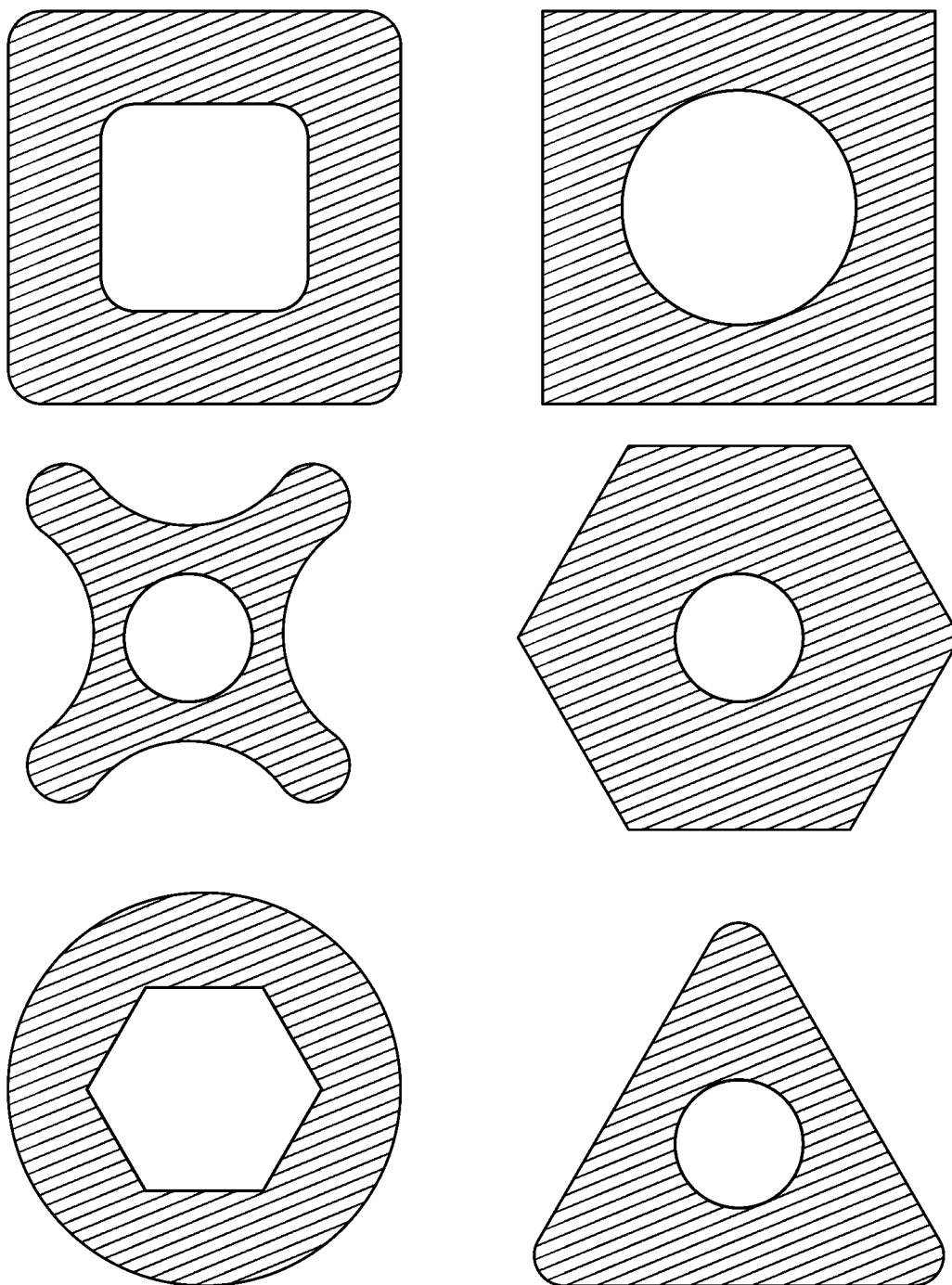
49. Способ по п.45, в котором при вибрации металлического топливного порошка изменяют одно или несколько из следующих параметров: амплитуда, частота и время вибрации, до достижения требуемой расчетной пористости.



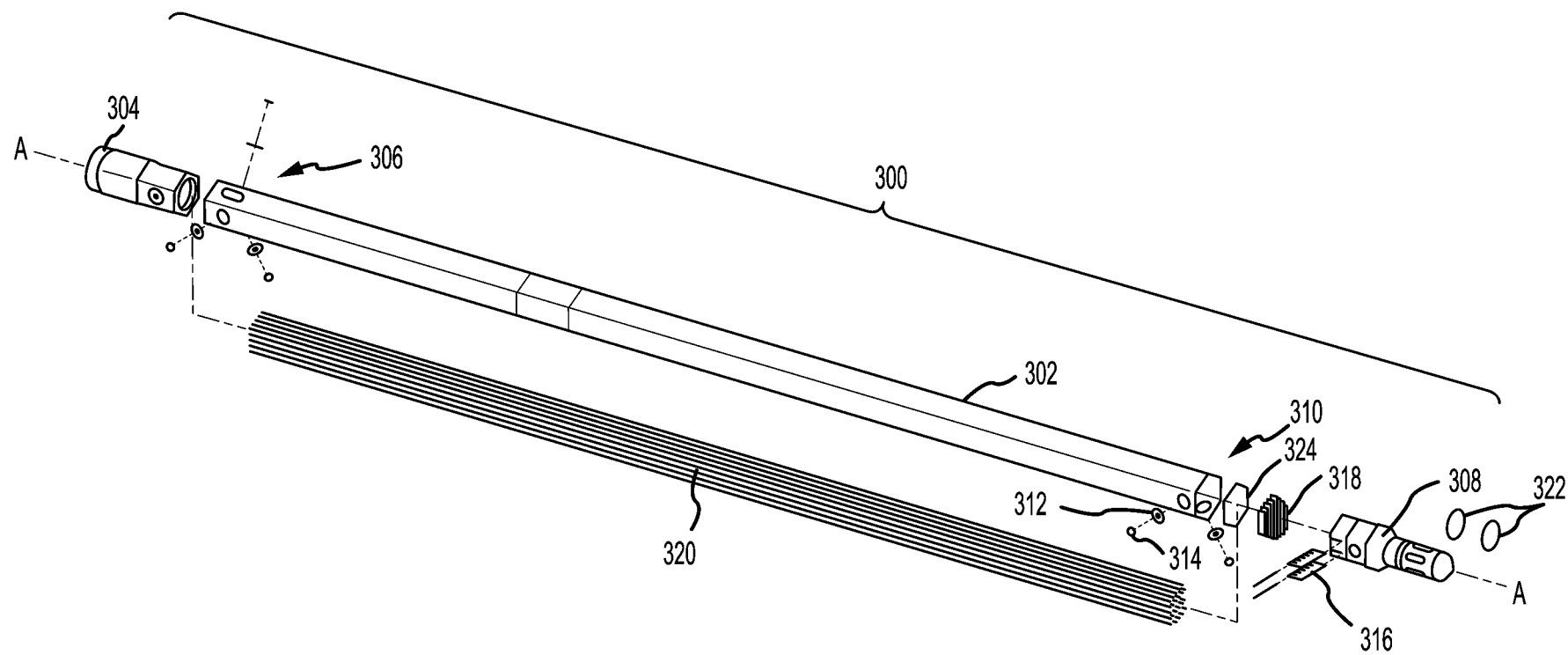
Фиг. 1А



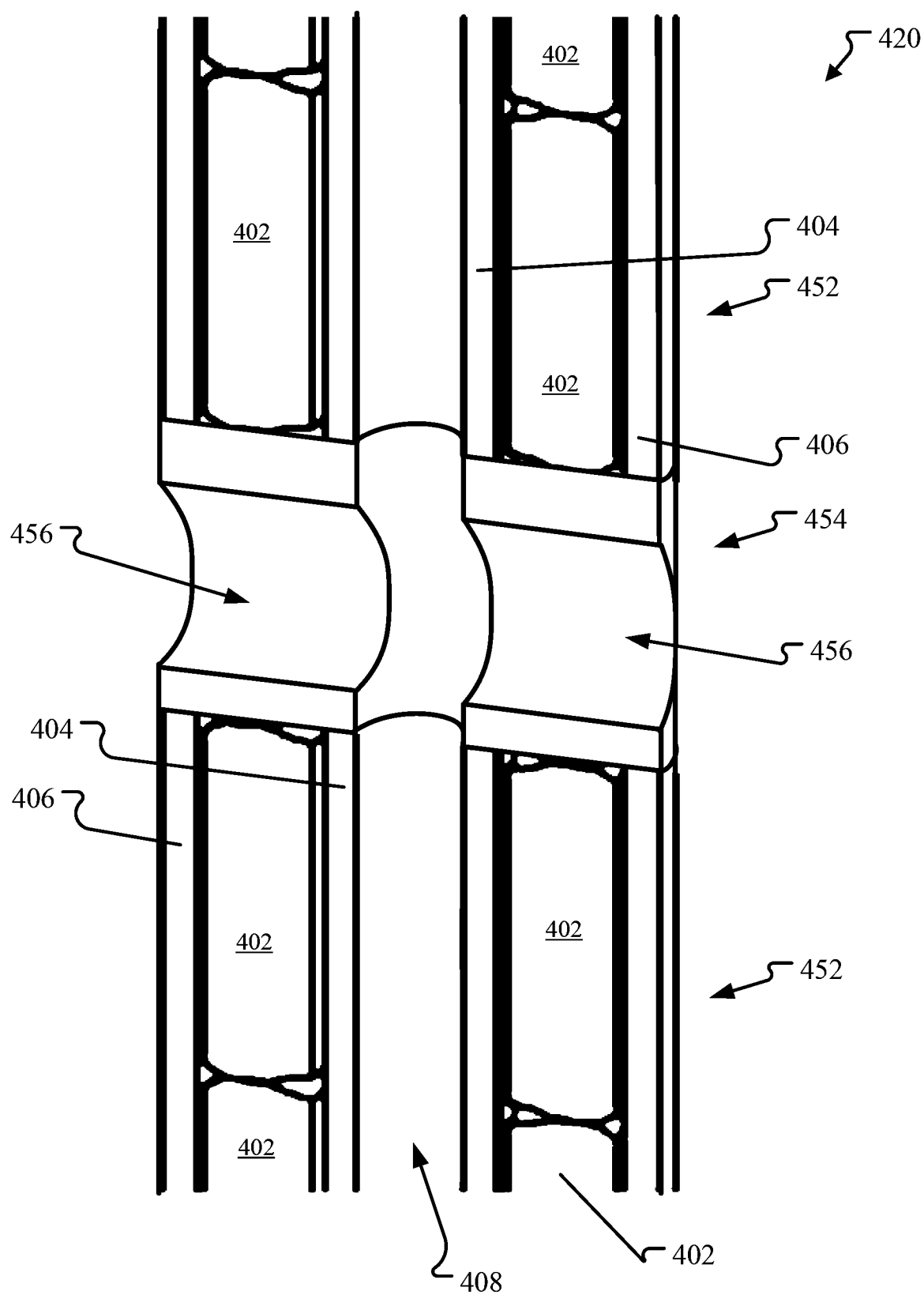
Фиг. 1В



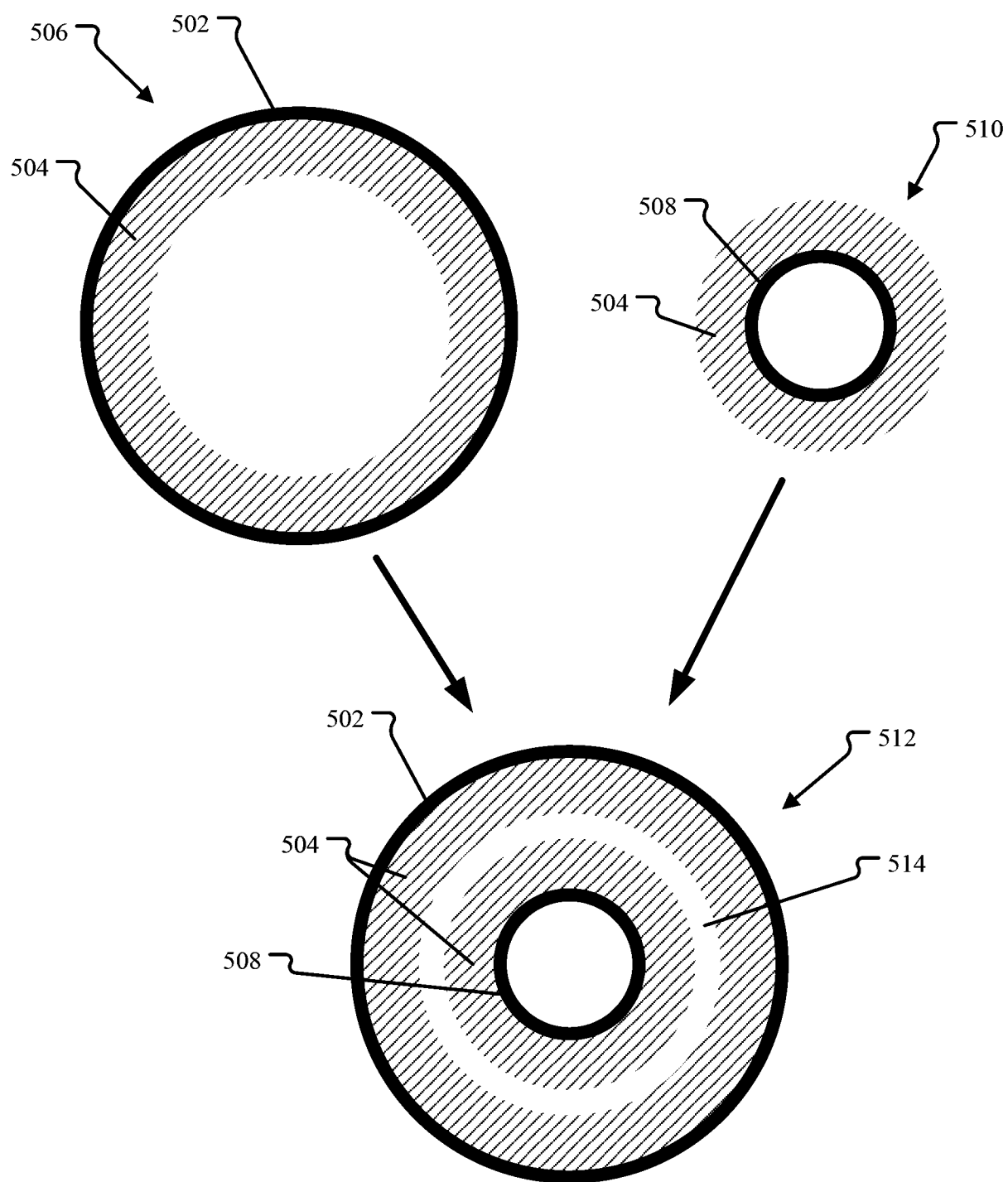
Фиг. 2



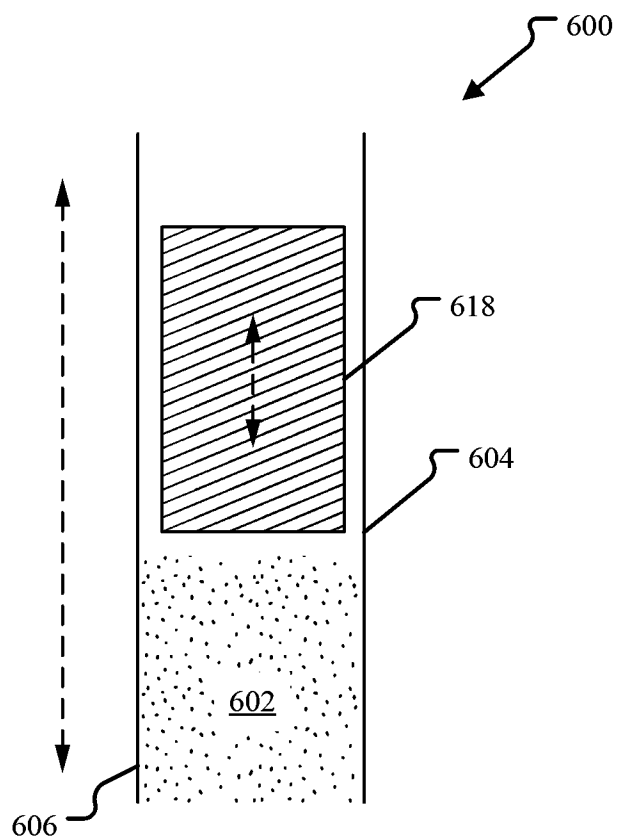
Фиг. 3



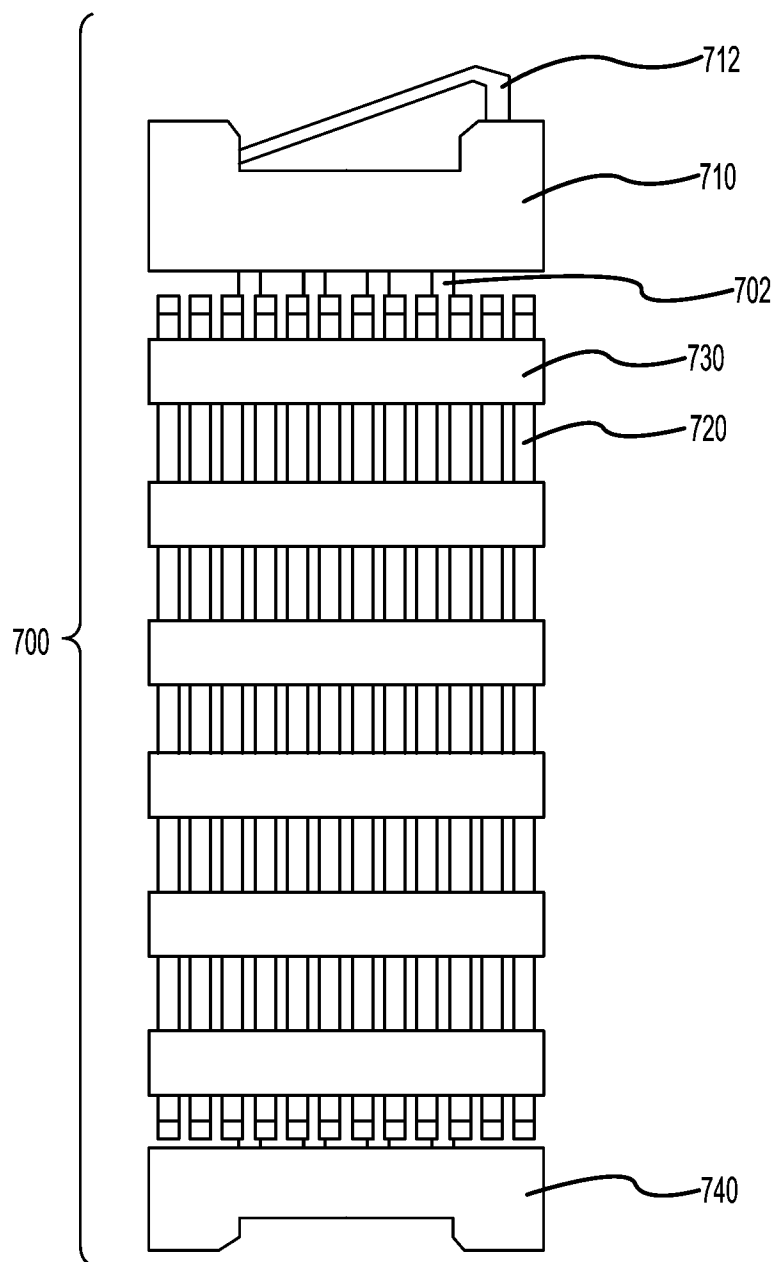
Фиг. 4



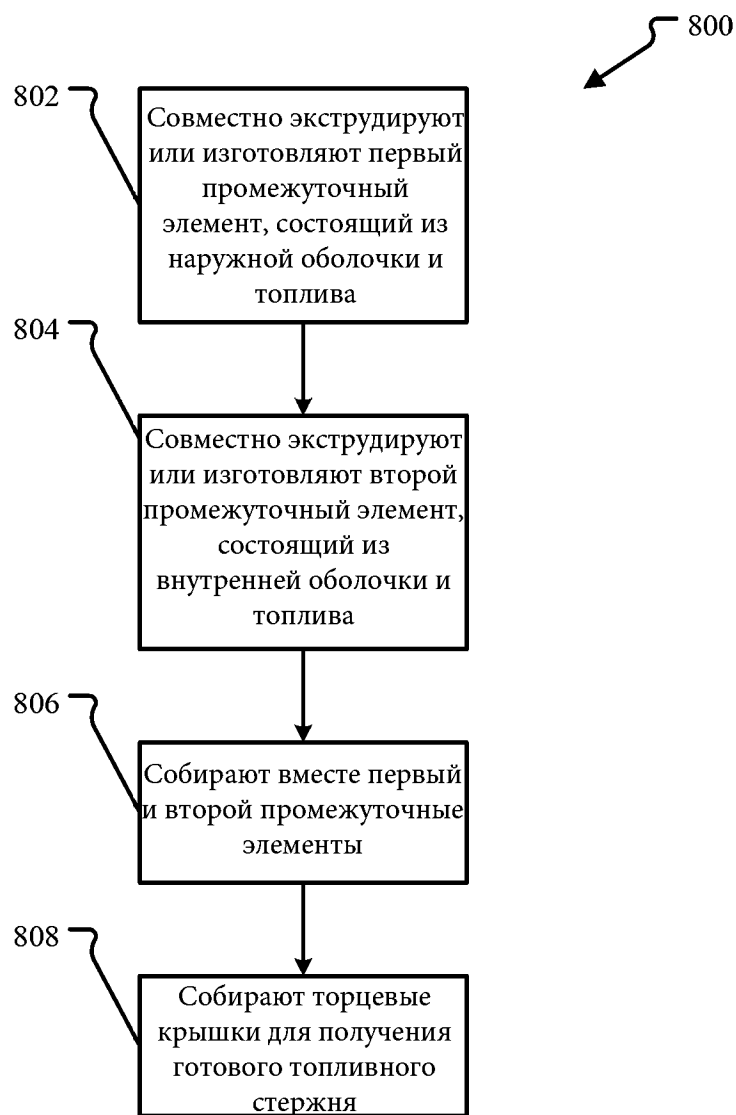
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8