

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **036359**

(13) **B1**

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

- |                                       |               |                             |
|---------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| (45) Дата публикации и выдачи патента | (51) Int. Cl. | <i>G21C 3/08</i> (2006.01)  |
| <b>2020.10.30</b>                     |               | <i>G21C 3/322</i> (2006.01) |
| (21) Номер заявки                     |               | <i>G21C 3/326</i> (2006.01) |
| <b>201990435</b>                      |               | <i>G21C 3/328</i> (2006.01) |
| (22) Дата подачи заявки               |               | <i>G21C 21/10</i> (2006.01) |
| <b>2014.05.01</b>                     |               | <i>G21C 3/28</i> (2006.01)  |
|                                       |               | <i>G21C 3/58</i> (2006.01)  |

---

(54) **ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩАЯ СБОРКА**

---

- |  |                  |
|--|------------------|
| (31) <b>61/821,918; 14/081,056</b>   | (56) GB-A-887713 |
| (32) <b>2013.05.10; 2013.11.15</b>   | US-A-5377246     |
| (33) <b>US</b>   | EP-A1-2372717    |
| (43) <b>2019.07.31</b>   | WO-A1-2011143293 |
| (62) <b>201592147; 2014.05.01</b>  |                  |
| (71)(73) Заявитель и патентовладелец:<br><b>ТОРИУМ ПАУЭР, ИНК. (US)</b>  |                  |
| (72) Изобретатель:<br><b>Башкирцев Сергей Михайлович,<br/>Морозов Алексей Глебович (RU),<br/>Тотмейер Аарон (US)</b> |                  |
| (74) Представитель:<br><b>Фелицына С.Б., Баталин А.В. (RU)</b>   |                  |

- 
- (57) Предложены тепловыделяющие сборки (710), которые включают асимметричные тепловыделяющие элементы (730) с уменьшенными в поперечном направлении размерами их внешних боковых сторон, что способствует соответствию данной тепловыделяющей сборки (710) заранее определенным габаритным размерам, положению направляющих труб и структуре стандартного ядерного реактора. Тепловыделяющие сборки (910) в качестве варианта содержат смешанную сеточную структуру, которая обеспечивает размещение в целом сходных тепловыделяющих элементов (920) в форме компактной расстановки, которая способствует введению сборки (910) в стандартный ядерный реактор.

**B1**

**036359**

**036359**

**B1**

### **Область техники, к которой относится изобретение**

Настоящее изобретение в общем смысле относится к тепловыделяющим сборкам ядерного реактора, используемым в активной зоне ядерного реактора, и более конкретно относится к металлическим тепловыделяющим элементам ядерного реактора.

### **Уровень техники**

Публикация патентной заявки US 2009/0252278 A1, содержание которой во всей его полноте включено здесь посредством ссылки, раскрывает тепловыделяющую сборку, которая включает запальную секцию и секцию сборки зоны воспроизводства ядерного реактора. Секция сборки зоны воспроизводства включает тепловыделяющие элементы на основе тория. Запальная секция сборки включает урановые и/или плутониевые металлические тепловыделяющие элементы, применяемые для высвобождения нейтронов, которые захватываются воспроизводящими ториевыми элементами, создавая, таким образом, расщепляющийся U-233, который выгорает *in situ* (по месту нахождения) и выделяет тепло для ядерной энергетической установки.

Публикация WO 2011/143293 A1, содержание которой во всей его полноте включено здесь посредством ссылки, раскрывает разнообразные тепловыделяющие сборки и тепловыделяющие элементы, в которых используются экструдированные спиральные (то есть спирально закрученные) тепловыделяющие элементы с металлическим или керамическим топливом.

### **Раскрытие изобретения**

Площадь поверхности цилиндрической трубки стандартного стержневого тепловыделяющего элемента ограничивает количество теплоты, которая может быть перенесена от стержня к теплоносителю первого контура. Во избежание перегрева топливных стержней ввиду ограниченной площади поверхности для отвода потоков тепла, количество расщепляющегося материала в этих стержневых ТВЭЛ из оксида урана или стержневых ТВЭЛ со смешанным оксидом (плутоний и оксид урана) обычно существенно ограничивается.

Одно или несколько воплощений настоящего изобретения преодолевают различные недостатки стандартных топливных стержней с оксидом урана путем замены их на полностью металлические, многолепестковые, получаемые способом порошковой металлургии соэкструдированные стержневые ТВЭЛ (теповыделяющие элементы). Металлические тепловыделяющие элементы имеют значительно большую площадь поверхности, чем их аналоги в виде стержней с оксидом урана, и поэтому обеспечивают значительно более высокую теплопередачу от тепловыделяющего элемента к теплоносителю первого контура при более низкой температуре. Спиральные ребра многолепестковых тепловыделяющих элементов обеспечивают тепловыделяющий элемент несущей конструкцией, что может способствовать уменьшению количества или исключению дистанционирующих решеток, которые могли бы потребоваться в ином случае. Уменьшение количества или исключение таких дистанционирующих решеток предпочтительно снижает гидравлическое сопротивление при протекании теплоносителя, что может улучшить теплоотдачу в охлаждающую жидкость. Поскольку металлические тепловыделяющие элементы могут быть относительно более компактными, чем их стандартные аналоги в виде топливных стержней с оксидом урана, то внутри тепловыделяющей сборки обеспечивается больше пространства для теплоносителя, что также уменьшает гидравлическое сопротивление и улучшает теплопередачу в охлаждающую жидкость. Более высокая теплопередача в теплоноситель от металлических топливных стержней означает возможность генерирования большего количества тепла (то есть мощности) с одновременным поддержанием тепловыделяющих элементов при более низкой рабочей температуре благодаря значительно более высокой теплопроводности металлов по сравнению с оксидами. При том, что стандартные топливные стержни с оксидом урана или смешанным оксидным топливом из-за проблем с перегревом в типичном случае ограничены загрузкой расщепляющегося материала в количестве около 4-5%, более высокая способность к теплопередаче металлических тепловыделяющих элементов согласно различным воплощениям настоящего изобретения делает возможным применение значительно более высоких величин загрузки расщепляющегося материала с сохранением при этом безопасных рабочих характеристик топлива. В конечном счете применение металлических тепловыделяющих элементов согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения может обеспечить большую мощность для одной и той же активной зоны реактора, чем возможная в случае стандартных топливных стержней с оксидом урана или смешанным оксидным топливом.

Применение цельнометаллических тепловыделяющих элементов согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения может предпочтительно снизить риск повреждений топливных элементов, поскольку металлические тепловыделяющие элементы уменьшают опасность выброса газообразных продуктов деления к теплоносителю первого контура, что возможно в случае стандартных топливных стержней с оксидом урана или смешанным оксидным топливом.

Применение цельнометаллических тепловыделяющих элементов согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения также может быть более безопасным, чем применение стандартных топливных стержней с оксидом урана, поскольку цельнометаллическое конструктивное решение усиливает перенос тепла внутри тепловыделяющего элемента, уменьшая, таким образом, колебания температуры внутри тепловыделяющего элемента и снижая риск местного перегрева тепловыделяющего

элемента.

Одно или несколько воплощений обеспечивают удлиненный в продольном направлении тепловыделяющий элемент, предназначенный для применения в тепловыделяющей сборке ядерного реактора. Такой тепловыделяющий элемент включает сердечник, включающий расщепляющийся материал, и оболочку, окружающую сердечник. Отношение осевой длины тепловыделяющего элемента к внешнему диаметру тепловыделяющего элемента составляет по меньшей мере 20:1. Центральная осевая линия тепловыделяющего элемента смещена от осевого центра масс тепловыделяющего элемента.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений тепловыделяющий элемент имеет многолепестковый профиль, который образует спиральные ребра, при том, что данные спиральные ребра включают расщепляющийся материал.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений данный многолепестковый профиль включает вогнутые участки между смежными лепестками.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений по меньшей мере одна периферийная сторона оболочки в поперечном направлении уменьшена в размере (например, укорочена) относительно по меньшей мере одной другой периферийной стороны оболочки.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений осевой центр масс сердечника находится на центральной осевой линии, при этом осевой центр масс оболочки смещен относительно центральной осевой линии.

Одно или несколько воплощений обеспечивают тепловыделяющую сборку, предназначенную для применения в активной зоне ядерного энергетического реактора. Сборка включает каркас, включающий нижний патрубок, который так сконструирован и которому придана такая форма, чтобы крепиться к внутренней конструкции активной зоны ядерного реактора; а также множество удлиненных экструдированных тепловыделяющих элементов, поддерживаемых каркасом. Каждый из указанного множества тепловыделяющих элементов включает топливный сердечник, включающий топливный материал, расположенный в матрице из металлического нетопливного материала, при этом данный топливный материал включает расщепляющийся материал и оболочку, окружающую топливный сердечник. Каждый из тепловыделяющих элементов имеет многолепестковый профиль, который образует спиральные ребра. Данное множество тепловыделяющих элементов обеспечивает весь расщепляющийся материал тепловыделяющей сборки. Каждый из множества тепловыделяющих элементов располагается в различных узлах сеточной структуры, ограниченной каркасом так, что подгруппа данного множества тепловыделяющих элементов располагается по внешнему периметру сеточной структуры. По меньшей мере одна внешняя сторона оболочки по меньшей мере на некоторых из тепловыделяющих элементов, расположенных по внешнему периметру сеточной структуры, уменьшена в размере в поперечном направлении.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений каркас включает такой кожух, чтобы все из множества тепловыделяющих элементов располагались внутри этого кожуха, а уменьшенные в размере в поперечном направлении внешние стороны оболочки соприкасались с данным кожухом.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений в поперечном сечении тепловыделяющей сборки, которое является перпендикулярным осевому направлению тепловыделяющих элементов, площадь каждого из топливных сердечников, по меньшей мере, некоторых из тепловыделяющих элементов, расположенных по внешнему периметру сеточной структуры, меньше, чем площадь по меньшей мере одного из топливных сердечников в остальной части множества тепловыделяющих элементов.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений каждый из множества тепловыделяющих элементов отделен от соседних тепловыделяющих элементов общим расстоянием между осевыми линиями, и диаметр окружности, описывающей каждый из данного множества тепловыделяющих элементов, равняется этому расстоянию между осевыми линиями.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений топливный материал включает керамический топливный материал, размещенный в матрице из металлического нетопливного материала.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений толщина оболочки на всем протяжении каждого из множества тепловыделяющих элементов составляет по меньшей мере 0,4 мм.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений, тепловыделяющая сборка термодинамически спроектирована и физически изготовлена для функционирования в стандартном наземном ядерном энергетическом реакторе стандартной атомной электростанции, имеющей реакторный проект, находивший практическое применение до 2013 г. Каркасу придается такая форма и он так сконструирован, чтобы встраиваться в наземный ядерный энергетический реактор вместо стандартной для указанного реактора тепловыделяющей сборки с оксидом урана.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений спиральные ребра соседних из множества тепловыделяющих элементов периодически входят в контакт друг с другом по осевой длине тепловыделяющих элементов, при этом такой контакт помогает поддерживать интервалы в расположении тепловыделяющих элементов относительно друг друга.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений участок тепловыделяющей сборки, который поддерживает подмножество удлиненных тепловыделяющих элементов, неотделим от участка тепловыделяющей сборки, который поддерживает остальную часть множества тепловыделяющих элементов.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений сеточная структура образует структуру из  $17 \times 17$  узлов сетки, а направляющие трубы занимают узлы сетки, имеющие следующие координаты расположения по рядам и колонкам: 3,6; 3,9; 3,12; 4,4; 4; 14; 6,3; 6; 15; 9,3; 9,15; 12,3; 12,15; 14,4; 14,14; 15,6; 15,9 и 15,12.

Одно или несколько воплощений обеспечивают тепловыделяющую сборку, предназначенную для применения в активной зоне ядерного энергетического реактора. Такая сборка включает каркас, включающий нижний патрубок, который так сконструирован и которому придана такая форма, чтобы крепиться к внутренней конструкции активной зоны ядерного реактора; а также множество удлиненных тепловыделяющих элементов, поддерживаемых каркасом, при этом каждый из указанного множества тепловыделяющих элементов включает расщепляющийся материал. Как видно на поперечном сечении, которое является перпендикулярным осевому направлению тепловыделяющей сборки, множество тепловыделяющих элементов упорядочено в виде смешанной сеточной структуры, которая включает первую сеточную структуру и вторую сеточную структуру. Вторая сеточная структура отличается от первой сеточной структуры.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений множество тепловыделяющих элементов включает неперекрывающиеся первую, вторую и третью подгруппы, при этом каждая такая подгруппа включает множество тепловыделяющих элементов. Множество тепловыделяющих элементов первой подгруппы располагается в соответствующих узлах сетки, образованных первой сеточной структурой. Множество тепловыделяющих элементов второй подгруппы располагается в соответствующих узлах сетки, образованных второй сеточной структурой. Множество тепловыделяющих элементов третьей подгруппы располагается в соответствующих перекрывающихся узлах сетки, при этом такие перекрывающиеся узлы сетки попадают и в первую сеточную структуру, и во вторую сеточную структуру.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений каждый из множества тепловыделяющих элементов имеет общий диаметр описанной окружности.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений первая сеточная структура включает квадратную структуру из рядов и колонок. Расстояние между осевыми линиями для рядов и колонок представляет общий диаметр описанной окружности. Вторая сеточная структура включает структуру из равносторонних треугольников. Длина каждой стороны каждого треугольника является общим диаметром описанной окружности.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений тепловыделяющая сборка также включает дополнительные тепловыделяющие элементы, поддерживаемые каркасом. Дополнительные тепловыделяющие элементы не располагаются ни в одном из узлов сетки, образованных первой или второй сеточной структурой.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений каждое множество тепловыделяющих элементов включает топливный сердечник, включающий топливный материал, расположенный в матрице из металлического нетопливного материала, при этом данный топливный материал включает расщепляющийся материал, и оболочку, окружающую топливный сердечник. Каждый из тепловыделяющих элементов имеет многолепестковый профиль, который образует спиральные ребра.

Одно или несколько воплощений настоящего изобретения обеспечивают тепловыделяющую сборку, предназначенную для применения в активной зоне ядерного энергетического реактора (например, наземного или морского ядерного реактора). Сборка включает каркас, включающий нижний патрубок, который так сконструирован и которому придана такая форма, чтобы крепиться к внутренней конструкции активной зоны ядерного реактора; а также множество удлиненных металлических тепловыделяющих элементов, поддерживаемых каркасом. Каждый из множества тепловыделяющих элементов включает металлический топливный сплавной сердечник, включающий металлический топливный материал и металлический нетопливный материал. Топливный материал включает расщепляющийся материал. Каждый тепловыделяющий элемент также включает оболочку, окружающую топливный сердечник. Данное множество удлиненных металлических тепловыделяющих элементов обеспечивает весь расщепляющийся материал тепловыделяющей сборки.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений тепловыделяющая сборка термодинамически спроектирована и физически изготовлена для функционирования в наземном ядерном энергетическом реакторе.

Согласно одному или нескольким воплощениям тепловыделяющая сборка может применяться в комбинации с наземным ядерным энергетическим реактором, при этом данная тепловыделяющая сборка располагается внутри наземного ядерного энергетического реактора.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений в том, что касается множества из данного множества тепловыделяющих элементов, топливный материал топливного сердечника обогащен до 20% или менее ураном-235 и/или ураном-233 и составляет между 20 и 30 об.% топливного сердечника; а нетопливный металл составляет между 70 и 80 об.% топливного сердечника. Что касается множества из данного множества тепловыделяющих элементов, степень обогащения топливного материала может составлять между 15 и 20%. Не являющийся топливом металл топливного сердечника может включать цирконий.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений сердечник включает  $\delta$ -фазу  $UZr_2$ .

Согласно одному или нескольким из этих воплощений в том, что касается множества из данного множества тепловыделяющих элементов, топливный материал топливного сердечника включает плутоний; нетопливный металл топливного сердечника включает цирконий; при этом нетопливный металл топливного сердечника составляет между 70 и 97 об.% топливного сердечника.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений топливный материал включает комбинацию урана и тория; плутония и тория; или урана, плутония и тория.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений оболочка множества из данного множества тепловыделяющих элементов прикреплена к топливному сердечнику металлургическим способом.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений нетопливный металл множества из данного множества тепловыделяющих элементов включает алюминий.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений нетопливный металл множества из данного множества тепловыделяющих элементов включает тугоплавкий металл.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений оболочка множества из данного множества тепловыделяющих элементов включает цирконий.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений множество из данного множества тепловыделяющих элементов изготавливаются совместной экструзией топливного сердечника и оболочки.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений тепловыделяющая сборка, один или несколько ее тепловыделяющих элементов и/или один или несколько их топливных сердечников включают выгорающий поглотитель.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений множество удлиненных металлических тепловыделяющих элементов обеспечивает по меньшей мере 80 об.% всего расщепляющегося материала тепловыделяющей сборки.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений наземный ядерный энергетический реактор представляет собой стандартную атомную электростанцию, имеющую реакторный проект, находивший практическое применение до 2013 г. Каркасу может быть придана такая форма и конфигурация, чтобы встраиваться в наземный ядерный энергетический реактор вместо стандартной для такого реактора тепловыделяющей сборки с оксидом урана.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений сердечник может включать керамический топливный материал вместо металлического топливного материала. В одном или нескольких таких воплощениях топливный материал включает керамический топливный материал, размещенный в матрице из металлического нетопливного материала. С другой стороны, в одном или нескольких воплощениях металлического топлива множество удлиненных, экструдированных тепловыделяющих элементов включает множество удлиненных, экструдированных металлических тепловыделяющих элементов; при этом топливный материал включает металлический топливный материал; и топливный сердечник включает металлический сплавной топливный сердечник, включающий сплав металлического топливного материала и матрицы из металлического нетопливного материала.

Согласно одному или нескольким из этих воплощений каркас содержит кожух так, чтобы все из множества тепловыделяющих элементов располагались внутри этого кожуха, и тепловыделяющая сборка содержит по меньшей мере одну угловую конструкцию, располагающуюся в углу тепловыделяющей сборки и присоединенную к кожуху. Согласно одному или нескольким из этих воплощений по меньшей мере одна угловая конструкция содержит выгорающий поглотитель. Согласно одному или нескольким из этих воплощений по меньшей мере одна угловая конструкция примыкает по меньшей мере к одному из множества удлиненных тепловыделяющих элементов.

Эти и другие объекты различных воплощений настоящего изобретения, а также способы эксплуатации и режимы функционирования соответствующих элементов конструкции, комбинации узлов и экономика производства станут более очевидными после рассмотрения следующего далее описания и прилагаемой формулы изобретения с обращением к сопутствующим чертежам, все из которых являются частью данного описания, при этом на различных фигурах подобные номера ссылочных позиций определяют подобные детали. В одном воплощении изобретения иллюстрируемые здесь структурные компоненты представлены в масштабе. При этом следует четко понимать, что данные чертежи представлены исключительно в иллюстративных и описательных целях и не предназначены для рассмотрения в качестве ограничивающих объем изобретения. Кроме того, следует учитывать, что структурные признаки, показанные или описанные здесь в любом из воплощений, могут также применяться и в других воплощениях. Для целей настоящего описания и в формуле изобретения артикли форм единственного числа "a", "an" и "the" включают также и указания на множественное число, если контекстом явным образом не обуславливает иного.

#### **Краткое описание чертежей**

Для лучшего понимания воплощений настоящего изобретения, а также других целей и дальнейших его признаков делается обращение к следующему описанию, которое должно применяться совместно с сопутствующими чертежами.

На фиг. 1 показано поперечное сечение тепловыделяющей сборки, выполненное в плоскости само-

расстановки.

На фиг. 2 - поперечное сечение тепловыделяющей сборки по фиг. 1, при этом данное поперечное сечение выполнено в плоскости, которая сдвинута на 1/8 оборота тепловыделяющих элементов относительно вида на фиг. 1.

На фиг. 3 - поперечное сечение тепловыделяющей сборки по фиг. 1, выполненное в плоскости, которая является параллельной осевому направлению тепловыделяющей сборки.

На фиг. 4 - вид в перспективе тепловыделяющего элемента тепловыделяющей сборки по фиг. 1.

На фиг. 5 - поперечное сечение тепловыделяющего элемента, представленного на фиг. 3.

На фиг. 6 - поперечное сечение представленного на фиг. 3 тепловыделяющего элемента, вписанного в правильный многоугольник.

На фиг. 7А - вид с торца другой тепловыделяющей сборки, предназначенной для применения в реакторе с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем под давлением.

На фиг. 7В - частичный вид сбоку тепловыделяющей сборки, представленной на фиг. 7А.

На фиг. 8 - изображение реактора с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем под давлением, в котором применяется тепловыделяющая сборка, представленная на фиг. 7 А и В.

На фиг. 9 - поперечное сечение тепловыделяющего элемента, представленного на фиг. 3.

На фиг. 10 - поперечное сечение другой тепловыделяющей сборки.

На фиг. 11 и 12 - частичное поперечное сечение тепловыделяющей сборки согласно одному воплощению настоящего изобретения.

На фиг. 13А и В - поперечные сечения двух тепловыделяющих элементов тепловыделяющей сборки, представленной на фиг. 11 и 12.

На фиг. 14 - поперечное сечение тепловыделяющей сборки согласно одному альтернативному варианту воплощения.

На фиг. 15-20 - частичные поперечные сечения тепловыделяющей сборки по фиг. 14.

На фиг. 21 - поперечное сечение тепловыделяющей сборки согласно одному альтернативному варианту воплощения.

На фиг. 22 - поперечное сечение тепловыделяющей сборки согласно одному альтернативному варианту воплощения.

На фиг. 23-25 - частичные поперечные сечения тепловыделяющей сборки по фиг. 22.

На фиг. 26 - поперечное сечение тепловыделяющей сборки согласно одному альтернативному варианту воплощения.

На фиг. 27-30 - частичные поперечные сечения тепловыделяющей сборки по фиг. 26.

На фиг. 31-36 - частичные поперечные сечения тепловыделяющих сборок согласно альтернативным вариантам воплощений.

На фиг. 37 - поперечное сечение тепловыделяющей сборки согласно одному альтернативному варианту воплощения.

На фиг. 38 - поперечное сечение тепловыделяющей сборки согласно одному альтернативному варианту воплощения.

На фиг. 39-44 - стандартные описания для тепловыделяющей сборки 16×16.

#### **Осуществление изобретения**

На фиг. 1-3 показана тепловыделяющая сборка 10 согласно одному воплощению настоящего изобретения. Как показано на фиг. 3, тепловыделяющая сборка 10 содержит множество тепловыделяющих элементов 20, поддерживаемых каркасом 25.

Как показано на фиг. 3, каркас 25 содержит кожух 30, направляющие трубы 40, верхний патрубок 50, нижний патрубок 60, нижнюю упорную пластину 70, верхнюю упорную пластину 80 и/или другие структуры, которые позволяют узлу 10 функционировать в качестве тепловыделяющей сборки в ядерном реакторе. Один или несколько этих компонентов каркаса 25 могут быть согласно различным воплощениям исключены без отклонения от объема настоящего изобретения.

Как показано на фиг. 3, кожух 25 прикреплен к верхнему патрубку 50 и нижнему патрубку 60. Нижний патрубок 60 (или другая подходящая структура сборки 10) сконструирован и ему придана такая форма, чтобы обеспечивать средство гидравлического сообщения между сборкой 10 и реактором 90, в который помещается сборка 10, с тем, чтобы способствовать прохождению потока теплоносителя в активную зону реактора по сборке 10 через нижний патрубок 60. Верхний патрубок 50 способствует направлению нагретого теплоносителя от сборки 10 к парогенераторам электростанции (для реактора, охлаждаемого водой под давлением (PWR)), турбинам (для кипящего ядерного реактора (BWR)) и т.д. Патрубки 50, 60 имеют форму, специально разработанную для того, чтобы должным образом стыковаться с внутренней конструкцией активной зоны реактора.

Как показано на фиг. 3, нижняя упорная пластина 70 и верхняя упорная пластина 80 предпочтительно жестко прикреплены (например, сваркой, подходящими крепежными деталями, например, болтами, винтами и т.д.) к кожуху 30 или нижнему патрубку 60 (и/или другим подходящим структурным компонентам сборки 10).

Нижние осевые концы элементов 20 образуют штифты 20а, которые вставляются в отверстия 70а в

нижней упорной пластине 70 для поддержания элементов 20 и помогают поддерживать надлежащие интервалы расположения элементов 20. Штифты 20а устанавливаются в отверстиях 70а таким образом, чтобы предотвращалось вращение элементов 20 вокруг их осей или перемещение в продольном направлении к нижней упорной пластине 70. Это препятствование вращению помогает обеспечению того, чтобы все точки контакта между соседними элементами 20 имели место в одних и тех же осевых положениях вдоль элементов 20 (например, на обсуждаемой ниже плоскости саморасстановки). Соединение между штифтами 20а и отверстиями 70а может быть обеспечено сваркой, посадкой с натягом, соединением нецилиндрических форм, которые препятствуют вращению (например, замкового паза и шлица), и/или любым другим подходящим механизмом для ограничения продольного и/или вращательного движения элементов 20 относительно нижней упорной пластины 70. Нижняя упорная пластина 70 включает продолжающиеся в осевом направлении протоки (например, решетку из отверстий), через которые теплоноситель проходит к элементам 20.

Верхние осевые концы элементов 20 образуют штифты 20а, которые свободно вставляются в отверстия 80а в верхней упорной пластине 80, чтобы обеспечить возможность свободного продольного движения верхних штифтов 20а вверх вплоть до верхней упорной пластины 80, помогая поддерживать расстояние между элементами 20. В результате, когда элементы 20 в процессе расщепления увеличиваются в осевом направлении, эти удлиняющиеся элементы 20 могут далее свободно продолжаться в верхнюю упорную пластину 80.

Как показано на фиг. 4, штифты 20а переходят в центральный участок элемента 20.

На фиг. 4 и 5 показан индивидуальный тепловыделяющий элемент/стержень 20 из сборки 10. Как показано на фиг. 5, удлиненный центральный участок тепловыделяющего элемента 20 имеет четырехлепестковое поперечное сечение. Поперечное сечение элемента 20 остается, по существу, однородным по длине центрального участка элемента 20. Каждый тепловыделяющий элемент 20 имеет топливный сердечник 100, который включает тугоплавкий металл и топливный материал, который включает расщепляющийся материал.

В центре топливного сердечника 100 вдоль продольной оси помещается вытеснитель 110, который содержит тугоплавкий металл. Вытеснитель 110 помогает ограничивать температуру в центре самой толстой части тепловыделяющего элемента 20, вытесняя расщепляющийся материал, который в ином случае занял бы это пространство, и минимизирует изменения в тепловом потоке вдоль поверхности тепловыделяющего элемента. Согласно различным воплощениям вытеснитель 110 может быть полностью исключен.

Как показано на фиг. 5, топливный сердечник 100 заключен в оболочку 120 из тугоплавкого металла. Оболочка 120 предпочтительно является достаточно толстой, достаточно прочной и достаточно гибкой для того, чтобы выдерживать вызываемое облучением распухание сердечника 100 без повреждений (например, без подвергания сердечника 100 воздействию окружающей среды снаружи оболочки 120). Согласно одному или нескольким воплощениям толщина всей оболочки 120 составляет по меньшей мере 0,3, 0,4, 0,5 и/или 0,7 мм. Согласно одному или нескольким воплощениям толщина оболочки 120 составляет по меньшей мере 0,4 мм для того, чтобы снизить возможность повреждений вследствие распухания, повреждений вследствие окисления и/или повреждений оболочки 120 вследствие любого другого механизма.

Оболочка 120 может иметь, по существу, постоянную толщину в кольцевом направлении (то есть вокруг периметра оболочки 120, как показано в поперечном сечении на фиг. 5) и по осевой/продольной длине сердечника 100 (как показано на фиг. 4).

В качестве варианта согласно одному или нескольким воплощениям, как показано на фиг. 5, оболочка 120 имеет большую толщину на вершине лепестков 20b, чем в вогнутых участках сопряжения/областях 20с между лепестками 20b. Например, согласно одному или нескольким воплощениям оболочка 120 на вершинах лепестков 20b имеет толщину, по меньшей мере на 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125 и/или 150% большую, чем оболочка 120 в вогнутых участках сопряжения/областях 20с. Более толстая оболочка 120 на вершинах лепестков 20b обеспечивает улучшенную стойкость к истиранию на вершинах лепестков 20b, где соседние тепловыделяющие элементы 20 контактируют друг с другом в плоскости саморасстановки (обсуждается ниже).

Согласно одному или нескольким воплощениям изобретения тугоплавкий металл, используемый в вытеснителе 110, топливном сердечнике 100 и оболочке 120, содержит цирконий. В данном контексте термин "цирконий" обозначает чистый цирконий или цирконий в комбинации с другим представляющим сплав материалом(и). Однако, без отклонения от объема настоящего изобретения, вместо циркония могут применяться и другие тугоплавкие металлы (например, ниобий, молибден, тантал, вольфрам, рений, титан, ванадий, хром, цирконий, гафний, рутений, осмий, иридий и/или другие металлы). В данном контексте термин "тугоплавкий металл" обозначает любой металл/сплав, который имеет температуру плавления выше 1800°C (2073 К).

Кроме того, в некоторых воплощениях тугоплавкий металл может быть заменен другим нетопливным металлом, например алюминием. Однако применение не являющегося тугоплавким нетопливного металла лучше всего подходит для активных зон реактора, которые функционируют при более низких

температурах (например, в малых активных зонах, которые имеют высоту около 1 м и электрическую мощность в 100 МВт электрической энергии или менее). Тугоплавкие металлы предпочтительны для применения в активных зонах с более высокими рабочими температурами.

Как показано на фиг. 5, центральный участок топливного сердечника 100 и оболочка 120 имеют четырехлепестковый профиль, образующий спиральные дистанционирующие ребра 130. Вытеснителю 110 также может быть придана такая форма, чтобы выступать наружу на ребрах 130 (например, углы квадратного вытеснителя 110 соответствуют ребрам 130). Согласно альтернативным воплощениям настоящего изобретения тепловыделяющие элементы 20 без отклонения от объема настоящего изобретения могут иметь большее или меньшее количество ребер 130. Например, как в целом иллюстрируется фиг. 5 из публикации патентной заявки US 2009/0252278 A1, тепловыделяющий элемент может иметь три ребра/лепестка, которые предпочтительно размещаются по окружности через равные интервалы друг от друга. Число лепестков/ребер 130 может зависеть, по меньшей мере частично, от формы тепловыделяющей сборки 10. Например, четырехлепестковый элемент 20 может хорошо работать с квадратной в поперечном сечении тепловыделяющей сборкой 10 (например, применяемой в AP-1000). В отличие от него, трехлепестковый тепловыделяющий элемент может хорошо работать с гексагональной тепловыделяющей сборкой (например, применяемой в WER).

На фиг. 9 показаны различные размеры тепловыделяющего элемента 20 согласно одному или нескольким воплощениям. Согласно одному или нескольким воплощениям любой из этих габаритов, параметров и/или диапазонов, указываемых в нижеследующей таблице, может быть без отклонения от объема настоящего изобретения увеличен или уменьшен на величины вплоть до 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50% или более.

Параметр тепловыделяющего элемента 20	Символ	Примерные величины	Единицы измерения
Диаметр описанной окружности	D	9-14 (например, 12,3, 12,4, 12,5, 12,6)	Мм
Толщина лепестка	$\Delta$	2,5-3,8 (например, 2,5,2,6, 2,7, 2,8, 2,9, 3,0, 3,1, 3,2, 3,3, 3,4, 3,5, 3,6, 3,7, 3,8), переменная	Мм
Минимальная толщина оболочки	$\delta$	0,4-1,2 (например, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8)	Мм
Толщина оболочки на лепестке	$\delta^{\max}$	0,4-2,2 (например, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2, 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0, 2,1, 2,2), 1,5 $\delta$ , 2 $\delta$ , 2,5 $\delta$	Мм
Средняя толщина оболочки		0,4 - 1,8 (например, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2, 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8), по меньшей мере 0,4, 0,5 или 0,6	Мм
Радиус закругления оболочки на периферии лепестка	R	$\Delta/2$ , $\Delta/1,9$ , переменный	мм
Радиус закругления топливного сердечника на периферии лепестка	$r_f$	0,5-2,0 (например, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2, 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0), $(\Delta - 2\delta)/2$ , переменный	мм
Радиус закругления между смежными лепестками	R	2-5 (например, 2, 3, 4, 5), переменный	мм
Длина стороны центрального вытеснителя	a	1,5-3,5 (например, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0, 2,1, 2,2, 2,3, 2,4, 2,5, 2,6, 2,7, 2,8, 2,9, 3,0, 3,1, 3,2, 3,3, 3,4, 3,5)	мм
Периметр топливного элемента		25-60 (например, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60)	мм
Площадь топливного элемента		50-100 (например, 50, 60, 70, 80, 90, 100)	мм <sup>2</sup>
Площадь топливного сердечника		30-70 (например, 30, 40, 50, 60, 70)	мм <sup>2</sup>
Обогащение		<19,7	масс. доля
Фракция U		<25	об. доля

Как показано на фиг. 5, вытеснитель 110 имеет в поперечном сечении форму правильного квадрат-

ного четырехугольника с углами правильного квадратного четырехугольника, лежащими на одной прямой с ребрами 130. Вытеснитель 110 образует спираль, которая следует за спиралью ребер 130 так, чтобы углы вытеснителя 110 оставались соответствующими ребрам 130 по осевой длине топливного сердечника 100. В альтернативных воплощениях с большим или меньшим количеством ребер 130 вытеснитель 110 в поперечном сечении предпочтительно имеет форму правильного многоугольника, имеющего столько же сторон, сколько ребер имеет элемент 20.

Как показано на фиг. 6, площадь поперечного сечения центрального участка элемента 20 предпочтительно существенно меньше площади квадрата 200, при этом конец каждого из ребер 130 касается одной стороны квадрата 200. В более общем представлении площадь поперечного сечения элемента 20, имеющего  $n$  ребер, предпочтительно меньше площади правильного многоугольника, имеющего  $n$  сторон, при том, что конец каждого из ребер 130 касается одной стороны многоугольника. Согласно различным воплощениям отношение площади элемента 20 к площади квадрата (или соответствующего правильного многоугольника для элементов 20, имеющих больше или меньше четырех ребер 130) составляет менее 0,7, 0,6, 0,5, 0,4, 0,35, 0,3. Как показано на фиг. 1, это соотношение площадей приблизительно показывает, сколько доступного пространства внутри кожуха 30 занято тепловыделяющими элементами 20, таким образом, что более низкое отношение означает, что больше пространства оказывается предпочтительно доступным для теплоносителя, который также действует в качестве замедлителя нейтронов, и это увеличивает соотношение замедлителя и топлива (важное для нейтроники), уменьшает гидравлическое сопротивление и увеличивает теплопередачу от элементов 20 к теплоносителю. Согласно различным воплощениям получаемое отношение замедлителя к топливу составляет по меньшей мере 2,0, 2,25, 2,5, 2,75 и/или 3,0 (в отличие от 1,96 в случае применения стандартных цилиндрических стержней из оксида урана). Аналогичным образом согласно различным воплощениям площадь сечения потока для тепловыделяющей сборки 10 увеличивается более чем на 16% по сравнению с применением одной или нескольких стандартных тепловыделяющихборок, использующих цилиндрические стержни из оксида урана. Увеличенная площадь сечения потока может уменьшить перепад давления теплоносителя при прохождении через сборку 10 (по сравнению со стандартными сборками с оксидом урана), что может являться преимуществом с точки зрения прокачивания теплоносителя через сборку 10.

Как показано на фиг. 4, элемент 20 удлинен в продольном направлении. В иллюстрируемом воплощении каждый элемент 20 является полноразмерным элементом и продолжается по всему промежутку от нижней упорной пластины 70 в основании сборки 10 или вблизи него до верхней упорной пластины 80 в верхней части сборки 10 или вблизи нее. Согласно различным воплощениям и реакторным проектам это может привести к элементам 20, длина которых составляет приблизительно от 1 (для компактных реакторов) до 4 м. Таким образом, для типичных реакторов длина элементов 20 может находиться между 1 и 5 м. Однако, без отклонения от объема настоящего изобретения, элементы 20 могут быть удлинены или укорочены для приспособления к реактору с любыми другими размерами.

При том, что иллюстрируемые элементы 20 сами по себе являются полноразмерными, в качестве варианта элементы 20 могут быть сегментированными таким образом, что полноразмерный элемент создается множеством взятых вместе сегментов. Например, для эффективного создания полноразмерного элемента могут быть состыкованы друг за другом 4 отдельных однометровых сегмента элемента 20. В участках сопряжения между сегментами могут быть обеспечены дополнительные упорные пластины 70, 80 для поддержания осевого расстояния и расположения сегментов.

Согласно одному или нескольким воплощениям топливный сердечник 100 содержит комбинацию тугоплавкого металла/сплава и топливного материала. Тугоплавкий металл/сплав может содержать сплав циркония. Топливный материал может содержать низкообогащенный уран (например, U-235, U-233), плутоний или торий, объединенный с низкообогащенным ураном, как определено ниже, и/или плутонием. В данном контексте "низкообогащенный уран" означает, что весь топливный материал содержит менее 20 мас.% расщепляющихся материалов (например, урана-235 или урана-233). Согласно различным воплощениям, степень обогащения уранового топливного материала составляет между 1 и 20 мас.%, 5 и 20 мас.%, 10 и 20 мас.% и/или 15 и 20 мас.% урана-235. Согласно одному или нескольким воплощениям топливный материал содержит 19,7% обогащенного урана-235.

Согласно различным воплощениям топливный материал может составлять 3-10, 10-40, 15-35 и/или 20-30 об.% от объема топливного сердечника 100. Согласно различным воплощениям тугоплавкий металл может составлять 60-99, 60-97, 70-97, 60-90, 65-85 и/или 70-80 об.% от объема топливного сердечника 100. Согласно одному или нескольким воплощениям объемные доли в пределах одного или нескольких из этих диапазонов обеспечивают сплав полезными свойствами, отвечающими диаграмме состояния для указанной композиции сплава. Топливный сердечник 100 может содержать Zr-U сплав, который является высоколегированным топливом (то есть с относительно высокой концентрацией компонента сплава по сравнению с урановым компонентом), состоящим либо из  $\delta$ -фазы  $UZr_2$ , либо из комбинации  $\delta$ -фазы  $UZr_2$  и  $\alpha$ -фазы Zr. Согласно одному или нескольким воплощениям,  $\delta$ -фаза системы бинарного сплава U-Zr из циркониевой композиции может составлять приблизительно 65-81 объемный процент (приблизительно от 63 до 80 атомных процентов) от объема топливного сердечника 100. Было най-

дено, что одно или несколько этих воплощений ведут к низкообъемному радиационному набуханию тепловыделяющего элемента 20. Согласно одному или нескольким таким воплощениям газообразные продукты деления захватываются внутри самого металлического сердечника 100, вследствие чего в одном или нескольких воплощениях тепловыделяющего элемента 20 возможно исключение применения в тепловыделяющем элементе 20 обычного газового промежутка. Согласно одному или нескольким воплощениям такое набухание может быть значительно меньшим, чем происходило бы в случае применения композиций бедного сплава (только с  $\alpha$ -фазой), например снижение набухания по меньшей мере в 10, 20, 30, 50, 75, 100, 200, 300, 500, 1000, 1200, 1500 об.% или большее в расчете на один атомный процент выгорания по сравнению с применением топлива U-10Zr, включающего бедный сплав с  $\alpha$ -фазой. Согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения индуцированное облучением набухание тепловыделяющего элемента 20 или его сердечника 100 может быть менее 20, 15, 10, 5, 4, 3 и/или 2 об.% на один атомный процент выгорания. Согласно одному или нескольким воплощениям ожидаемое набухание будет составлять около 1 об.% на атомный процент выгорания.

Согласно одному или нескольким альтернативным воплощениям настоящего изобретения топливный сердечник заменяется плутониево-циркониевым бинарным сплавом с такими же или подобными объемными процентными долями содержания компонентов, как в обсуждавшихся выше U-Zr топливных сердечниках 100, или же с иными объемными процентными долями содержания компонентов, нежели в обсуждавшихся выше U-Zr топливных сердечниках 100. Например, доля плутония в сердечнике 100 может быть существенно ниже соответствующей доли урана в соответствующем сердечнике 100 на урановой основе, поскольку плутоний в типичном случае имеет массовую долю содержания расщепляющихся изотопов около 60-70 мас.%, в то время как LEU (низкообогащенный) уран содержит 20 мас.% или менее расщепляющихся изотопов U-235. Согласно различным воплощениям объемная доля плутония в сердечнике 100 может быть менее 15 об.%, менее 10 об.% и/или менее 5 об.%, с объемной долей тугоплавкого металла, отрегулированной соответственно.

Применение высоколегированного сердечника 100 согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения может также привести к предпочтительному удержанию газообразных продуктов деления при облучении. Оксидные топлива и низколегированные металлические топлива в типичном случае демонстрируют значительный выход газообразных продуктов деления, который обычно компенсируется в соответствии с топливным проектом, обычно с помощью полости внутри топливного стержня, предназначенной для вмещения высвобождающихся газообразных продуктов деления. Напротив, топливный сердечник 100 согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения не выделяет газообразных продуктов деления. Частично это происходит из-за низкой рабочей температуры топливного сердечника 100 и того факта, что атомы газообразных продуктов деления (более конкретно Xe и Kr) ведут себя как твердые продукты деления. Согласно одному или нескольким воплощениям не происходит образования пузырьков газообразных продуктов деления и их миграции по границам зерна к внешней части топливного сердечника 100. Согласно одному или нескольким воплощениям при достаточно высоких температурах могут образовываться мелкие (диаметром в несколько микрон) пузырьки газообразных продуктов деления. Однако согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения эти пузырьки остаются изолированными внутри топливного сердечника 100 и не образуют объединенную сеть, которая способствовала бы выходу газообразных продуктов деления. Металлическое соединение между топливным сердечником 100 и оболочкой 120 может обеспечить дополнительный барьер для выхода газообразных продуктов деления.

Согласно различным воплощениям топливный сердечник 100 (или оболочка 120, или другая подходящая часть тепловыделяющего элемента 20) одного или нескольких тепловыделяющих элементов 20 может быть сплавлен с выгорающим поглотителем, таким как гадолиний, бор, эрбий или другой подходящий нейтронный поглотитель, для образования интегрированного с выгорающим поглотителем тепловыделяющего элемента. Различные тепловыделяющие элементы 20 внутри тепловыделяющей сборки 10 могут использовать различные выгорающие поглотители и/или различные количества выгорающего поглотителя. Например, некоторые из тепловыделяющих элементов 20 тепловыделяющей сборки 10 (например, менее 75%, менее 50%, менее 20%, 1-15%, 1-12%, 2-12% и т.д.) могут включать сердечники 100 с 25, 20 и/или 15 мас.% или менее Gd (например, 1-25 мас.%, 1-15 мас.%, 5-15 мас.% и т.д.). Другие тепловыделяющие элементы 20 тепловыделяющей сборки 10 (например, 10-95%, 10-50%, 20-50%, большее количество тепловыделяющих элементов 20, чем тепловыделяющие элементы 20, в которых применяется Gd) могут включать сердечники 100 с 10 мас.%, или 5 мас.%, или менее Er (например, 0,1-10,0 мас.%, от 0,1 до 5,0 мас.% и т.д.).

Согласно различным воплощениям выгорающий поглотитель замещает топливный материал (а не тугоплавкий металл) по сравнению с тепловыделяющими элементами 20, которые не содержат в их сердечниках 100 выгорающего поглотителя. Например, согласно одному воплощению тепловыделяющего элемента 20 сердечник 100 которого в ином случае при отсутствии поглотителя включал бы 65 об.% циркония и 35 об.% урана, данный тепловыделяющий элемент 20 включает сердечник 100, который состоит из 16,5 об.% Gd, 65 об.% циркония и 18,5 об.% урана. Согласно одному или нескольким другим

воплощениям выгорающий поглотитель вместо этого замещает тугоплавкий металл, а не топливный материал. Согласно одному или нескольким другим воплощениям выгорающий поглотитель в топливном сердечнике 100 замещает тугоплавкий металл и топливный материал пропорционально. Соответственно согласно различным таким воплощениям, выгорающий поглотитель внутри топливного сердечника 100 может располагаться в  $\delta$ -фазе  $UZr_2$  или  $\alpha$ -фазе  $Zr$  таким образом, что присутствие выгорающего поглотителя не изменяет фазовый состав сплава  $UZr_2$  или сплава  $Zr$ , в которых данный выгорающий поглотитель размещается.

Тепловыделяющие элементы 20 с сердечником 100, содержащим выгорающий поглотитель, могут составить долю (например, 0-100%, 1-99%, 1-50% и т.д.) тепловыделяющих элементов 20 одной или нескольких тепловыделяющих сборок 10, применяемых в активной зоне реактора. Например, тепловыделяющие элементы 20 с выгорающим поглотителем могут быть размещены в стратегически важных точках пространственной решетки тепловыделяющей сборки 10, которая также включает тепловыделяющие элементы 20 без выгорающего поглотителя, для обеспечения управления распределением энергии и снижения концентраций растворимого бора в начале рабочего цикла. Аналогичным образом может быть выбрано размещение тепловыделяющих сборок 10, которые включают тепловыделяющие элементы 20 с выгорающим поглотителем, в стратегически важных позициях внутри активной зоны реактора относительно сборок 10, которые не включают тепловыделяющих элементов 20 с выгорающим поглотителем, для обеспечения управления распределением энергии и снижения концентраций растворимого бора в начале рабочего цикла. Применение таких интегрированных выгорающих поглотителей может способствовать разработке расширенных рабочих циклов.

В качестве варианта и/или в дополнение отдельные нетопливные стержни с выгорающим поглотителем нейтронов могут быть включены в тепловыделяющую сборку 10 (например, рядом с тепловыделяющими элементами 20 вместо одного или нескольких тепловыделяющих элементов 20, вставленных в направляющие трубы в тепловыделяющих сборках 10, в которые не вводятся стержни регулирования мощности, и т.д.). В одном или нескольких воплощениях такие нетопливные стержни с выгорающим поглотителем нейтронов могут быть разработаны в виде крестовины, подобной тем, которые применяются в реакторах разработки Babcock-Wilcox или Westinghouse (называемые стержневыми сборками с выгорающим поглотителем (BPRA)). Далее они могут быть вставлены в направляющие трубы для стержней регулирования мощности и зафиксированы в выбранных тепловыделяющих сборках 10, в которых нет никаких сборок регулирующих стержней для регулирования реактивности на начальных этапах рабочего цикла. В случае применения кластера из выгорающего поглотителя он может быть извлечен, когда тепловыделяющая сборка перемещается для следующего топливного цикла. Согласно одному альтернативному воплощению, в котором отдельные нетопливные стержни с выгорающим поглотителем нейтронов размещаются вместо одного или нескольких тепловыделяющих элементов 20, нетопливные стержни с выгорающим поглотителем нейтронов остаются в тепловыделяющей сборке 10 и выгружаются вместе с другими тепловыделяющими элементами 20, когда тепловыделяющая сборка 10 достигает конца своего срока службы.

Тепловыделяющие элементы 20 производятся с помощью порошковой металлургии совместной экструзией. Как правило, для топливного сердечника 100 смешиваются порошкообразный тугоплавкий металл и порошкообразный металлический топливный материал (а также порошкообразный выгорающий поглотитель в случае его включения в сердечник 100), внутри порошковой смеси помещается заготовка для вытеснителя 110 и далее комбинация порошка и вытеснителя 110 прессуется и спекается в шихту/заготовку для топливного ядра (например, в литейной форме, которая нагревается в различной степени на протяжении различных интервалов времени для спекания смеси). Заготовка для вытеснителя 110 может иметь такую же или подобную форму поперечного сечения, как и образующаяся в итоге при получении вытеснителя 110.

В качестве варианта заготовка вытеснителя 110 может иметь форму, которая предназначается для деформирования в желаемую форму профиля вытеснителя 110 при экструзии. Шихта топливного ядра для тепловыделяющего элемента (включающая вытеснитель 110 и спеченный материал топливного сердечника 100) вносится в полую трубу оболочки 120, которая имеет закупоренное основание трубы и отверстие на другом конце. Затем отверстие на противоположном конце закупоривается торцевой заглушкой, изготовленной из того же материала, что и оболочка, для образования заготовки. Заготовке может быть придана цилиндрическая форма или же она может иметь форму, в большей степени сходную с окончательной формой профиля элемента 20, например, как показано на фиг. 5 и 9. Затем заготовка подвергается совместной экструзии под воздействием температуры и давления через блок формующей головки для создания элемента 20, в итоге включающего отформованный сердечник 100, оболочку 110 и вытеснитель 120. Согласно различным воплощениям, в которых применяется нецилиндрический вытеснитель 110, заготовка может быть должным образом сориентирована относительно головки экструдера так, чтобы углы вытеснителя 110 совпадали с лепестками 20b тепловыделяющего элемента 20. Процесс экструзии может реализовываться либо прямой экструзией (то есть продвижением заготовки через неподвижную формующую головку), либо обратной экструзией (то есть перемещением формующей головки к неподвижной заготовке). Данный процесс приводит к оболочке 120, металлургически присоединен-

ной к топливному сердечнику 100, что уменьшает риск отслаивания оболочки 120 от топливного сердечника 100. Труба и торцовая заглушка оболочки 120 металлургически присоединены друг к другу для герметизации топливного сердечника 100 внутри оболочки 120. Высокие температуры плавления тугоплавких металлов, применяемых в тепловыделяющих элементах 10, способствуют тенденции превращения порошковой металлургии в предпочтительный способ изготовления компонентов из этих металлов.

Согласно одному или нескольким альтернативным воплощениям шихта топливного ядра тепловыделяющих элементов 20 может быть получена литьем вместо спекания. Измельченный в порошок или монолитный тугоплавкий металл и измельченный в порошок или монолитный топливный материал (а также порошкообразный выгорающий поглотитель в случае его включения в сердечник 100) могут быть смешаны, расплавлены и отлиты в литейную форму. Литейная форма может создать в отлитом сердечнике 100 полость в форме заготовки для вытеснителя таким образом, чтобы заготовка вытеснителя 110 могла быть вставлена после отливки сердечника 100 таким же способом, посредством которого добавляется оболочка 120 для получения заготовки, предназначенной для экструдирования. Остальные этапы при производстве тепловыделяющих элементов 20 могут оставаться такими же или подобными приведенному выше воплощению, в котором вместо литья применяется спекание. Последующая экструзия приводит к металлургическому соединению между вытеснителем 110 и сердечником 100, а также между сердечником 100 и оболочкой 120.

Согласно одному или нескольким альтернативным воплощениям тепловыделяющие элементы 20 производятся с помощью порошкообразного керамического топливного материала вместо порошкообразного металлического топливного материала. Остальные этапы изготовления могут быть такими же, как и обсуждавшиеся выше в отношении воплощений, использующих порошкообразный металлический топливный материал. В различных воплощениях металлического топлива и воплощениях керамического топлива данный способ изготовления может привести к топливному сердечнику 100, содержащему топливные материалы, размещенные в матрице из металлического нетопливного материала. В одном или нескольких воплощениях металлического топлива полученный топливный сердечник 100 содержит топливный сердечник из металлического сплава, содержащего сплав металлического топливного материала, и матрицу из металлического нетопливного материала (например, сплав циркония и урана). В одном или нескольких воплощениях керамического топлива сердечник 100 содержит керамический топливный материал, размещенный (например, равномерно вкрапленный) в матрице из металлического нетопливного материала. Согласно различным воплощениям керамический топливный материал, используемый при данном способе изготовления, может содержать порошкообразный оксид урана или плутония, порошкообразный нитрид урана или плутония, порошкообразный карбид урана или плутония, порошкообразный гидрид урана или плутония, или их комбинацию. В отличие от стандартных  $UO_2$  тепловыделяющих элементов, в которых гранулы  $UO_2$  размещаются в трубе, способ производства согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения приводит к керамическому топливу, размещающемуся в твердой матрице из нетопливного материала (например, циркониевой матрице).

Как показано на фиг. 4, шаг витка в осевом направлении спиральных ребер 130 выбирается согласно условиям размещения осей смежных тепловыделяющих элементов 10 через промежутки, равные диаметру описанной окружности в поперечном сечении тепловыделяющего элемента, и может составлять от 5 до 20% длины тепловыделяющего элемента 20. Согласно одному воплощению шаг (то есть расстояние, на котором лепесток/ребро делает полный оборот) составляет около 21,5 см, в то время как полная рабочая длина элемента 20 составляет около 420 см. Как показано на фиг. 3, устойчивость вертикального расположения тепловыделяющих элементов 10 обеспечивается: у основания - нижней упорной пластиной 70; сверху - верхней упорной пластиной 80; и по высоте активной зоны - кожухом 30. Как показано на фиг. 1, тепловыделяющие элементы 10 имеют такую кольцевую ориентацию, при которой имеющие деление на лепестки профили любых двух соседних тепловыделяющих элементов 10 имеют общую плоскость симметрии, которая проходит через оси двух соседних тепловыделяющих элементов 10 по меньшей мере в одном поперечном сечении пучка тепловыделяющих элементов.

Как показано на фиг. 1, спиральное закручивание тепловыделяющих элементов 20 в комбинации с их ориентацией обеспечивает существование одной или нескольких плоскостей саморасстановки. Как показано на фиг. 1, при такой саморасстановке ребра соседних элементов 20 соприкасаются друг с другом, обеспечивая надлежащее расстояние между такими элементами 20. Таким образом, межцентровое расстояние для элементов 20 будет приблизительно таким же, как и диаметр описанной окружности каждого элемента 20 (12,6 мм в элементе, показанном на фиг. 5). В зависимости от числа лепестков 20b в каждом тепловыделяющем элементе 20 и относительного геометрического расположения тепловыделяющих элементов 20 все соседние тепловыделяющие элементы 20 или только часть соседних тепловыделяющих элементов 20 будут контактировать друг с другом. Например, в иллюстрируемом четырехлепестковом воплощении каждый тепловыделяющий элемент 20 касается всех четырех соседних тепловыделяющих элементов 20 в каждой плоскости саморасстановки. Однако трехлепестковом воплощении тепловыделяющего элемента, при котором тепловыделяющие элементы располагаются в гексагональной структуре, каждый тепловыделяющий элемент в данной плоскости саморасстановки будет касаться только трех из шести соседних тепловыделяющих элементов. С тремя другими соседними тепловыде-

ляющими элементами данный трехлепестковый тепловыделяющий элемент войдет в контакт на следующей далее в продольном направлении плоскости саморасстановки (то есть через  $1/6$  оборота, сдвигающегося от предыдущей плоскости саморасстановки).

В  $n$ -лепестковом элементе 20, в случае которого каждый тепловыделяющий элемент 20 примыкает к  $n$  тепловыделяющим элементам, а плоскость саморасстановки будет находиться каждые  $1/n$  оборота по спирали (например, каждые  $1/4$  оборота по спирали четырехлепесткового элемента 20, упорядоченно в имеющей форму квадрата структуре таким образом, что четыре других тепловыделяющих элемента 20 граничат с данным тепловыделяющим элементом 20; каждые  $1/3$  оборота по спирали для трехлепесткового элемента, в случае которого три тепловыделяющих элемента граничат с данным тепловыделяющим элементом (то есть, каждые  $120^\circ$  по окружности периметра тепловыделяющего элемента)). Шаг спирали может быть модифицирован так, чтобы создавать большее или меньшее количество плоскостей саморасстановки по осевой длине тепловыделяющих элементов 20. Согласно одному воплощению каждый четырехлепестковый тепловыделяющий элемент 20 включает множество шагов винта таким образом, что по осевой длине пучка тепловыделяющих элементов 20 образуется множество плоскостей саморасстановки.

В иллюстрируемом воплощении все элементы 20 закручены в одном направлении.

Однако согласно одному альтернативному воплощению без отклонения от объема настоящего изобретения соседние элементы 20 могут быть закручены в противоположных направлениях.

Формула для количества плоскостей саморасстановки по длине топливного стержня является следующей:

$$N = n \times L / h,$$

где

$L$  - длина топливного стержня;

$n$  - количество лепестков (ребер) и количество тепловыделяющих элементов, соседствующих с данным тепловыделяющим элементом;

$h$  - шаг спирали.

Данная формула немного изменяется, если количество лепестков и количество тепловыделяющих элементов, соседних для данного тепловыделяющего элемента, оказывается неодинаковым.

В результате такой саморасстановки оказывается возможным исключение применения в тепловыделяющей сборке 10 дистанционирующей решетки, которая в ином случае могла бы быть необходимой для обеспечения надлежащего расстояния между элементами по длине сборки 10. При исключении дистанционирующей решетки теплоноситель получает возможность более свободного протекания через сборку 10, что предпочтительно увеличивает теплопередачу от элементов 20 к теплоносителю.

Однако согласно альтернативным воплощениям настоящего изобретения, без отклонения от объема настоящего изобретения сборка 10 может включать дистанционирующую решетку.

Как показано на фиг. 3, кожух 30 образует трубчатую оболочку, которая продолжается осесимметрично по всей длине тепловыделяющих элементов 20 и окружает элементы 20. Однако согласно одному альтернативному воплощению настоящего изобретения кожух 30 может содержать разделенные в продольном направлении полосы, каждая из которых окружает тепловыделяющие элементы 20. Одна или несколько таких полос могут совпадать в осевом направлении с плоскостями саморасстановки. Между такими разделенными в осевом направлении полосами могут продолжаться продолжающиеся в осевом направлении угловые стойки для поддержания полос, сохранения расположения полос и укрепления сборки. В качестве варианта и/или в дополнение в ином случае в трубчатом/полигональном кожухе 30 могут быть прорезаны отверстия в местах, где кожух 30 не является необходимым или желательным для целей поддержки. Применение сплошного кожуха 30 может способствовать лучшему управлению разделенными потоками теплоносителя через каждую индивидуальную тепловыделяющую сборку 10. В отличие от этого, применение полос или кожуха с отверстиями может способствовать лучшему перемешиванию теплоносителя между соседними тепловыделяющими сборками 10, что может предпочтительно снизить температурные градиенты по теплоносителю между соседними тепловыделяющими сборками 10.

Как показано на фиг. 1, периметр поперечного сечения кожуха 30 имеет форму, которая приспособлена к реактору, в котором используется сборка 10. В таких реакторах как AP-1000, в которых применяются квадратные тепловыделяющие сборки, кожух в поперечном сечении имеет форму квадрата. Однако в качестве варианта кожух 30 может принимать любую подходящую форму в зависимости от реактора, в котором он применяется (например, гексагональную форму для применения в реакторе WER), как показано, например, на фиг. 1 из публикации патентной заявки US 2009/0252278 A1.

Направляющие трубы 40, предназначенные для введения регулирующих поглощение нейтронов элементов на основе карбида бора ( $B_4C$ ), сплава серебра, кадмия и индия (Ag, In, Cd), титаната диспрозия ( $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$ ) или других подходящих сплавов или соединений, применяемых для управления реактивностью (не показаны), и элементов выгорающего поглотителя на основе карбида бора, оксида гадолиния ( $Gd_2O_3$ ) или других подходящих материалов (не показаны), размещаются в верхнем патрубке 50 с возможностью упругого смещения в осевом направлении. Направляющие трубы 40 могут содержать сплав

циркония. Например, показанное на фиг. 1 расположение направляющих труб 40 соответствует их расположению, применяемому в реакторе AP-1000 (например, 24 направляющие трубы, сгруппированные двумя кольцевыми рядами в положениях, отображаемых решеткой 17×17).

Форма, размер и признаки каркаса 25 зависят от конкретной активной зоны реактора, в которой предполагается применение сборки 10. Таким образом, среднему специалисту в данной области будет понятно, каким образом может быть изготовлен каркас с подходящими для данной тепловыделяющей сборки 10 формой и размерами. Например, каркас 25 может быть так сконструирован и ему может быть придана такая форма, чтобы вводиться в активную зону реактора стандартной атомной электростанции вместо тепловыделяющей сборки с оксидом урана или смешанным оксидом, стандартной для активной зоны реактора такой атомной электростанции. Атомная электростанция может включать конструкцию активной зоны реактора, которая применялась в реальных условиях эксплуатации до 2010 г. (например, в 2-, 3- или 4-контурных PWR; BWR-4). В качестве варианта атомная электростанция может быть совершенно новой конструкции, специально приспособленной для эксплуатации с тепловыделяющей сборкой 10.

Как пояснялось выше, иллюстрируемая тепловыделяющая сборка 10 разработана для применения в реакторах AP-1000 или EPR. Данная сборка включает матрицу 17×17 из тепловыделяющих элементов 20, из которых 24 заменены направляющими трубами 40, как объяснялось выше, с получением в общей сложности 265 тепловыделяющих элементов 20 в EPR или 264 тепловыделяющих элементов 20 в AP-1000 (в AP-1000 помимо этих 24 тепловыделяющих элементов, заменяемых направляющими трубами, центральный тепловыделяющий элемент также заменен на трубу, оснащенную инструментальными средствами).

Элементы 20 предпочтительно обеспечивают 100% всего расщепляющегося материала тепловыделяющей сборки 10. В качестве варианта часть расщепляющегося материала сборки 10 может быть обеспечена через иные, помимо элементов 20, тепловыделяющие элементы (например, тепловыделяющие элементы без лепестков, элементы с оксидом урана, элементы, имеющие топливные соотношения и/или степень обогащения, отличные от элементов 20). Согласно таким различным альтернативным воплощениям тепловыделяющие элементы 20 обеспечивают по меньшей мере 50, 60, 70, 75, 80, 85, 90 и/или 95 об.% всего расщепляющегося материала тепловыделяющей сборки 10.

Применение металлических тепловыделяющих элементов 20 согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения помогает достижению различных преимуществ перед оксидом урана или смешанным оксидным топливом, традиционно используемым в атомных реакторах с водяным охлаждением (LWR) (включая реакторы с кипящей водой и реакторы, охлаждаемые водой под давлением), такие как разработанный компанией Westinghouse AP-1000, разработанные AREVA реакторы EPR или разработанный Дженерал Электрик ABWR. Например, согласно одному или нескольким воплощениям номинальная мощность LWR, работающего на стандартном топливе из оксида урана или смешанном оксидном топливе, может быть увеличена вплоть до около 30% заменой цельнометаллическими тепловыделяющими элементами 20 и/или тепловыделяющими сборками 10 стандартного топлива из оксида урана и тепловыделяющих сборок, применяемых в настоящее время в существующих типах реакторов LWR или в LWR новых типов, которые были предложены.

Одним из ключевых ограничений в отношении увеличения номинальной мощности LWR, действующих на стандартном топливе из оксида урана, была малая площадь поверхности цилиндрических тепловыделяющих элементов, в которых используется такое топливо. Цилиндрический тепловыделяющий элемент имеет наименьшее отношение площади поверхности к объему для любого типа профиля поперечного сечения тепловыделяющего элемента. Другим важным ограничением для стандартного топлива из оксида урана является низкое выгорание, которого такие тепловыделяющие элементы могут достигать, при этом все еще демонстрируя приемлемые критерии эффективности топлива. В результате эти связанные со стандартным топливом из оксида урана или смешанным оксидным топливом факторы значительно ограничивают степень, до которой можно было бы увеличить имеющуюся на данный момент номинальную мощность реакторов.

Одно или несколько воплощений цельнометаллических тепловыделяющих элементов 20 преодолевают указанные выше недостатки. Например, как указывалось выше, отсутствие дистанционирующей решетки может уменьшить гидравлическое сопротивление и благодаря этому усилить поток теплоносителя и теплопередачу от элементов 20 к теплоносителю первого контура. Спиральное закручивание тепловыделяющих элементов 20 может усилить взаимное перемешивание теплоносителя и турбулентность, что может также увеличить тепловой поток от элементов 20 к теплоносителю.

Предварительные нейтронные и термодинамические исследования показали следующее согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения:

Номинальная тепловая мощность легководного реактора (LWR) может быть увеличена на величину вплоть до 30,7% или более (например, номинальная тепловая мощность реактора EPR может быть увеличена от 4,59 до 6,0 ГВт тепловой энергии).

С объемной долей урана 25% в циркониево-урановой смеси и степенью обогащения урана-235, равной 19,7%, активная зона реактора EPR с четырехлепестковой конфигурацией металлического тепловы-

деляющего элемента 20 могла бы функционировать в течение около 500-520 эффективных суток работы при полной мощности (EFPD) с увеличенной номинальной тепловой мощностью в 6,0 ГВт тепловой энергии в случае замены 72 тепловыделяющих сборок (один раз в 18 месяцев) в партии или 540-560 EFPD в случае замены 80 тепловыделяющих сборок в партии (один раз каждые 18 месяцев).

Показано, что благодаря увеличенной площади поверхности многолепесткового тепловыделяющего элемента, даже при увеличенной номинальной мощности в 6,0 ГВт тепловой энергии, средний тепловой поток у поверхности многолепесткового тепловыделяющего элемента на 4-5% ниже этого показателя для цилиндрических тепловыделяющих элементов с оксидом урана, функционирующих при номинальной тепловой энергии в 4,59 ГВт тепловой энергии. Это способно обеспечить увеличенный коэффициент безопасности в отношении критического теплового потока (например, увеличенный предел по запасу до кризиса пузырькового кипения в реакторе, охлаждаемого водой под давлением, (PWR) или максимальную часть активной зоны реактора, ограничивающую запас до кризиса теплообмена в кипящем реакторе (BWR)). Кроме того, это может обеспечить возможность применения по 12 тепловыделяющих элементов в сборке с выгорающим поглотителем. Выгорающие поглотители могут использоваться для снятия избыточной реактивности в начале цикла или увеличения эффекта Доплера в ходе нагревания активной зоны.

Таким образом, тепловыделяющие сборки 10 могут обеспечить более высокую выходную мощность тепловой энергии при более низкой рабочей температуре топлива, чем стандартные тепловыделяющие сборки с оксидом урана или смешанным оксидным топливом.

Для утилизации увеличенной выходной мощности сборки 10 электростанции обычного типа могут быть модернизированы (например, применены более крупные и/или дополнительные насосы для теплоносителя, парогенераторы, теплообменники, компенсаторы давления, турбины). Действительно, согласно одному или нескольким воплощениям такая модернизация способна обеспечить получение на существующих реакторах на 30-40% больше электричества. Такая возможность может сделать излишней необходимость в строительстве полноценного второго реактора. Стоимость модификации может быстро окупиться за счет увеличенной выходной электрической мощности. В качестве варианта могут быть созданы новые электростанции, предполагающие включение признаков, обеспечивающих надлежащее обращение и применение более высокой выходной тепловой мощности сборки 10.

Кроме того, одно или несколько воплощений настоящего изобретения могут позволить эксплуатацию реактора LWR при такой же номинальной мощности, как и со стандартным топливом из оксида урана или смешанным оксидным топливом с применением существующих реакторных систем без каких-либо существенных модифицированных реакторов. Например, согласно одному воплощению

EPR будет иметь такую же выходную мощность, как и в случае применения стандартного топлива из оксида урана: 4,59 ГВт тепловой энергии;

с объемной долей урана 25% в циркониево-урановой смеси и степенью обогащения урана-235, приблизительно составляющей 15%, активная зона реактора EPR с четырехлепестковой конфигурацией металлического тепловыделяющего элемента 20 могла бы функционировать в течение около 500-520 эффективных суток работы при полной мощности (EFPD) в случае замены 72 тепловыделяющих сборок в партии или 540-560 EFPD в случае замены 80 тепловыделяющих сборок в партии.

Средний тепловой поток у поверхности для элементов 20 уменьшается приблизительно на 30% по сравнению с этим показателем для цилиндрических стержней со стандартным топливом из оксида урана (например, 39,94 Вт/см<sup>2</sup> по сравнению с 57,34 Вт/см<sup>2</sup>). Поскольку возрастание температуры теплоносителя по сборке 10 (например, разность между температурой на впуске и выходе) и скорость потока теплоносителя через сборку 10 остаются приблизительно одинаковыми по сравнению со стандартными тепловыделяющими сборками, сниженный средний тепловой поток у поверхности приводит к соответствующему снижению температуры поверхности топливного стержня, что вносит вклад в увеличенные коэффициенты безопасности в отношении критического теплового потока (например, увеличенный предел по запасу до кризиса пузырькового кипения в PWR или максимальную часть активной зоны реактора, ограничивающую запас до кризиса теплообмена в BWR).

Помимо этого и/или в качестве варианта тепловыделяющие сборки 10 согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения могут поэтапно/постепенно вводиться в активную зону реактора вместо стандартных тепловыделяющих сборок. В течение переходного периода тепловыделяющие сборки 10, имеющие сопоставимые со стандартными тепловыделяющими сборками выходы по расщепляющемуся материалу, нейтронному и тепловому выходу, могут постепенно заменять такие стандартные тепловыделяющие сборки в ходе последовательной замены топлива, не изменяя при этом параметры режима работы электростанции. Таким образом, тепловыделяющие сборки 10 могут вноситься в существующую активную зону с частичным ее модифицированием, что может быть важным в течение переходного периода (то есть начинаться с частичной загрузки активной зоны тепловыделяющими сборками 10 и постепенно переходить к полной загрузке активной зоны тепловыделяющими сборками 10).

Кроме того, загрузка сборок 10 расщепляющимся материалом может приспособливаться в зависимости от данного, желаемого оператором электростанции этапа переходного периода. Например, загрузка расщепляющимся материалом может быть увеличена соответствующим образом для увеличения выходной тепловой мощности реактора приблизительно от 0 до 30% или более по сравнению с применением

ем стандартных тепловыделяющих сборок, которые заменяются сборками 10. Соответственно оператор электростанции может выбрать желательную степень повышения удельной мощности, основываясь на существующей инфраструктуре электростанции или производительности станции в различные периоды времени в ходе модернизации.

Не отклоняясь от объема настоящего изобретения, одно или несколько воплощений тепловыделяющих сборок 10 и тепловыделяющих элементов 20 могут быть применены в реакторах на быстрых нейтронах (в противоположность легководным ядерным реакторам). В реакторах на быстрых нейтронах нетопливный металл топливного сердечника 100 предпочтительно представлен тугоплавким металлом, например молибденовым сплавом (например, чистым молибденом или комбинацией молибдена и других металлов), а оболочка 120 предпочтительно является нержавеющей сталью (которая включает любые варианты ее сплавов) или другим материалом, подходящим для применения с теплоносителем в таких реакторах (например, натрием). Такие тепловыделяющие элементы 20 могут быть произведены посредством обсуждавшегося выше способа совместной экструзии или же могут быть получены любым другим подходящим способом (например, плавкой в вакууме).

Как показано на фиг. 7А, 7В и 8, тепловыделяющие сборки 510 согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения могут быть применены в реакторе с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем под давлением 500 (см. фиг. 8), таком как реактор CANDU.

Как показано на фиг. 7А и В, тепловыделяющая сборка 510 содержит множество тепловыделяющих элементов 20, установленных в каркасе 520. Каркас 520 содержит две торцевые пластины 520а, 520b, которые прикреплены к противоположным осевым концам тепловыделяющих элементов 20 (например, посредством сварки, посадки с натягом, любого другого способа крепления из описанных выше в отношении присоединения элементов 20 к нижней упорной пластине 70). Элементы 20, используемые в тепловыделяющей сборке 510, в типичном случае намного короче, чем элементы 20, используемые в сборке 10. Согласно различным воплощениям и реакторам 500, элементы 20 и сборки 510, используемые в реакторе 500, могут быть длиной около 18 дюймов (45,72 см).

Элементы 20 могут быть так размещены в сборке 510 по отношению друг к другу, чтобы плоскости саморасстановки поддерживали расстояние между элементами 20 таким же образом, как описано выше в отношении сборки 10. В качестве варианта элементы 20 сборки 510 могут быть размещены относительно друг друга таким образом, чтобы соседние элементы 20 никогда не касались друг друга, а вместо этого для поддержания расстановки элементов 20 полностью опирались на каркас 520. Помимо этого, к элементам 20 или их ребрам в различных положениях по осевой длине элементов 20 могут быть присоединены дистанционирующие устройства для обеспечения контакта с соседними элементами 20 и содействия в поддержании расположения элементов 20 (например, способом, подобным тому, с помощью которого дистанционирующие устройства применяются на стандартных топливных стержнях стандартных тепловыделяющих сборок для реакторов с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем под давлением для обеспечения поддержания расстояний между стержнями).

Как показано на фиг. 8, сборки 510 вставляются в трубы 500а каландра реактора 500 (иногда называемые в данной области каландром 500). Реактор 500 использует тяжелую воду 500b в качестве замедлителя и теплоносителя первого контура. Теплоноситель первого контура 500b циркулирует горизонтально через трубы 500а и затем поступает к теплообменнику, где тепло передается к теплоносителю второго контура, который, как правило, применяется для выработки электричества с помощью турбин. Загрузочные устройства для тепловыделяющих сборок (не показаны) применяются для загрузки тепловыделяющих сборок 510 с одной стороны труб 500а каландра и выталкивания израсходованных сборок 510 с противоположной стороны труб 500а, как правило, в процессе работы реактора 500.

Тепловыделяющие сборки 510 могут быть предназначены для того, чтобы являться прямой заменой для стандартных тепловыделяющих сборок (также известных в данной области как пучки тепловыделяющих стержней) для существующих стандартных реакторов с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем под давлением (например, реакторы CANDU). В одном таком воплощении сборки 510 помещаются в реактор 500 вместо стандартных сборок/пучков. Такие тепловыделяющие сборки 510 могут быть разработаны таким образом, чтобы иметь нейтронные/теплофизические свойства, подобные стандартным заменяемым сборкам. В качестве варианта, тепловыделяющие сборки 510 могут быть предназначены для обеспечения повышения мощности тепловой энергии. В предполагающих такое повышение воплощениях могут быть разработаны новые или модернизированные реакторы 500, соответствующие более высокой тепловой мощности.

Согласно различным воплощениям настоящего изобретения, тепловыделяющая сборка 10 предназначена для замены стандартной тепловыделяющей сборки стандартного ядерного реактора. Например, тепловыделяющая сборка 10, показанная на в фиг. 1, специально разработана для замены стандартной тепловыделяющей сборки, в которой используется матрица 17×17 из  $UO_2$  топливных стержней. Если направляющие трубы 40 в сборке 10 остаются в том же положении, в котором они находились бы в случае использования стандартной тепловыделяющей сборки, и если все тепловыделяющие элементы 20 имеют те же самые размеры, то шаг между тепловыделяющими элементами/стержнями в стандартной  $UO_2$  тепловыделяющей сборке и в одном или нескольких воплощениях тепловыделяющей сборки 10 ос-

тается неизменным (например, шаг в 12,6 мм). Другими словами, продольные оси тепловыделяющих элементов 20 могут размещаться в тех же положениях, что и продольные оси стандартных  $UO_2$  топливных стержней в сопоставимой стандартной тепловыделяющей сборке. Согласно различным воплощениям, тепловыделяющие элементы 20 могут иметь больший диаметр описанной окружности, чем сопоставимые  $UO_2$  топливные стержни (например, 12,6 мм по сравнению с наружным диаметром 9,5 мм для типичного  $UO_2$  топливного стержня). В результате в самовыравнивающейся плоскости, иллюстрируемой на фиг. 1, длина и ширина поперечного сечения, занимаемого тепловыделяющими элементами 20 пространства, может быть немного больше, чем занимаемое стандартными  $UO_2$  топливными стержнями в стандартной тепловыделяющей сборке (например, 214,2 мм для тепловыделяющей сборки 10, то есть 17 тепловыделяющих элементов 20 с диаметром окружности, описывающей тепловыделяющий элемент, равный 12,6 мм, в отличие от 211,1 мм для стандартной тепловыделяющей  $UO_2$  сборки, которая включает матрицу  $17 \times 17$  из 9,5 мм  $UO_2$  топливных стержней, отделенных друг от друга с шагом в 12,6 мм). В стандартных  $UO_2$  тепловыделяющих сборках топливные стержни окружает дистанционирующая решетка, которая увеличивает полные размеры поперечного сечения стандартной тепловыделяющей сборки до 214 мм  $\times$  214 мм. В тепловыделяющей сборке 10 аналогичным образом размеры тепловыделяющей сборки 10 увеличивает кожух 30. Кожух 30 может иметь любую подходящую толщину (например, 0,5 мм или 1,0 мм). В одном воплощении, в котором используется кожух 30 толщиной 1,0 мм, полные размеры поперечного сечения тепловыделяющей сборки 10 из одного воплощения могут составлять 216,2 мм  $\times$  216,2 мм (например, 214 мм, занимаемые 17 тепловыделяющими элементами 20 диаметром 12,6 мм, плюс дважды по 1,0 мм на толщину кожуха 30). В результате согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения тепловыделяющая сборка 10 может быть немного больше (например, 216,2 мм  $\times$  216,2 мм), чем типичная  $UO_2$  тепловыделяющая сборка (214 мм  $\times$  214 мм). Большой размер может ухудшить способность сборки 10 должным образом вставляться в предназначенные для тепловыделяющих сборок позиции одного или нескольких стандартных реакторов, которые были разработаны для применения со стандартными  $UO_2$  тепловыделяющими сборками. Для обеспечения соответствия этому изменению размеров согласно одному или нескольким воплощениям настоящего изобретения может быть разработан и построенный новый реактор, приспособленный к более крупному размеру тепловыделяющих сборок 10.

Согласно одному альтернативному воплощению настоящего изобретения диаметр описанной окружности всех тепловыделяющих элементов 20 может быть немного уменьшен так, чтобы уменьшить полные поперечные размеры тепловыделяющей сборки 10. Например, диаметр описанной окружности каждого тепловыделяющего элемента 20 может быть уменьшен на 0,13 мм до 12,47 мм так, чтобы поперечное сечение общего занимаемого тепловыделяющей сборкой 10 пространства оставалось сопоставимым с 214 мм на 214 мм стандартной тепловыделяющей сборки (например, 17 тепловыделяющих элементов 20 диаметром 12,47 мм плюс две толщины кожуха по 1,0 мм, дающие в сумме около 214 мм). Такое снижение размеров матрицы  $17 \times 17$  немного изменит местоположение направляющих труб 40 в тепловыделяющей сборке 10 относительно позиций направляющих труб в стандартной тепловыделяющей сборке. Для приспособления к этому небольшому изменению местоположения труб 40 аналогичным образом могут быть смещены позиции соответствующего комплекта стержней регулирования мощности и приводных механизмов стержней регулирования мощности в реакторе для обеспечения соответствия с новыми положениями направляющих труб 40. В качестве варианта, если в стандартном реакторе обеспечиваются достаточные зазоры и допуски для стержней регулирования мощности, то стержни регулирования мощности и при стандартном размещении смогут удовлетворительно входить в немного смещенные трубы 40 в тепловыделяющей сборке 10.

В качестве варианта может быть немного уменьшен диаметр периферийных тепловыделяющих элементов 20 так, чтобы вся сборка 10 вставлялась в стандартный реактор, предназначенный для стандартных тепловыделяющих сборок. Например, диаметр описанной окружности внешнего ряда тепловыделяющих элементов 20 может быть уменьшен на 1,1 мм так, чтобы полные размеры тепловыделяющей сборки составляли бы 214 мм  $\times$  214 мм (например, 15 12,6 мм тепловыделяющих элементов 20 плюс два 11,5 мм тепловыделяющих элемента 20 плюс две 1,0 мм толщины кожуха 30). В качестве варианта диаметр описанной окружности двух внешних рядов тепловыделяющих элементов 20 может быть уменьшен каждый на 0,55 мм так, чтобы полные размеры тепловыделяющей сборки оставались бы 214 мм  $\times$  214 мм (например, 13 12,6 мм тепловыделяющих элементов 20 плюс четыре 12,05 мм тепловыделяющие сборки плюс две 1,0 мм толщины кожуха 30). В каждом воплощении шаг и положение центральной группы из  $13 \times 13$  тепловыделяющих элементов 20 и направляющих труб 40 остается неизменным, таким, чтобы направляющие трубы 40 совмещались с комплектом стержней регулирования мощности и приводными механизмами стержней регулирования мощности в стандартном реакторе.

На фиг. 10 показана тепловыделяющая сборка 610 согласно одному альтернативному варианту воплощения настоящего изобретения. Согласно различным воплощениям тепловыделяющая сборка 610 предназначается для замены стандартной тепловыделяющей  $UO_2$  сборки в стандартном реакторе при поддержании позиционирования стержней регулирования мощности реакторов, разработанных для применения с различными стандартными тепловыделяющими  $UO_2$  сборками. Тепловыделяющая сборка 610

в целом подобна тепловыделяющей сборке 10, которая описывается выше и иллюстрируется на фиг. 1, но включает несколько отличий, которые помогают сборке 610 лучше вставляться в реакторы одного или нескольких имеющихся типов (например, реакторы, применяющие конструкцию тепловыделяющей сборки компании Westinghouse, в которой используется матрица из  $UO_2$  стержней 17 на 17) без модифицирования расположения стержней регулирования мощности или приводных механизмов стержней регулирования мощности.

Как показано на фиг. 10, тепловыделяющая сборка включает матрицу из  $17 \times 17$  позиций. Центральная группа 15 на 15 занята 200 тепловыделяющими элементами 20 и 25 направляющими трубами 40, как описано выше в отношении подобной тепловыделяющей сборки 10, иллюстрируемой на фиг. 1. В зависимости от конкретной конструкции реактора центральная направляющая труба 40 может быть заменена дополнительным тепловыделяющим элементом 20, если реакторный проект не предполагает использования центральной трубы 40 (то есть 201 тепловыделяющий элемент 20 и 24 направляющие трубы 40). Положения направляющих труб 40 соответствуют положениям направляющих труб, используемых в реакторах, предназначенных для применения стандартных тепловыделяющих  $UO_2$  сборок.

Периферийные позиции (то есть позиции, расположенные в поперечном направлении снаружи от тепловыделяющих элементов 20), представленные матричной структурой 17 на 17 тепловыделяющей сборки 610, заняты 64 тепловыделяющими  $UO_2$  элементами/стержнями 650. Как известно в данной области, топливные стержни 650 могут содержать стандартное топливо в виде таблеток  $UO_2$ , размещаемых в полом стержне.

Степень обогащения U-235 топлива в виде таблеток  $UO_2$  может составлять менее 20%, менее 15%, менее 10 % и/или менее 5%. Стержни 650 могут иметь немного меньший диаметр (например, 9,50 мм), чем диаметр окружности, описывающей тепловыделяющие элементы 20, что немного уменьшает полные размеры поперечного сечения тепловыделяющей сборки 610 с тем, чтобы сборка 610 лучше входила в пространство, предназначенное для стандартной тепловыделяющей  $UO_2$  сборки.

В иллюстрируемом воплощении топливные стержни/элементы 650 содержат топливо в виде таблеток  $UO_2$ . Однако топливные стержни/элементы 650 могут в качестве варианта использовать любую другую подходящую комбинацию одного или нескольких расщепляющихся и/или воспроизводящих топливных материалов (например, торий, плутоний, уран-235, уран-233, любые их комбинации). Такие топливные стержни/элементы 650 могут содержать металлическое и/или оксидное топливо.

Согласно одному или нескольким альтернативным воплощениям топливные стержни 650 могут занимать не все 64 периферийных положения. Например, топливные стержни 650 могут занимать верхний ряд и левую колонку периферии, в то время как нижний ряд и правая колонка периферии могут быть заняты тепловыделяющими элементами 20. В качестве варианта топливные стержни 650 могут занимать две любые другие стороны периферии тепловыделяющей сборки. Кожух 630 может быть модифицирован так, чтобы охватывать дополнительные тепловыделяющие элементы 20 по периферии тепловыделяющей сборки. Такие модифицированные тепловыделяющие сборки могут располагаться примыкающим друг к другу образом так, чтобы ряд/колонка периферийных тепловыделяющих элементов 650 в одной сборке всегда соседствовала с рядом/колонкой тепловыделяющих элементов 20 в смежной тепловыделяющей сборке. В результате дополнительно пространство для тепловыделяющих сборок обеспечивается тем фактом, что граница раздела между соседними сборками немного сдвигается к сборке, которая включает тепловыделяющие элементы 650 на периферийной, граничной стороне. Такая модификация может обеспечить применение большего количества тепловыделяющих элементов 20 с более высокой тепловой мощностью, чем предоставляется тепловыделяющими сборками 610.

Кожух 630 окружает группу тепловыделяющих элементов 20 и отделяет элементы 20 от элементов 650. Патрубки 50, 60, кожух 630, образованные между ними пути прохождения теплоносителя, относительные перепады давления по элементам 20 и элементам 650 и/или увеличенный перепад давления на дистанционирующей решетке 660 (обсуждается ниже), окружающей элементы 650, могут привести к более высокой скорости потока теплоносителя внутри кожуха 630 и вдоль обладающих более высокой тепловой мощностью тепловыделяющих элементов 20, чем скорость потока вне кожуха 630 и вдоль имеющих более низкую тепловую мощность топливных стержней 650. Проходы и/или отверстия в них могут быть спроектированы так, чтобы оптимизировать относительные скорости потока теплоносителя вдоль элементов 20, 650 на основе их соответствующих показателей тепловой мощности и планируемых рабочих температур.

Согласно различным воплощениям отношение объемов замедлителя и топлива для тепловыделяющих элементов 20 из тепловыделяющей сборки 610 меньше или равно 2,7, 2,6, 2,5, 2,4, 2,3, 2,2, 2,1, 2,0, 1,9 и/или 1,8. В иллюстрируемом воплощении отношение объемов замедлителя и топлива равняется отношению (1) общей площади внутри кожуха 630, доступной для теплоносителя/замедлителя (например, приблизительно выражаемой общей площадью поперечного сечения внутри кожуха 630 минус общая площадь поперечного сечения, занятая тепловыделяющими элементами 20 (принимая, что направляющие трубы 40 заполнены теплоносителем)), к (2) общей площади поперечного сечения сердечников 100 тепловыделяющих элементов 20 внутри кожуха 630.

Согласно альтернативному воплощению изобретения кожух 630 может быть заменен одной или не-

сколькими кольцевыми полосами или же кожух 630 может быть снабжен отверстиями, как пояснялось выше. Применение полос или отверстий в кожухе 630 может способствовать поперечному перемешиванию теплоносителя между тепловыделяющими элементами 20 и тепловыделяющими элементами 650.

Как показано на фиг. 10, тепловыделяющие элементы 650 располагаются внутри кольцевой дистанционирующей решетки 660, которая в целом является сопоставимой с внешней частью дистанционирующей решетки, применяемой в стандартной  $UO_2$  тепловыделяющей сборке. Дистанционирующая решетка 660 может быть жестко соединенной с кожухом 630 (например, посредством сварки, болтового, винтового или другого соединения). Дистанционирующая решетка 660 предпочтительно калибруется таким образом, чтобы обеспечивать такой же шаг между тепловыделяющими элементами 650 и тепловыделяющими элементами 20, который обеспечивается между центральными тепловыделяющими элементами 20 (например, шаг в 12,6 мм между осями всех тепловыделяющих элементов 20, 650). Для обеспечения такого расстояния тепловыделяющие элементы 650 могут быть расположены ближе к внешней стороне дистанционирующей решетки 660, чем к кожуху 630 и внутренней стороне дистанционирующей решетки 660. Тепловыделяющая сборка 610 и дистанционирующая решетка 660 также предпочтительно откалиброваны и расположены таким образом, чтобы между тепловыделяющими элементами 650 из соседних тепловыделяющих сборок обеспечивался один и тот же шаг (например, шаг в 12,6 мм). Однако, не отклоняясь от объема настоящего изобретения, расстояние между любым из тепловыделяющих элементов 20, 650 может варьироваться относительно расстояния между другими тепловыделяющими элементами 20, 650.

Согласно различным воплощениям, тепловыделяющие элементы 20 обеспечивают по меньшей мере 60, 65, 70, 75 и/или 80% общего объема всех содержащих расщепляющийся материал тепловыделяющих элементов 20, 650 из тепловыделяющей сборки 610. Например, согласно одному или нескольким воплощениям, в которых тепловыделяющая сборка 610 включает 201 тепловыделяющий элемент 20, каждый из которых имеет площадь поперечного сечения около  $70 \text{ мм}^2$ , и 64 тепловыделяющих элемента 650, каждый из которых имеет диаметр 9,5 мм, тепловыделяющие элементы 20 обеспечивают около 75,6% общего объема всех тепловыделяющих элементов 20, 650 ( $201 \text{ тепловыделяющий элемент } 20 \times 70 \text{ мм}^2 \text{ равняется } 14070 \text{ мм}^2$ ;  $64 \text{ тепловыделяющих элемента } 650 \times \pi \times (9,5/2)^2 = 4534 \text{ мм}^2$ ; площади тепловыделяющих элементов 20, 650, по существу, пропорциональны объемам тепловыделяющих элементов;  $(14070 \text{ мм}^2 / (14070 \text{ мм}^2 + 4534 \text{ мм}^2) = 75,6\%$ )).

Высота тепловыделяющей сборки 610 соответствует высоте сопоставимой стандартной тепловыделяющей сборки, которую сборка 610 может заменить (например, высота стандартной тепловыделяющей сборки для конструкции реактора Westinghouse или AREVA).

Иллюстрируемая тепловыделяющая сборка 610 может использоваться в  $17 \times 17$  реакторах PWR, таких как имеющие четырехконтурный дизайн Westinghouse, API 000 или AREVA EPR. Однако дизайн тепловыделяющей сборки 610 также может быть модифицирован для приспособления к различным другим конструкциям реакторов (например, реакторным проектам, в которых используется гексагональная тепловыделяющая сборка, в случае которых внешняя периферия шестиугольника занята  $UO_2$  стержнями, в то время как внутренние положения заняты тепловыделяющими элементами 20, или реакторам с кипящей водой, или малым модульным реакторам). При том, что в отношении предпочтительных воплощений приводятся конкретные величины размеров, без отступления от объема настоящего изобретения применительно к различным реакторам или типам реакторов может использоваться множество тепловыделяющих элементов 20, 650 и тепловыделяющих сборок 10, имеющих альтернативные габариты.

В зависимости от конкретной конструкции реактора дополнительные позиции для стержней тепловыделяющей сборки могут быть замещены  $UO_2$  стержнями. Например, в то время как тепловыделяющая сборка 610 включает  $UO_2$  стержни только во внешнем периферийном ряду, сборка 610 без отступления от объема настоящего изобретения может в качестве варианта включать  $UO_2$  стержни в двух внешних рядах.

Согласно различным воплощениям участок тепловыделяющей сборки 610, который поддерживает тепловыделяющие элементы 650, неотделим от участка тепловыделяющей сборки 610, который поддерживает тепловыделяющие элементы 20. Согласно различным воплощениям тепловыделяющие элементы 20 не являются отделяемыми в виде единого целого от тепловыделяющих элементов 650 из тепловыделяющей сборки 610 (даже при том, что индивидуальные тепловыделяющие элементы 20, 650 могут быть извлечены из сборки 610, например, в случае повреждения индивидуального ТВЭЛа). Аналогичным образом нет блокирующего устройства, которое бы избирательно прикрепляло участок тепловыделяющего элемента 650 тепловыделяющей сборки к участку тепловыделяющего элемента 20 тепловыделяющей сборки 610. Согласно различным воплощениям тепловыделяющие элементы 20 и тепловыделяющие элементы 650 из тепловыделяющей сборки 610 имеют одинаковый расчетный период эксплуатации, такой, что вся тепловыделяющая сборка 610 используется внутри реактора, а затем удаляется в виде единого израсходованного блока.

Согласно различным воплощениям увеличенная тепловая мощность тепловыделяющих элементов 20 внутри тепловыделяющей сборки 610 может обеспечить повышение мощности по сравнению со стандартной, полностью состоящей из  $UO_2$  топливных стержней сборкой, которую сборка 610 заменяет. Со-

гласно различным воплощениям повышение мощности составляет по меньшей мере 5, 10 и/или 15%. Согласно различным воплощениям такое повышение может находиться между 1 и 30%, 5 и 25% и/или 10 и 20%. Согласно различным воплощениям тепловыделяющая сборка 610 обеспечивает по меньшей мере 18-месячный топливный цикл, но может также способствовать переходу к топливному циклу продолжительностью в 24+ или 36+ месяцев. Согласно одному воплощению тепловыделяющей сборки 610, в которой используются тепловыделяющие элементы 20, имеющие модельные параметры, обсуждавшиеся выше в отношении показанного на фиг. 10 элемента 20, сборка 17 обеспечивает 17% повышение относительно стандартной тепловыделяющей  $UO_2$  сборки при эксплуатационных параметрах, определенных в нижеследующих таблицах.

Эксплуатационный параметр для реактора AREVA EPR	Величина	Единицы
Мощность реактора	5,37	ГВт тепловой энергии
Продолжительность топливного цикла	18	месяцы
Размер перегружаемой партии	1/3	Активная зона
Обогащение тепловыделяющего элемента 20	$\leq 19,7$	Масс. доля
Обогащение $UO_2$ в стержнях 650	$\leq 5$	Масс. доля
Скорость потока теплоносителя	117%	gv

\* gv = опорная величина

Параметр тепловыделяющей сборки	Величина	Единицы
Конструкция тепловыделяющей сборки	17x17	
Шаг тепловыделяющей сборки	215	мм
Габаритные размеры тепловыделяющей сборки	214	мм
Активная высота тепловыделяющего элемента	4200	мм
Количество топливных стержней	265	
Шаг тепловыделяющих элементов 20 (то есть расстояние от оси до оси)	12,6	мм
Средний наружный диаметр тепловыделяющего элемента 20 (диаметр описанной окружности)	12,6	мм
Средний минимальный диаметр тепловыделяющего элемента 20	10,44	мм
Отношение замедлитель/топливо, запальная зона (вокруг элемента 20)	2,36	
Отношение замедлитель/топливо, зона воспроизводства (вокруг топливных стержней 650)	1,9	

На фиг. 11-13 показана тепловыделяющая сборка 710 согласно одному альтернативному варианту воплощения настоящего изобретения. Согласно различным воплощениям тепловыделяющая сборка 710 предназначена для замены стандартной тепловыделяющей  $UO_2$  сборки в стандартном реакторе при сохранении позиционирования стержней регулирования мощности реакторов на  $UO_2$  топливе. Тепловыделяющая сборка 710 в целом подобна или идентична тепловыделяющей сборке 610, за исключением того, что  $UO_2$  стержни 650 в периферийном ряду тепловыделяющей сборки 610 заменены металлическими тепловыделяющими элементами 730, 740. Как поясняется ниже, тепловыделяющие элементы 730, 740 модифицированы так, чтобы способствовать лучшему введению сборки 710 в реакторы одного или нескольких существующих типов (например, реакторы, в которых применяется конструкция тепловыделяющей сборки Westinghouse, в которой используется матрица 17 на 17 из  $UO_2$  стержней) без изменения положения стержней регулирования мощности, приводных механизмов стержней регулирования мощности или внешних габаритов тепловыделяющей сборки. Тепловыделяющие элементы 730, 740 определяют подгруппу общего количества тепловыделяющих элементов 20, 730, 740 из тепловыделяющей сборки 710, в которой данная подгруппа располагается по внешнему периферийному ряду/периметру/кольцу узлов сетки в сеточной структуре 17 на 17 тепловыделяющей сборки 710.

На фиг. 11 показана часть поперечного сечения тепловыделяющей сборки 710, показанной в плоскости саморасстановки. Тепловыделяющие элементы 20, 730, 740 располагаются таким образом, что их оси размещаются в квадратной сеточной структуре 17 на 17. В иллюстрируемом воплощении расстояние между осевыми линиями любых двух соседних тепловыделяющих элементов 20, 730, 740 в тепловыделяющей сборке 710 предпочтительно является одним и тем же (например, 12,6 мм) и соответствует диаметру окружности, описывающей тепловыделяющие элементы 20, 730, 740. Чтобы вписываться в габариты пространства, доступного в стандартных реакторах (например, AP-1000) в местах нахождения стандартных направляющих труб 40, внешние стороны тепловыделяющих элементов 730, 740 уменьшены в размерах с боковых частей, чтобы соответствовать внутренней части кожуха 750. На фиг. 11 зона уменьшения размеров боковых частей иллюстрируется пунктирными линиями.

Как показано на фиг. 13А и В, тепловыделяющие элементы 20, 730 являются подобными и пред-

почтительно имеют одинаковый диаметр описанной окружности (например, 12,6 мм), что способствует осуществлению самостоятельной расстановки между тепловыделяющими элементами 20, 730. Тепловыделяющий элемент 730 может быть подобным или идентичным тепловыделяющему элементу 20 за исключением того, что (1) топливный сердечник 760 тепловыделяющего элемента 730 меньше, чем топливный сердечник 100 тепловыделяющего элемента 20, (2) оболочка 770 тепловыделяющего элемента 730 в среднем толще оболочки 120 тепловыделяющего элемента 20 и (3) одна периферическая сторона 770а оболочки 770 была уменьшена в поперечном направлении относительно других периферических сторон для удаления участка 770b исходной оболочки 770.

Уменьшение топливного сердечника 760 и утолщение оболочки 770 делает возможным удаление участка 770b оболочки 770, при этом все еще обеспечивая достаточно толстый слой оболочки 770 вокруг сердечника 760. Согласно различным воплощениям толщина оболочки 700 составляет по меньшей мере 0,4, 0,5 и/или 0,6 мм по всему тепловыделяющему элементу 730.

Удаляемый участок 770b предпочтительно удаляется после того, как тепловыделяющему элементу 730 придается спиральная, сегментированная форма. Удаляемый участок 770b может быть удален любым подходящим способом (например, стачиванием; хонингованием; притиркой и т.д.). Благодаря спиральной форме удаляемый участок 770b будет удаляться с располагающихся по окружности участков на множестве лепестков тепловыделяющего элемента 730. Другими словами, участки 770b лепестков оболочки 770 удаляются в зоне, где данный лепесток располагается на стороне 770а тепловыделяющего элемента 730, который будет смежным и примыкающим к кожуху 750. Из-за спирального закручивания тепловыделяющих элементов 730 оболочка 770 не удаляется единообразно с тепловыделяющего элемента 730, а только на концах 770а лепестков, которые наталкиваются на границы габаритов сборки 710, ограничиваемые кожухом 750. Согласно различным воплощениям сокращение радиуса 780 удаляемого участка 770b может составлять по меньшей мере 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, и/или 10%, и/или менее чем 30, 20 и/или 15% диаметра  $D$  окружности, описывающей тепловыделяющий элемент 730. Согласно различным воплощениям сокращение радиуса 780 может составлять по меньшей мере 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2, и/или 1,3 мм, и/или менее 4,0, 3,0, 2,0 и/или 1,5 мм.

Согласно альтернативным воплощениям тепловыделяющий элемент 730 может быть изначально получен в его конечной форме, такой, в которой удаляемые участки 770b никогда не присутствовали и не нуждаются в удалении.

Как показано на фиг. 11, угловой тепловыделяющий элемент 740 может быть, по существу, идентичным боковому тепловыделяющему элементу 730 за исключением того, что две расположенные по окружности стороны 770а оболочки 770 тепловыделяющего элемента 740 (а не только одна сторона 770а, как сделано в тепловыделяющем элементе 730) были уменьшены в поперечном направлении для удаления участка 770b с тем, чтобы тепловыделяющий элемент 740 надлежащим образом совпадал с угловым положением решетки тепловыделяющей сборки 710 и примыкал к двум взаимно перпендикулярным стенкам кожуха 750.

Хотя согласно некоторым неограничивающим воплощениям топливные сердечники 760 тепловыделяющих элементов 730, 740 имеют меньший объем (или площадь, если рассматривать поперечное сечение, перпендикулярное удлиненному продольному направлению тепловыделяющей сборки), чем сердечники 100 тепловыделяющих элементов 20, топливные сердечники 730, 740 сохраняют другие различные преимущества, обеспечиваемые формой тепловыделяющего элемента 20 и его конструкцией, поясняемые здесь в другом месте. Согласно различным воплощениям загрузка расщепляющегося материала сердечников 760 может быть увеличена (например, за счет более обогащенного урана) относительно периферийных сердечников 20 для компенсации меньшего объема сердечника 760.

Как показано на фиг. 13В, удаление удаляемого участка 770b приводит к тому, что геометрически центральная осевая линия 800 (то есть центр окружности, которая описывает спирально закрученную форму тепловыделяющего элемента 730) тепловыделяющих элементов 730, 740 оказывается смещенной относительно осевого центра масс 810 тепловыделяющих элементов 730, 740 (и/или осевого центра масс оболочки 770). Согласно различным неограничивающим воплощениям, такое смещение может составлять по меньшей мере 0,1, 0,3, 0,4, 0,5, 1,0, 2,0, 3,0, 4,0 и/или 5,0% диаметра  $D$  описанной окружности, и/или менее чем 30, 20 и/или 10% диаметра  $D$  описанной окружности. Согласно различным неограничивающим воплощениям осевой центр масс сердечника 760 (см. фиг. 13В) остается на центральной осевой линии 800 тепловыделяющего элемента 730.

Согласно различным воплощениям тепловыделяющие элементы 20, 730, 740 имеют длину между 1 и 5 м (измерение в осевом направлении), а диаметр описанной окружности находится между 6 и 40 мм, между 6 и 30 мм, между 6 и 20 мм, между 9 и 15 мм и/или около 12,6 мм. Согласно различным воплощениям отношение осевой длины тепловыделяющих элементов 730, 740 к их диаметру  $D$  описанной окружности составляет по меньшей мере 10:1, 20:1, 30:1, 40:1, 50:1, 100:1, 200:1, и/или 300:1, и/или менее 1000:1.

В плоскости саморасстановки, показанной на фиг. 11, уменьшенные в поперечном направлении стороны 770а тепловыделяющих элементов 730, 740 соприкасаются с кожухом 750, чтобы способствовать саморасстановке тепловыделяющих элементов 20, 730, 740.

На фиг. 12 изображено поперечное сечение тепловыделяющей сборки 710, показанным в плоскости, которая располагается в осевом направлении (например, по удлиненному измерению тепловыделяющей сборки 710) на половине расстояния между двумя плоскостями саморасстановки. В этой плоскости с тепловыделяющих элементов 730, 740 не была удалена ни одна из оболочек 770, поскольку лепестки тепловыделяющих элементов 730, 740 располагаются на достаточном расстоянии от кожуха 750, таком, что тепловыделяющие элементы 730, 740 оказываются хорошо подходящими без необходимости в удалении материала 770b при таком осевом расположении тепловыделяющих элементов 730, 740.

Хотя тепловыделяющие элементы 730, 740 и тепловыделяющая сборка 710 иллюстрируются как предназначенные для применения в реакторе, использующем тепловыделяющую сборку с квадратной сеточной структурой 17 на 17 и определенным рисунком размещения в ней направляющих труб, данная тепловыделяющая сборка 710 и тепловыделяющие элементы 20, 730, 740 могут в качестве варианта использоваться с реакторами других различных типов (например, реакторами, которые используют сеточные структуры 16 на 16 или 14 на 14, реакторы с гексагональными сеточными структурами тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок). Например, если бы тепловыделяющие элементы 20 не вставлялись бы должным образом в тепловыделяющую сборку, предназначенную для применения в реакторе, сконструированном под гексагональные тепловыделяющие сборки и сеточные структуры, периферийный ряд гексагональной решетки такой тепловыделяющей сборки мог бы содержать такие тепловыделяющие элементы как тепловыделяющие элементы 730, 740, модифицированные так, чтобы их внешняя сторона(ы) была притерта таким образом, чтобы соответствовать данным требуемым габаритам, предпочтительно без необходимости в перемещении положения направляющих труб реактора.

На фиг. 14-20 показана тепловыделяющая сборка 910 согласно одному альтернативному варианту воплощения настоящего изобретения. Согласно различным воплощениям тепловыделяющая сборка 910 предназначена для замены стандартной тепловыделяющей  $UO_2$  сборки в стандартном реакторе при сохранении позиционирования стержней регулирования мощности стандартных реакторов (например, реакторов, находившихся в эксплуатации по состоянию на 2012 г.). Тепловыделяющая сборка 910 может быть в целом подобной или идентичной тепловыделяющей сборке 610 за исключением того, что (1) все тепловыделяющие элементы 920a, 920b, 920c, 920d тепловыделяющей сборки 910 предпочтительно геометрически идентичны друг другу; (2) из периферийного ряда удалены четыре тепловыделяющих элемента; (3) осевые линии 920a' тепловыделяющих элементов 920a в неугловом периферийном ряду сдвинуты внутрь, чтобы образовать равносторонние треугольники с осью 920a' соседнего неуглового периферийного тепловыделяющего элемента(ов) 920a и осевой линией(ми) 920c' наиболее удаленного непериферийного ряда тепловыделяющего элемента(ов) 920c; и (4) осевая линия 920b' углового периферийного тепловыделяющего элемента 920b смещена внутрь относительно тепловыделяющих элементов 740, 650 тепловыделяющих сборок 610, 710.

Как показано на фиг. 14, все тепловыделяющие элементы 920, 920a, 920b, 920c могут быть геометрически идентичными друг другу и все могут содержать тепловыделяющие элементы 20, как указывалось выше. Однако нагрузка расщепляющегося материала в различных тепловыделяющих элементах 920, 920a, 920b, 920c может быть различной (например, чтобы выровнять тепловую нагрузку, создающуюся по тепловыделяющей сборке 910). Все тепловыделяющие элементы 920a, 920b, 920c, 920d имеют одинаковый диаметр описанной окружности (например, 12,6 мм).

Согласно альтернативным воплощениям тепловыделяющие элементы 920a, 920b, 920c, 920d не являются геометрически идентичными друг другу.

Посредством смещения внешнего периферийного ряда/подгруппы тепловыделяющих элементов 920a, 920b в поперечном направлении внутрь обеспечивается достаточное пространство для того, чтобы могли применяться тепловыделяющие элементы 920a, 920b, 920c, 920d с диаметром описанной окружности, который является таким же, как и расстояние между осевыми линиями тепловыделяющих элементов 920a, 920b, 920c, 920d, соответствуя при этом габаритным размерам пространства, предоставляемого в обсуждавшихся выше стандартных реакторах.

Как показано на фиг. 14, центральная квадратная структура 15 на 15 из узлов сетки для центральных тепловыделяющих элементов 920c, 920d и направляющих труб 40 соответствует центральной квадратной структуре 15 на 15 и положениям стандартных тепловыделяющих сборок для реактора.

Внешний периферийный ряд тепловыделяющих элементов 920a, 920c смещен в поперечном направлении внутрь по направлению к центру тепловыделяющей сборки 910. Смещение внутрь способствует лучшему введению сборки 910 в реакторы одного или нескольких существующих типов (например, реакторы, применяющие дизайн тепловыделяющей сборки Westinghouse, в которой используется матрица из  $UO_2$  стержней 17 на 17) без корректировки позиций размещения стержней регулирования мощности/направляющих труб 40 приводных механизмов стержней регулирования мощности или габаритов тепловыделяющей сборки.

В воплощении, иллюстрируемом на фиг. 16, тепловыделяющие элементы 920a с описанной окружностью диаметром в 12,6 мм смещены в поперечном направлении внутрь таким образом, что межцентровое расстояние между осями 920a' тепловыделяющих элементов 920a и осями 920c' тепловыделяющих элементов 920c, представленное в виде проекции в направлении рядов и колонок центральной сеточной

структуры 15 на 15, смещается примерно на 10,9 мм. Если бы тепловыделяющие элементы 920а сохраняли позиции стандартной сеточной структуры 17 на 17, такое смещение составило бы 12,6 мм, а не 10,9 мм. Сдвиг тепловыделяющих элементов 920а внутрь приводит к общей ширине ряда или колонки, составляющей около 211 мм (всего 15 шагов по 12,6 мм плюс 2 шага по 10,9 мм), что находится в пределах составляющих около 211 мм габаритных размеров ряда и колонки внутри кожуха 940. При добавлении толщины кожуха 940 общая ширина ряда и колонки тепловыделяющей сборки 910 соответствует 214 мм габаритам, обеспечиваемым модельным стандартным реактором, для введения в который разработана тепловыделяющая сборка 910.

По сравнению со стандартной тепловыделяющей сборкой из внешнего периферийного ряда/кольца исключаются четыре тепловыделяющих элемента для того, чтобы упростить сдвиг внутрь тепловыделяющих элементов 920а, 920b. В воплощении, иллюстрируемом на фиг. 14, внешний периферийный ряд/кольцо тепловыделяющих элементов включает 56 тепловыделяющих элементов 920а и 4 тепловыделяющих элемента 920b, давая в сумме 60 тепловыделяющих элементов. Для справки: стандартные тепловыделяющие сборки 17 на 17 включали бы 64 тепловыделяющих элемента в узлах сетки по внешнему периферийному ряду/кольцу.

Как показано на фиг. 15, центральные осевые линии 920с' тепловыделяющих элементов 920с в ряду, следующем за периферийным, и центральные осевые линии 920а' неугловых тепловыделяющих элементов 920а периферийного ряда образуют равносторонние треугольники, в которых расстояния между центрами равны диаметру окружности, описывающей тепловыделяющие элементы 920а, 920с.

Как показано на фиг. 15-18, тепловыделяющие элементы 920а, 920с и кожух 940 имеют ряд различных частичных плоскостей саморасстановки в различных осевых положениях по тепловыделяющей сборке 910. В поперечном сечении, показанном на фиг. 15 и 16, тепловыделяющие элементы 920а примыкают и самопроизвольно размещаются друг относительно друга и кожуха 940. В поперечных сечениях, показанных на фиг. 17 и 18, каждый тепловыделяющий элемент 920а примыкает и достигает состояния самопроизвольной расстановки с одним из тепловыделяющих элементов 920с. Всего, как видно из показанной на фиг. 15 ориентации, каждый тепловыделяющий элемент 920а имеет точку достижения самопроизвольной расстановки при 0° относительно кожуха 940 (показано на фиг. 15); 90° и 270° относительно соседних тепловыделяющих элементов 920а (показано на фиг. 15); 150° относительно одного внутреннего тепловыделяющего элемента 920с (показано на фиг. 18); 210° относительно другого внутреннего тепловыделяющего элемента 920с (показано на фиг. 17). Эта комбинация частичных плоскостей саморасстановки объединяется для обеспечения надлежащего самопроизвольного размещения тепловыделяющих элементов 920а.

Как показано на фиг. 14 и 15, множество тепловыделяющих элементов 920, 920а, 920с расположено в смешанной сеточной структуре, которая содержит (1) первую сеточную структуру (центральная группа 15 на 15 тепловыделяющих элементов 920с, 920d), созданную из располагающихся под прямым углом рядов и колонок, имеющих расстояние между осевыми линиями рядов и колонок, равняющееся общему для тепловыделяющих элементов 920а, 920b, 920с, 920d диаметру D описанной окружности, и (2) вторую сеточную структуру (два внешних периферийных ряда, составленные из тепловыделяющих элементов 920а, 920с), созданную из равносторонних треугольников, у которых длина каждой стороны каждого треугольника (то есть расстояние между осевыми линиями соседних тепловыделяющих элементов, представляющих углы каждого треугольника) является диаметром D описанной окружности, общим для тепловыделяющих элементов 920а, 920b, 920с, 920d. Таким образом, вторая/треугольная сеточная структура отличается от первой/квадратной сеточной структуры. Согласно альтернативным воплощениям, без отступления от объема настоящего изобретения могут также использоваться дополнительные и/или альтернативные сеточные структуры (например, прямоугольные сеточные структуры, изометрические треугольные структуры, структуры в виде параллелограммов, другие регулярные повторяющиеся структуры).

Тепловыделяющие элементы 920а, 920b, 920с, 920d включают неперекрывающиеся первую (тепловыделяющие элементы 920d), вторую (тепловыделяющие элементы 920а), третью (тепловыделяющие элементы 920с) и четвертую (тепловыделяющие элементы 920b) подгруппу. Первая подгруппа (тепловыделяющие элементы 920d) располагается в соответствующих узлах сетки, ограничиваемых первой/квадратной сеточной структурой. Вторая подгруппа (тепловыделяющие элементы 920а) располагается в соответствующих узлах сетки, ограничиваемых второй/треугольной сеточной структурой. Третья подгруппа (тепловыделяющие элементы 920с) располагается в соответствующих перекрывающихся узлах сетки таким образом, что каждый попадает и в первую/квадратную сеточную структуру и во вторую/треугольную сеточную структуру. Четвертая подгруппа (тепловыделяющие элементы 920b) не размещается ни в каких узлах сетки, ограничиваемых первой или второй сеточной структурой.

Как показано на фиг. 19, угловые периферийные тепловыделяющие элементы 920b имеют расстояние между осевой линией 920b и осевой линией 920с', представленное в виде проекции в направлении рядов и колонок, около 8,9 мм. Как показано на фиг. 20, для тепловыделяющего элемента 920b с диаметром описанной окружности, равным 12,6 мм, это обеспечивает частичную плоскость саморасстановки между тепловыделяющим элементом 920b и соседним внутренним тепловыделяющим элементом 920с в

положении тепловыделяющего элемента 920b под углом 225°. Как показано на фиг. 19, угол кожуха 940 может быть сформован так, чтобы обеспечить частичную плоскость двухточечной саморасстановки между тепловыделяющим элементом 920c и кожухом 940 с положениями тепловыделяющего элемента 920b под углами около 0 и 90°. Эта комбинация частичных плоскостей саморасстановки объединяется для обеспечения надлежащего самопроизвольного размещения тепловыделяющих элементов 920b.

При том, что в отношении тепловыделяющей сборки 910 описываются различные модельные показатели диаметров, межцентрового расстояния, шага сети и других измерений, эти модельные величины не являются ограничивающими. Наоборот, среднему специалисту в данной области понятно, что без отступления от объема настоящего изобретения может применяться множество альтернативных величин.

На фиг. 21 показана тепловыделяющая сборка 1010, которая в целом является подобной тепловыделяющей сборке 910 за исключением того, что в ней исключены или заменены направляющими трубами 1020, 1030 четыре внешних угловых тепловыделяющих элемента 920b, присутствующих в тепловыделяющей сборке 910.

На фиг. 22-38 изображены различные воплощения тепловыделяющихборок 1110, 1210, 1310, 1410, 1510, 1610, 1710, 1810, 1910, 2010, которые могут использоваться вместо обычных/стандартных тепловыделяющихборок 16×16, относящихся к описанному на фиг. 39-44 типу. Различные воплощения этихборок 1110, 1210, 1310, 1410, 1510, 1610, 1710, 1810, 1910, 2010 разработаны для замены стандартной UO<sub>2</sub> тепловыделяющей сборки 16×16 производства Combustion Engineering (CE) в стандартном легководном реакторе, PWR при сохранении позиционирования стержней регулирования мощности стандартных реакторов CE (например, реакторов, находившихся в эксплуатации по состоянию на 2012 г.).

На фиг. 22 показана тепловыделяющая сборка 1110 согласно одному альтернативному воплощению, которое касается конструкции тепловыделяющей сборки 16×16. Сборка 1110 содержит 236 тепловыделяющих элементов 1120, которые могут быть подобными или идентичными обсуждавшимся выше элементам 20, вследствие чего повторное обсуждение общих аспектов элементов 20, 1120 опускается.

Согласно различным воплощениям все тепловыделяющие элементы 1120 из тепловыделяющей сборки 1110 геометрически идентичны друг другу. В реакторном пространстве, доступном для сборки 1110, которая заменяет стандартную сборку 16×16 (например, описанную на фиг. 39-44), есть относительно большой исходный водяной зазор между соседними тепловыделяющими сборками (например, 5,3 мм) с шагом тепловыделяющей сборки 207,8 мм. В результате согласно различным воплощениям сборка 1110 может содержать идентичные или по существу идентичные тепловыделяющие элементы 1120, располагающиеся в форме квадратной матрицы/расстановки во всех 16 рядах без изменения существующего позиционирования стандартно расположенных направляющих труб и сохраняя существующий шаг от стержня к стержню, например 0,506 дюйма (12,852 мм). Согласно различным воплощениям сборка 1110 включает кожух 1130, который в целом является подобным кожуху 940, но размер которого приспособлен под тепловыделяющую сборку 16×16.

Согласно различным воплощениям толщина кожуха составляет между 0,1 и 2,0 мм, между 0,2 и 0,8 мм, между 0,3 и 0,7 мм и/или приблизительно 0,48 мм. Относительно тонкий кожух 1130 обеспечивает достаточные промежутки для размещения тепловыделяющих элементов 1120 и водяного зазора, оставаясь подходящим образом адаптированным для эксплуатации в условиях замены стандартных 16×16 тепловыделяющихборок. Согласно одному или нескольким воплощениям сборка 1110 вписывается в размеры реактора, который допускает максимальные габариты/ширину тепловыделяющей сборки в 8,134 дюймов (206,6 мм) с водяным зазором 1,2 мм. Например, согласно одному или нескольким таким воплощениям, в которых шаг и ширина тепловыделяющего элемента составляют 12,852 мм, а кожух 1130 имеет толщину 0,48 мм, ширина тепловыделяющей сборки 1110 равна 206,95 мм ((12,852 мм/элемент × 16 элементов) + (2×0,48 мм/стенка кожуха)), что соответствует габариту в 206,6 мм.

Как показано на фиг. 22, сборка 1110 включает пять направляющих труб 1140 для стержней регулирования мощности. Как показано на фиг. 23, каждая направляющая труба 1140 содержит внутренний участок 1140a направляющей трубы и участок 1140b внешнего распорного кольца. Внутренний и внешний участки 1140a, 1140b могут быть образованы в виде единого целого или же они могут быть изготовлены отдельно и соединены друг с другом. Согласно различным воплощениям внутренний диаметр внутреннего участка направляющей трубы 1140a является немного большим, чем наружный диаметр трубы стержня регулирования мощности, которая будет в нее вставляться. Например, согласно различным воплощениям, внутренний диаметр внутреннего участка 1140a направляющей трубы составляет около 0,9 дюймов (2,29 см) и конфигурируется так, чтобы вмещать стержень регулирования мощности, который имеет наружный диаметр 0,816 дюймов (2,07 см) и содержит выгорающий материал абсорбера/поглотителя (например, имеющий диаметр 0,737 дюймов (1,87 см)).

Как показано на фиг. 23, внешний участок 1140b распорного кольца имеет наружный диаметр, который примыкает к окружностям (показанным на фиг. 23), ограничиваемым наружным диаметром тепловыделяющих элементов 1120 и ограничивающим внешние размеры тепловыделяющих элементов 1120 по виткам спирали тепловыделяющих элементов 1120. Например, в одном воплощении, в котором тепловыделяющие элементы 1120 имеют наружный диаметр 0,506 дюймов (1,29 см) и направляющие трубы

1140 имеют наружный диаметр 1,094 дюймов (2,78 см), такие описанные окружности имеют диаметр 0,506 дюймов (1,29 см) и центрируются в положениях осевых линий сетки/позициях расстановки тепловыделяющих элементов 1120. Соответственно восемь тепловыделяющих элементов 1120 в рядах и колонках, смежных с направляющей трубой 1140, примыкают к направляющей трубе 1140 в различных положениях по осевой длине каждого тепловыделяющего элемента 1120 (например, по одной точке контакта тепловыделяющего элемента с направляющей трубой для каждого из четырех ребер по каждому полному обороту в  $360^\circ$  тепловыделяющего элемента 1120). На фиг. 24 и 25 показаны поперечные сечения, в которых к направляющей трубе 1140 примыкают различные комбинации четырех смежных тепловыделяющих элементов 1120. Если иллюстрируемое на фиг. 23 поперечное сечение рассматривать как начальное, или положение под углом в  $0^\circ$ , то фиг. 24 иллюстрирует поперечное сечение в плоскости, в которой тепловыделяющие элементы 1120 повернуты/закручены по часовой стрелке примерно на  $18^\circ$  (то есть в плоскости, которая смещена от плоскости начального/ $0^\circ$  положения примерно на  $1/20$  полного оборота элемента 1120 на  $360^\circ$ ). Аналогичным образом фиг. 25 иллюстрирует поперечное сечение, которое является смещенным от плоскости начального/ $0^\circ$  положения с поворотом элементов 1120 на  $72^\circ$  и на около  $1/5$  полного оборота элемента 120 на  $360^\circ$ .

На фиг. 26-30 показана тепловыделяющая сборка 1210 согласно одному альтернативному варианту воплощения. Сборка 1210 содержит центральную  $14 \times 14$  группу тепловыделяющих элементов 1220c, 1220d и направляющие трубы 1240, которые являются подобными или идентичными по позиции, форме и структуре центральной  $14 \times 14$  группе тепловыделяющих элементов 1120 и направляющим трубам 1140 из сборки 1110. Однако количество и позиции тепловыделяющих элементов 1220a, расположенных в сборке 1210 в наиболее удаленном периферийном кольце (то есть в рядах 1 и 16 и колонках 1 и 16), отличаются от таковых в сборке 1110. Вместо упорядочивания в узлах сетки внутри квадратной матрицы  $16 \times 16$  внешнего периферийного кольца из тепловыделяющих элементов 1220 тепловыделяющие элементы 1220a располагаются так, чтобы образовывать равносторонние треугольники с тепловыделяющими элементами 1220c таким же образом, как описано выше для сопоставимой  $17 \times 17$  тепловыделяющей сборки 910. Так же, как и в сборке 910, что лучше всего иллюстрируется на фиг. 30, сборка 1210 включает угловые тепловыделяющие элементы 1220b и кожух 1230, которые располагаются относительно других тепловыделяющих элементов таким образом, что тепловыделяющие элементы 1220b соприкасаются с кожухом 1230 по меньшей мере в двух различных положениях (или по непрерывной дуге) и касаются угла одного из тепловыделяющих элементов 1220c с обеспечением трех точек контакта для сохранения тепловыделяющих элементов 1220b в их надлежащих положениях.

Как показано на фиг. 26, все тепловыделяющие элементы 1220a, b, c, d могут быть идентичными или по существу идентичными друг другу согласно различным неограничивающим воплощениям и могут быть идентичными или по существу идентичными тепловыделяющим элементам 20. Как показано на фиг. 26, согласно различным воплощениям сборка 1210 содержит 232 тепловыделяющих элемента 1220a, b, c, d.

Если иллюстрируемую на фиг. 27 плоскость поперечного сечения рассматривать в качестве начальной, обеспечиваемой под углом  $0^\circ$  плоскостью, поперечное сечение, иллюстрируемое на фиг. 28, соответствует поперечной плоскости, смещенной от начальной/ $0^\circ$  плоскости по шагу винта в элементах 1220 на  $30^\circ$  (то есть на  $1/12$  полного  $360^\circ$  оборота элементов 1220). Аналогичным образом, фиг. 29 соответствует плоскости поперечного сечения, которая является смещенной от плоскости начального/ $0^\circ$  положения на  $60^\circ$  шага винта элементов 1220 (то есть на  $1/6$  полного оборота элементов 1220 на  $360^\circ$ ). Аналогичным образом фиг. 30 соответствует плоскости поперечного сечения, которая является смещенной от плоскости начального/ $0^\circ$  положения на  $45^\circ$  шага винта элементов 1220 (то есть на  $1/8$  полного оборота элементов 1220).

Согласно различным воплощениям применение треугольной решетки по внешнему периметру сборки 1210 способствует использованию (а) более толстого, более прочного кожуха 1230, чем возможно согласно различным воплощениям, в которых все элементы располагаются в квадратной  $16 \times 16$  решетке/матрице (например, одно или несколько воплощений сборки 1110, иллюстрируемой на фиг. 22), и/или (b) большего водяного зазора. Согласно различным воплощениям толщина кожуха 1230 составляет между 0,4 и 4 мм, между 0,4 и 3 мм, между 0,5 и 2,5 мм, между 1 и 2 мм и/или около 2 мм.

Согласно различным воплощениям все тепловыделяющие элементы 1220a, b, c, d тепловыделяющей сборки 1210 геометрически идентичны друг другу и могут быть идентичными или по существу идентичными элементам 20.

На фиг. 31 показана тепловыделяющая сборка 1310, которая является в целом идентичной тепловыделяющей сборке 1210 за исключением расположенной снаружи и присоединенной к кожуху 1230 угловой конструкции 1350. Как показано на фиг. 31, угловая конструкция 1350 имеет форму поперечного сечения, которая в целом следует за изгибом контура угла кожуха 1230 и вписывается в квадрат, который был бы ограничен кожухом 1230, если бы углы кожуха 1230 не были искривлены.

Согласно различным воплощениям угловая конструкция 1350 продолжается по полной осевой длине тепловыделяющей сборки 1310 (или полной осевой длине тепловыделяющих элементов 1220, и/или кожуха 1230). В качестве варианта угловая конструкция 1350 может быть в осевом направлении короче,

чем сборка 1310, кожух 1230 и/или тепловыделяющие элементы 1220 (включая тепловыделяющие элементы 1220a, b, c и d). Угловая конструкция 1350 может сохранять иллюстрируемую на фиг. 31 форму поперечного сечения по всей ее осевой длине, или же форма поперечного сечения может изменяться по осевой длине угловой конструкции 1350.

Применение угловой конструкции 1350 может позволить тепловыделяющей сборке 1310 воспользоваться преимуществом использования доступного пространства вне кожуха 1230.

На фиг. 32 показана тепловыделяющая сборка 1410, которая является, по существу, подобной тепловыделяющей сборке 1310, за исключением того, что угловая конструкция 1450 сборки 1410 располагается внутри кожуха 1430 сборки 1410, в отличие от внешней стороны кожуха 1230, что демонстрируется в отношении сборки 1310. Угловая конструкция 1450 прикреплена к внутреннему углу кожуха 1430. Кожух 1430 в целом подобен кожуху 1230, за исключением того, что кожух 1430 имеет более острые углы (то есть менее изогнутые/закругленные), чем у кожуха 1230.

Как показано на фиг. 32, внутренний контур угловой конструкции 1450 является частично-цилиндрическим, чтобы примыкать к тепловыделяющему элементу 1220b во множестве мест (или непрерывно по дуге, ограниченной частичным цилиндром). Согласно различным воплощениям форма частичного цилиндра покрывает дугу около 90° и имеет радиус, который соответствует радиусу тепловыделяющего элемента 1220b, для удержания тепловыделяющего элемента 1220b в его правильном положении.

Применение угловой конструкции 1450 позволяет тепловыделяющей сборке 1310 воспользоваться преимуществом использования доступного пространства внутри одного или нескольких углов кожуха 1430.

На фиг. 33 показана тепловыделяющая сборка 1510, которая является, по существу, подобной тепловыделяющей сборке 1410, за исключением того, что частично-цилиндрическая внутренняя поверхность угловой конструкции 1550 в сборке 1410 продолжается по большей дуге, чем угловая конструкция 1450 из сборки 1410. Согласно различным воплощениям дуга находится между 90 и 310°, между 120 и 310°, между 150 и 310°, между 180 и 310° и/или около 270°. Как показано на фиг. 33, согласно различным воплощениям угловая конструкция 1450 также примыкает к соседним тепловыделяющим элементам 1220a, чтобы удерживать тепловыделяющие элементы 1220a в их правильных положениях.

Применение угловой конструкции 1550 может позволить тепловыделяющей сборке 1510 воспользоваться преимуществом использования доступного пространства внутри одного или нескольких углов кожуха 1430.

На фиг. 34 показана тепловыделяющая сборка 1610, которая является, по существу, подобной тепловыделяющей сборке 1510, за исключением того, что угловые тепловыделяющие элементы по внешнему периметру исключаются полностью (например, исключается тепловыделяющий элемент 1220b, присутствующий в сборке 1510), а угловая конструкция 1650 расширена так, чтобы занимать место, которое в ином случае было бы занято таким угловым тепловыделяющим элементом 1220b. Как показано на фиг. 34, угловая конструкция 1650 примыкает к двум соседним тепловыделяющим элементам 1220a и соседнему тепловыделяющему элементу 1220c для удержания этих трех элементов 1220a и c в их правильных положениях.

Применение угловой конструкции 1650 может позволить тепловыделяющей сборке 1610 воспользоваться преимуществом использования доступного пространства внутри одного или нескольких углов кожуха 1430.

На фиг. 35 показана тепловыделяющая сборка 1710, которая является, по существу, подобной тепловыделяющей сборке 1210 за исключением того, что угловой тепловыделяющий элемент 1220b сборки 1210 заменен угловой конструкцией 1750. Согласно различным воплощениям структура 1750 является трубчатой и имеет такой диаметр (например, 15 мм), который заставляет ее примыкать во множестве точек к кожуху 1230 и угловому тепловыделяющему элементу 1220c для удержания углового тепловыделяющего элемента 1220c в его правильном положении. Угловая конструкция 1750 может содержать трубу, на которую навит по спирали такой материал как провод, который присоединен к трубе (например, посредством сварки) так, чтобы угловая конструкция удерживала соседние тепловыделяющие элементы в их правильном положении способом, аналогичным или подобным тому, которым это обеспечивает спиральная закрутка смежных тепловыделяющих элементов, что обсуждалось выше.

Применение угловой конструкции 1750 может позволить тепловыделяющей сборке 1710 воспользоваться преимуществом использования доступного пространства внутри одного или нескольких углов кожуха 1230.

На фиг. 36 показана тепловыделяющая сборка 1810, которая является, по существу, подобной тепловыделяющей сборке 1610, за исключением того, что угловая конструкция 1850 имеет три вогнутые, частично цилиндрической формы поверхности, каждая из которых примыкает к смежным тепловыделяющим элементам 1220a и смежному угловому тепловыделяющему элементу 1220c. Радиус и положение трех вогнутых, частично цилиндрической формы поверхностей соответствуют радиусам и положениям соответствующих тепловыделяющих элементов 1220a, 1220c таким образом, что угловая конструк-

ция 1810 примыкает к тепловыделяющим элементам 1220а, 1220с по вытянутым дугам А, В, С. Вытянутые дуги А, В, С контакта удерживают примыкающие тепловыделяющие элементы 1220а, 1220с в их правильных положениях.

Как показано на фиг. 36, угловая конструкция 1850 может ограничивать угол кожуха 1830. Например, кожух 1830 может содержать пластины 1830а, концы которых соединяются с угловыми конструкциями 1850. В качестве варианта кожух 1830 может быть подобным или идентичным кожуху 1230, а угловая конструкция 1850 может располагаться внутри и быть прикрепленной к кожуху 1830.

Применение угловой конструкции 1850 может позволить тепловыделяющей сборке 1810 воспользоваться преимуществом использования доступного пространства внутри одного или нескольких углов сборки 1810.

Согласно различным воплощениям угловая конструкция 1350, 1450, 1550, 1650, 1750, 1850 располагается в каждом из четырех углов тепловыделяющей сборки 1310, 1410, 1510, 1610, 1710, 1810. Однако согласно альтернативным воплощениям угловая конструкция 1350, 1450, 1550, 1650, 1750, 1850 может располагаться только в одном, двух и/или трех из четырех углов сборки 1310, 1410, 1510, 1610, 1710, 1810.

Согласно различным воплощениям угловая конструкция 1350, 1450, 1550, 1650, 1750, 1850 может содержать одно или несколько из выгорающего поглотителя, стали, сплавов или керамики из циркония, и/или урана, и/или плутония, и/или тория, и/или ни один из этих материалов.

Согласно различным воплощениям угловая конструкция 1350, 1450, 1550, 1650, 1750, 1850 может быть сплошной. Согласно различным воплощениям угловая конструкция 1350, 1450, 1550, 1650, 1750, 1850 может содержать полую структуру (например, изготовленную из трубчатой стали и/или металлического циркония или сплавов), которая может быть (1) открытой и полый для пропускания через нее потока, (2) с закрытыми концами и пустой и/или (3) закрытой и частично или полностью заполненный материалом (например, оксидным топливом, выгорающим поглотителем и т.д. в таблеточной или другой форме).

Хотя угловые конструкции 1350, 1450, 1550, 1650, 1750, 1850 и соответствующие кожухи 1230, 1430, 1830 иллюстрируются применительно к тепловыделяющим сборкам 1310, 1410, 1510, 1610, 1710, 1810, которые предназначены для применения вместо стандартных 16×16 тепловыделяющих сборок, такие угловые конструкции 1350, 1450, 1550, 1650, 1750, 1850 и соответствующие конфигурации кожуха без отступления от объема настоящего изобретения могут быть в качестве варианта применены к обсуждавшимся выше тепловыделяющим сборкам 910, 1010, которые предназначены для применения вместо стандартных 17×17 тепловыделяющих сборок.

На фиг. 37 показана тепловыделяющая сборка 1910, которая является, по существу, подобной тепловыделяющей сборке 1210, за исключением того, что и наиболее удаленное кольцо тепловыделяющих элементов 1920а, и второе наиболее удаленное кольцо тепловыделяющих элементов 1920b (а не только внешнее кольцо, как в сборке 1210) сдвинуты внутрь сеточной структуры из равносторонних треугольников с третьим наиболее удаленным кольцом элементов 1920с. Третье наиболее удаленное кольцо элементов 1920с и центральная матрица 10×10 из элементов 1920d (вместе с центральной матрицей 12×12 из элементов 1920с, 1920d) упорядочено в квадратной сетке/матрице.

Как показано на фиг. 37, тепловыделяющие элементы исключены из углов наиболее удаленного кольца тепловыделяющих элементов 1920а (то есть исключением четырех тепловыделяющих элементов, относящихся к числу тепловыделяющих элементов в сборке, в которой каждый узел сетки внутри наиболее удаленного кольца занят тепловыделяющим элементом (например, как показано на фиг. 22 в отношении сборки 1110)). Четыре тепловыделяющих элемента аналогичным образом исключены из второго наиболее удаленного кольца элементов 1920b, относящихся к числу тепловыделяющих элементов в сборке, в которой каждый узел сетки внутри второго наиболее удаленного кольца занят тепловыделяющим элементом (например, как иллюстрируется фиг. 22 в отношении сборки 1110)). Остальные тепловыделяющие элементы 1920b' второго наиболее удаленного кольца тепловыделяющих элементов 1920b располагаются в каждом из углов второго наиболее удаленного кольца тепловыделяющих элементов 1920b.

Согласно различным воплощениям могут быть добавлены дистанционирующие устройства и/или угловые конструкции для содействия в поддержании правильных положений тепловыделяющих элементов 1920а, которые являются смежными с углами и тепловыделяющими элементами 1920b'.

Согласно различным воплощениям использование структуры размещения из равносторонних треугольников в двух внешних кольцах элементов (в отличие от только одного кольца, как в сборке на фиг. 26) обеспечивает дополнительное пространство внутри габаритов, доступных для тепловыделяющей сборки 1910. Такое пространство может быть использовано, например, для более толстого кожуха 1930 или большего водяного зазора.

Согласно различным воплощениям все тепловыделяющие элементы тепловыделяющей сборки 1910 геометрически идентичны друг другу и могут быть идентичными или по существу идентичными элементами 20. Как показано на фиг. 37, согласно различным воплощениям сборка 1910 содержит 228 тепловы-

деляющих элементов 1920a, b, b', c, d.

На фиг. 38 показана тепловыделяющая сборка 2010, которая является, по существу, подобной тепловыделяющей сборке 1910, за исключением того, что в наиболее удаленном кольце элементов 2020a применяется единственный угловой тепловыделяющий элемент 2020a' вместо двух таких тепловыделяющих элементов 1920a, которые располагаются смежным к углу образом в сборке 1910, иллюстрируемой на фиг. 37. В результате тепловыделяющая сборка 2010 имеет на четыре тепловыделяющих элемента меньше, чем присутствует в тепловыделяющей сборке 1910. Как показано на фиг. 38, согласно различным воплощениям сборка 2010 содержит 224 тепловыделяющих элемента 2020a, a', b, b', c, d.

Согласно различным воплощениям все тепловыделяющие элементы 2020a, 2020a', 2020b, 2020b', 2020c, 2020d тепловыделяющей сборки 2010 геометрически идентичны друг другу и могут быть идентичными или по существу идентичными элементам 20.

При том, что на различных фигурах иллюстрируются различные геометрические размеры, следует понимать, что такие размеры являются лишь модельными и не ограничивают объем изобретения. Напротив, эти геометрические размеры без отступления от объема изобретения могут быть модифицированы различными путями (быть большими или меньшими, или же качественно отличными).

Тепловыделяющие сборки 10, 510, 610, 710, 910, 1010, 1110, 1210, 1310, 1410, 1510, 1610, 1710, 1810, 1910, 2010 предпочтительно термодинамически спроектированы и физически изготовлены для применения в наземном ядерном энергетическом реакторе 90, 500 (например, в наземных LWRS (включая BWR и PWR), наземных реакторах на быстрых нейтронах, наземных тяжеловодных ядерных реакторах), который предназначается для выработки электричества и/или тепла, используемого для иных, помимо электричества, целей (например, опреснения воды, химической обработки, производства пара и т.д.). Такие наземные ядерные энергетические реакторы 90 включают среди прочих WER, AP-1000, EPR, APR-1400, ABWR, BWR-6, CANDU, BN-600, BN-800, Toshiba 4S, Monju, CE и др. Однако согласно альтернативным воплощениям настоящего изобретения тепловыделяющие сборки 10, 510, 610, 710, 910, 1010, 1110, 1210, 1310, 1410, 1510, 1610, 1710, 1810, 1910, 2010 могут быть предназначены для применения и использоваться в ядерных реакторах морского базирования (например, в судовых или силовых установках подводных лодок, плавучих электростанциях, предназначенных для производства энергии (например, электричества) для берегового применения) или в других применениях ядерных реакторов.

Тепловыделяющие сборки 10, 510, 610, 710, 910, 1010, 1110, 1210, 1310, 1410, 1510, 1610, 1710, 1810, 1910, 2010 и соответствующие активные зоны реакторов проектируются и конструируются таким образом, чтобы тепловыделяющие сборки 10, 510, 610, 710, 910, 1010, 1110, 1210, 1310, 1410, 1510, 1610, 1710, 1810, 1910, 2010 были расположены в непосредственном соседстве с другими тепловыделяющими сборками, имеющими соответствующие геометрические габариты (например, множеством непосредственно соседствующих тепловыделяющих сборок 10, 510, 610, 710, 910, 1010, 1110, 1210, 1310, 1410, 1510, 1610, 1710, 1810, 1910, 2010). Согласно различным воплощениям множество тепловыделяющих сборок 10, 510, 610, 710, 910, 1010, 1110, 1210, 1310, 1410, 1510, 1610, 1710, 1810, 1910, 2010 располагается смежным по отношению друг к другу образом в сеточной структуре тепловыделяющей сборки, ограничиваемой активной зоной реактора (например, в квадратной сетке активной зоны реактора, предназначенной для приема квадратных тепловыделяющих сборок (например, AP-1000, CE), в треугольной/гексагональной структуре для активной зоны реактора, предназначенного для приема гексагональных тепловыделяющих сборок (например, WER)).

Представленные выше воплощения обеспечиваются для иллюстрирования структурных и функциональных принципов настоящего изобретения и не предназначаются для целей ограничения. Напротив, принципы настоящего изобретения предназначаются для охвата любых и всяких изменений, модификаций и/или замен в пределах существа и объема следующей формулы изобретения.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Тепловыделяющая сборка, предназначенная для применения в активной зоне ядерного энергетического реактора и содержащая

каркас, содержащий нижний патрубок, который имеет такую форму и выполнен так, чтобы прикрепляться к внутренней конструкции активной зоны ядерного реактора; и

множество удлиненных тепловыделяющих элементов, поддерживаемых каркасом, причем каждый из указанного множества тепловыделяющих элементов содержит расщепляющийся материал,

при этом каждый из множества удлиненных тепловыделяющих элементов имеет общий диаметр описанной окружности,

причем в поперечном сечении, которое является перпендикулярным осевому направлению тепловыделяющей сборки, множество тепловыделяющих элементов расположено в виде сеточной структуры, которая содержит первую сеточную структуру и вторую сеточную структуру, причем вторая сеточная структура отличается от первой сеточной структуры,

при этом первая сеточная структура содержит квадратную структуру из рядов и колонок, причем расстояние между осевыми линиями для рядов и колонок представляет общий диаметр описанной ок-

ружности,

при этом вторая сеточная структура содержит структуру из равносторонних треугольников, причем длина каждой стороны каждого треугольника является общим диаметром описанной окружности.

2. Тепловыделяющая сборка по п.1, в которой

множество тепловыделяющих элементов включает неперекрывающиеся первую, вторую и третью подгруппы, каждая из которых включает множество тепловыделяющих элементов,

при этом множество тепловыделяющих элементов первой подгруппы расположено в пределах соответствующих узлов сетки, образованных первой сеточной структурой,

множество тепловыделяющих элементов второй подгруппы расположено в пределах соответствующих узлов сетки, образованных второй сеточной структурой,

множество тепловыделяющих элементов третьей подгруппы расположено в пределах соответствующих перекрывающихся узлов сетки, причем перекрывающиеся узлы сетки попадают и в первую сеточную структуру, и во вторую сеточную структуру.

3. Тепловыделяющая сборка по п.1, которая также содержит дополнительные тепловыделяющие элементы, поддерживаемые каркасом, при этом дополнительные тепловыделяющие элементы не расположены ни в одном из узлов сетки, образованных первой или второй сеточной структурой.

4. Тепловыделяющая сборка по п.1, в которой

каркас содержит такой кожух, что все множество тепловыделяющих элементов расположено внутри кожуха,

при этом тепловыделяющая сборка содержит по меньшей мере одну угловую конструкцию, расположенную в углу тепловыделяющей сборки и присоединенную к кожуху.

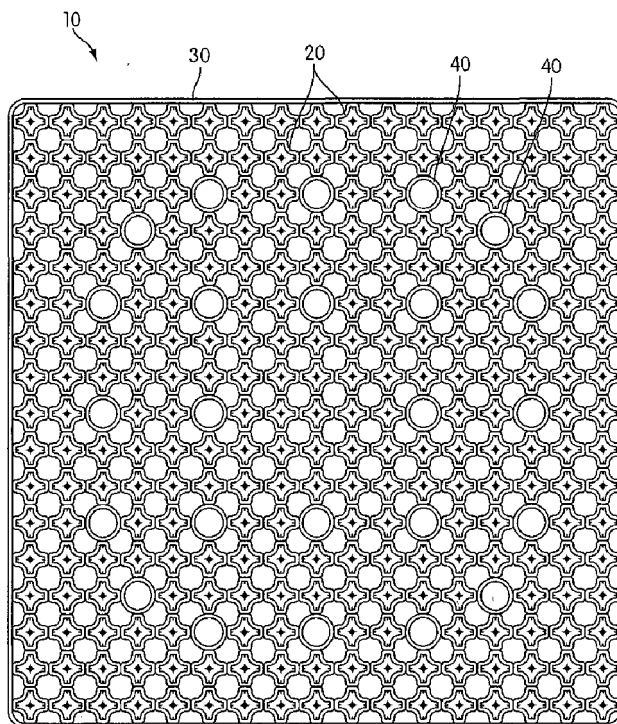
5. Тепловыделяющая сборка по п.4, в которой по меньшей мере одна угловая конструкция содержит выгорающий поглотитель.

6. Тепловыделяющая сборка по п.5, в которой по меньшей мере одна угловая конструкция примыкает по меньшей мере к одному из множества удлиненных тепловыделяющих элементов.

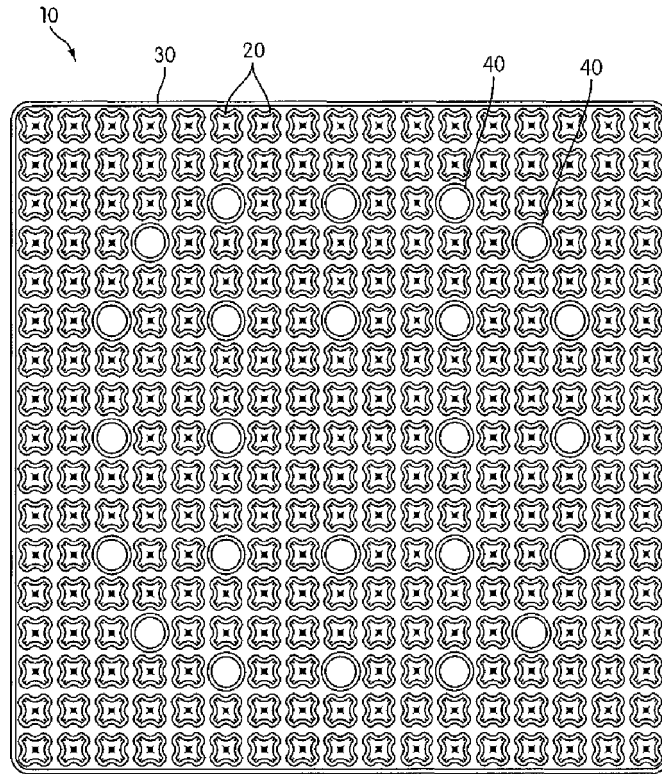
7. Тепловыделяющая сборка по п.1, в которой каждый из множества тепловыделяющих элементов содержит

топливный сердечник, содержащий топливный материал, расположенный в матрице из металлического нетопливного материала, причем топливный материал содержит расщепляющийся материал, и оболочку, окружающую топливный сердечник,

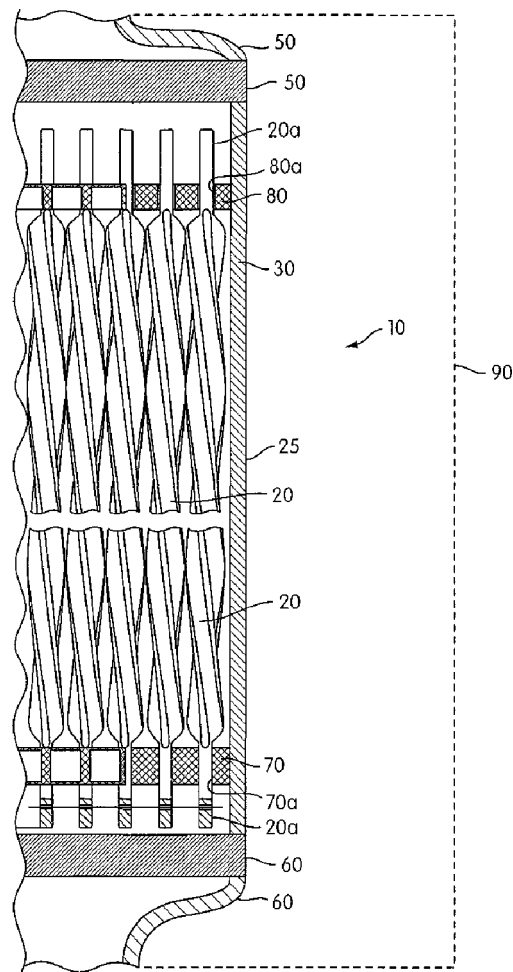
при этом каждый из тепловыделяющих элементов имеет многолепестковый профиль, который образует спиральные ребра.



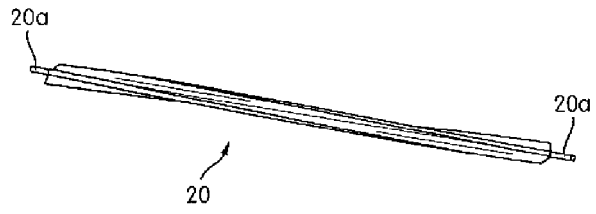
Фиг. 1



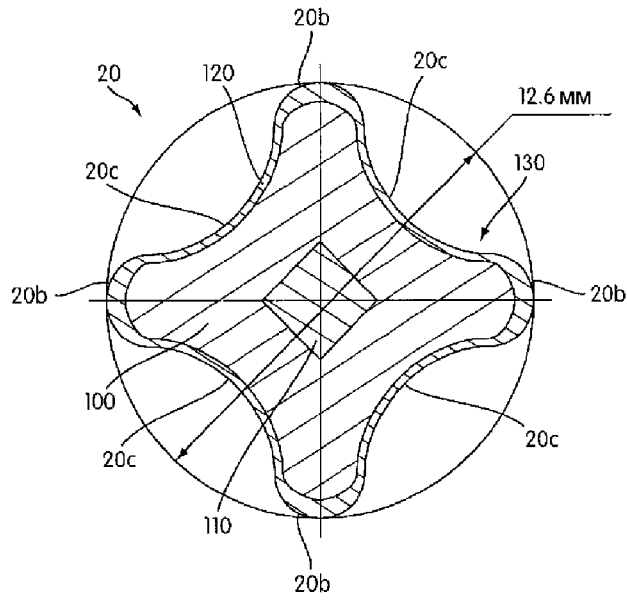
Фиг. 2



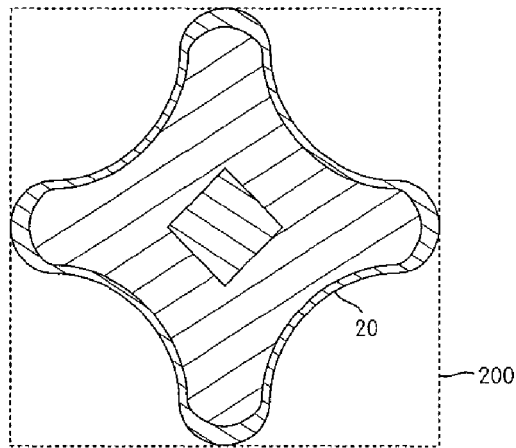
Фиг. 3



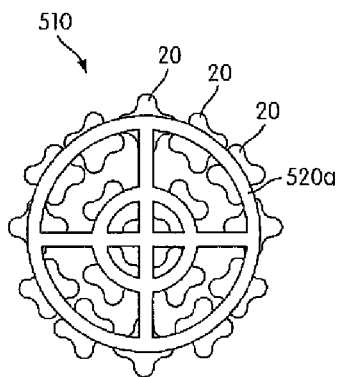
Фиг. 4



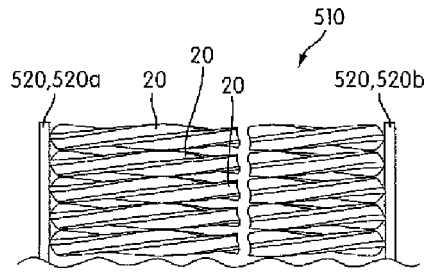
Фиг. 5



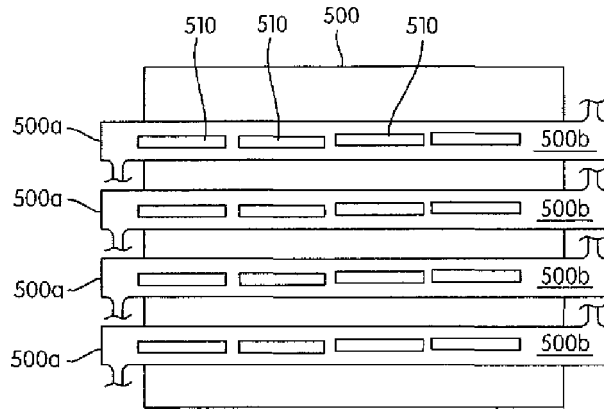
Фиг. 6



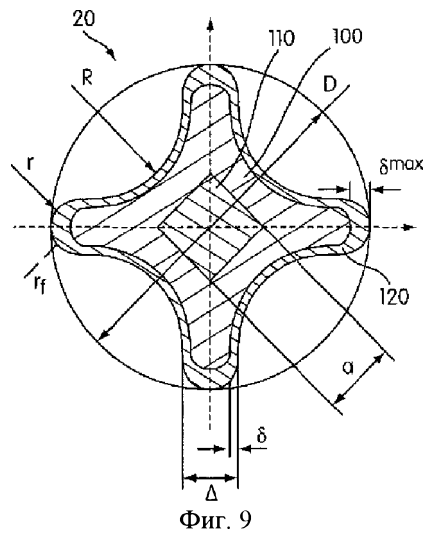
Фиг. 7А



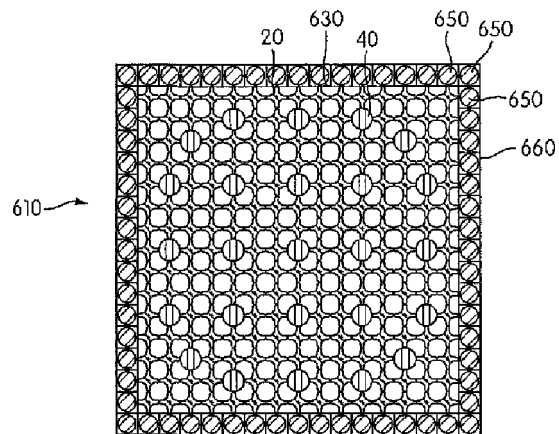
Фиг. 7В



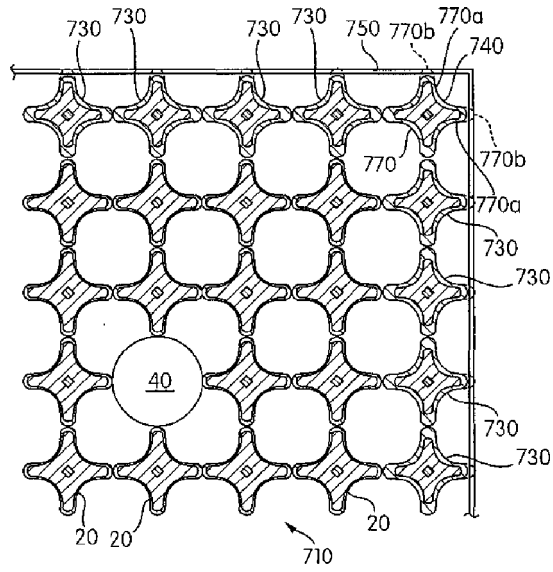
Фиг. 8



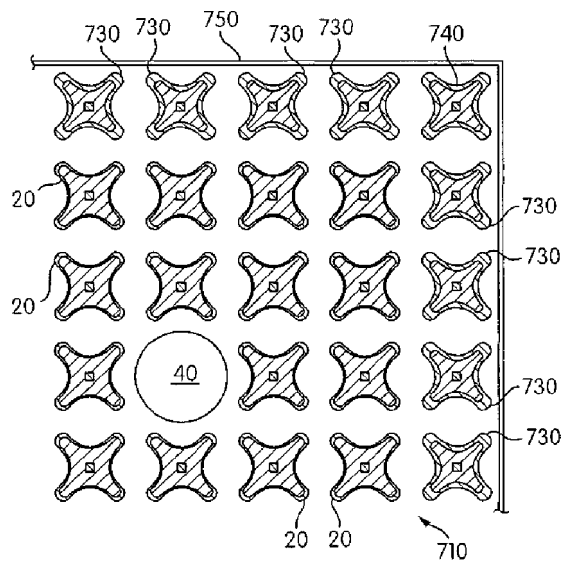
Фиг. 9



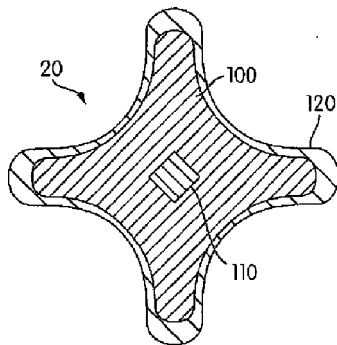
Фиг. 10



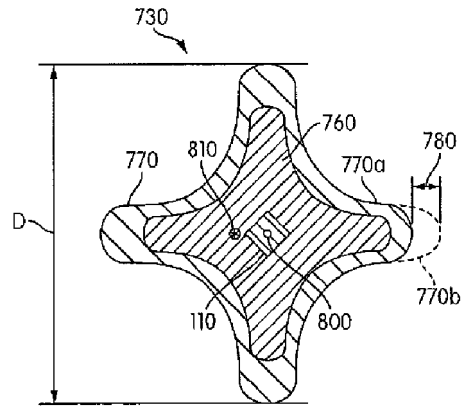
Фиг. 11



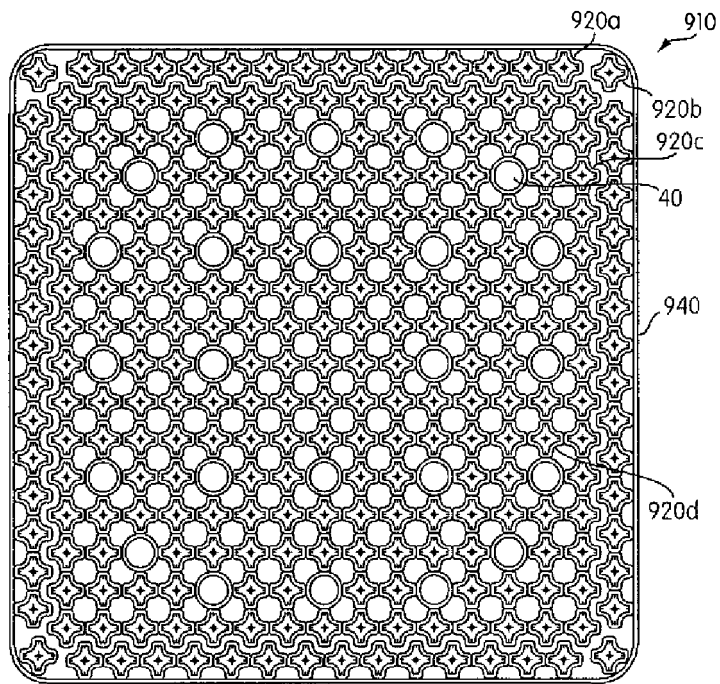
Фиг. 12



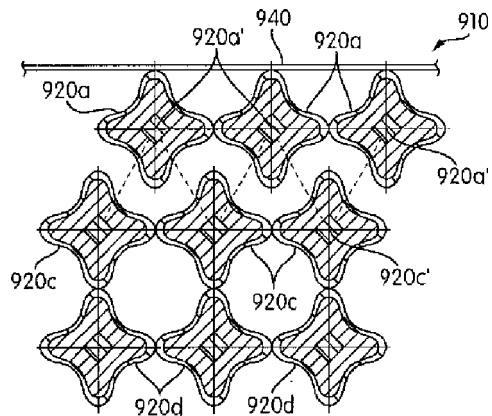
Фиг. 13А



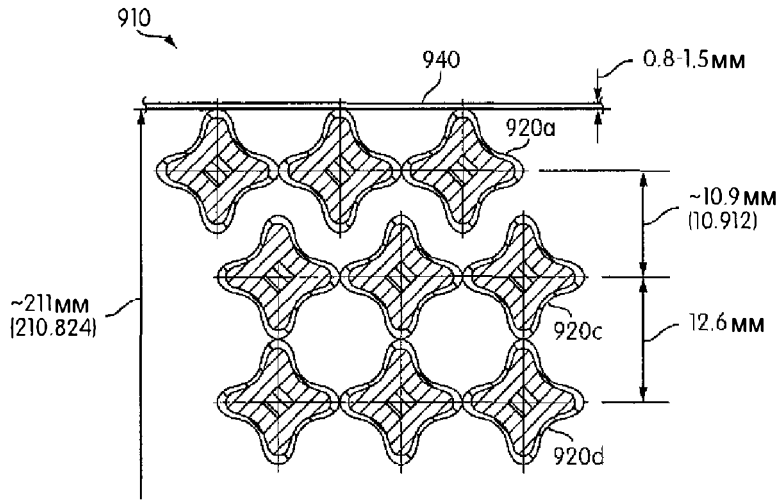
Фиг. 13В



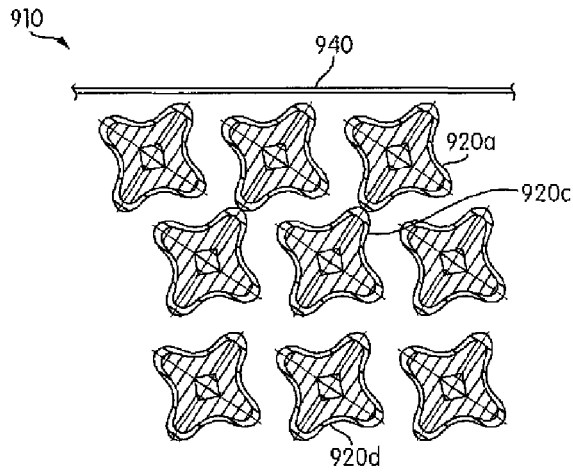
Фиг. 14



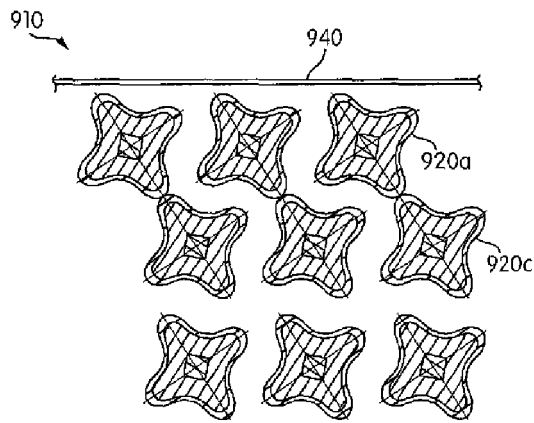
Фиг. 15



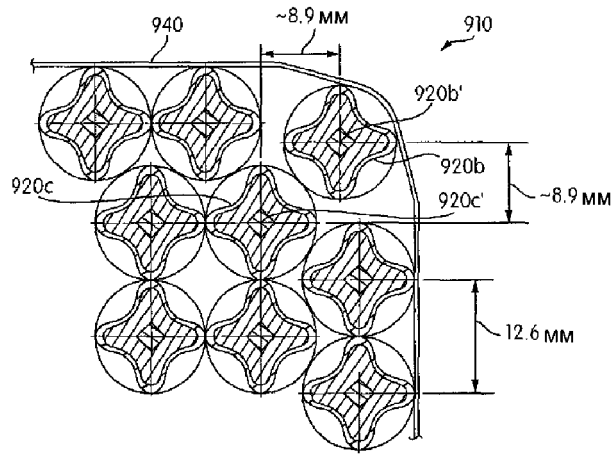
Фиг. 16



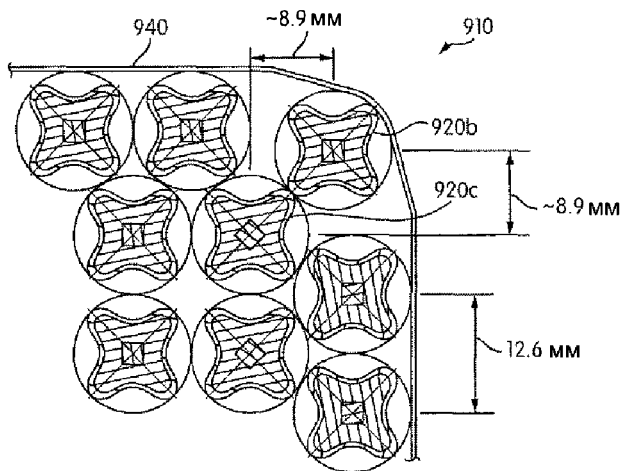
Фиг. 17



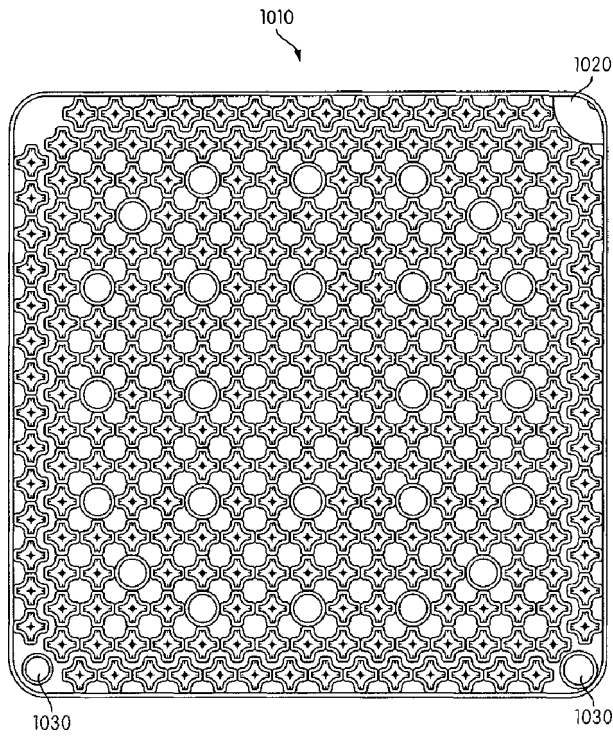
Фиг. 18



Фиг. 19

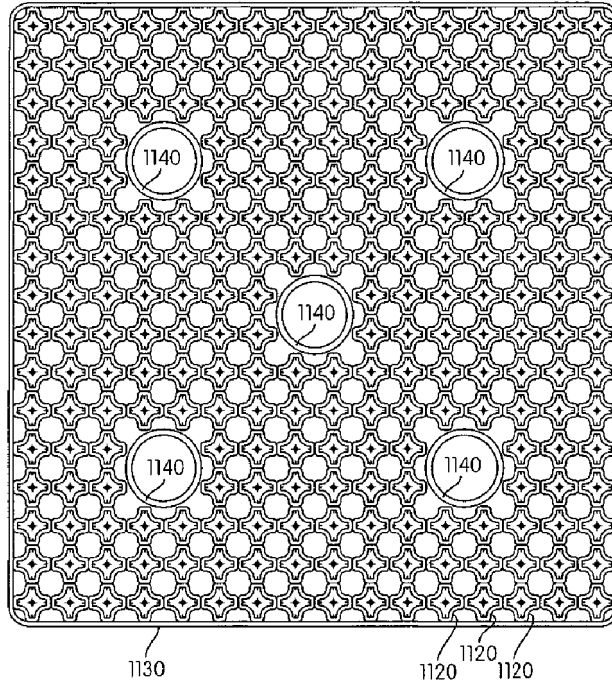


Фиг. 20

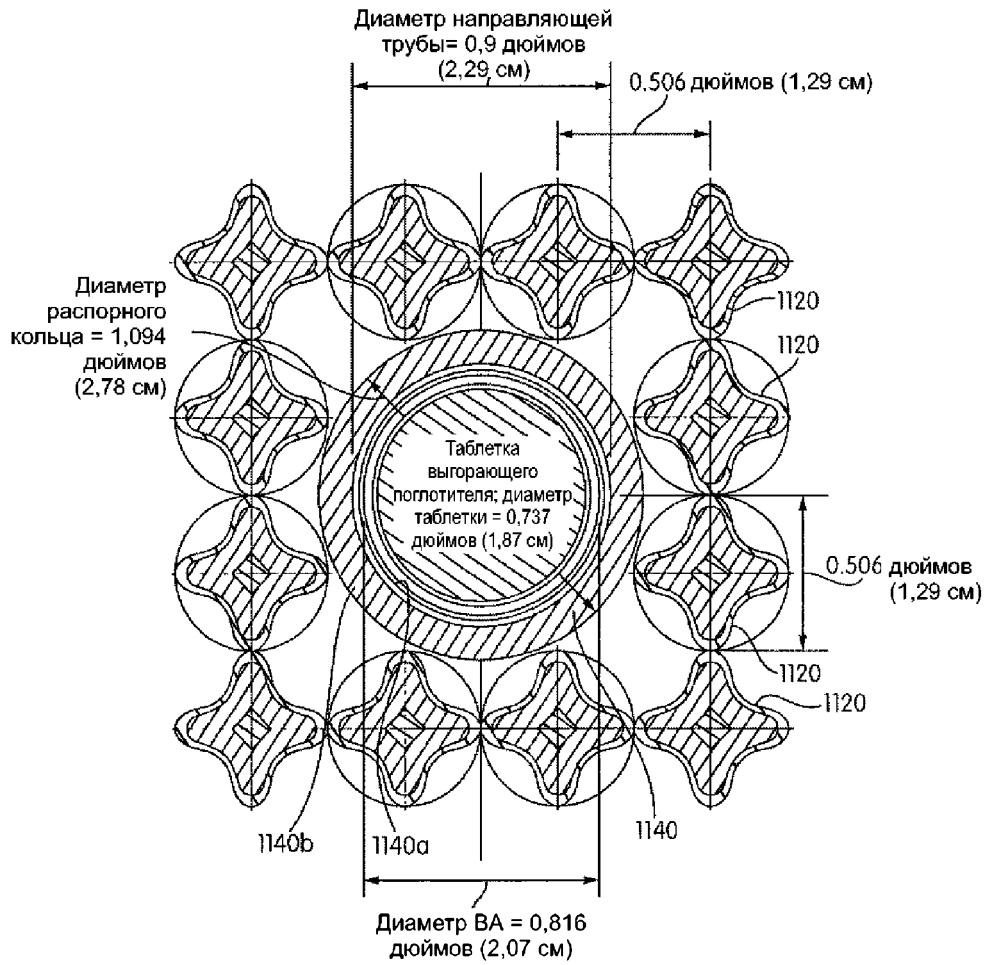


Фиг. 21

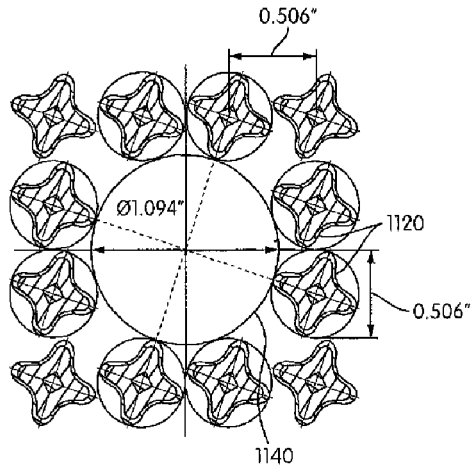
1110



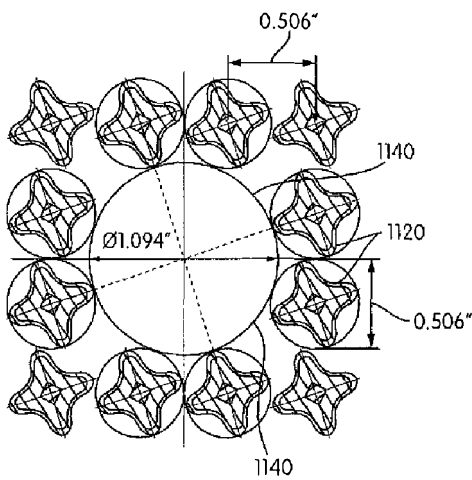
Фиг. 22



Фиг. 23

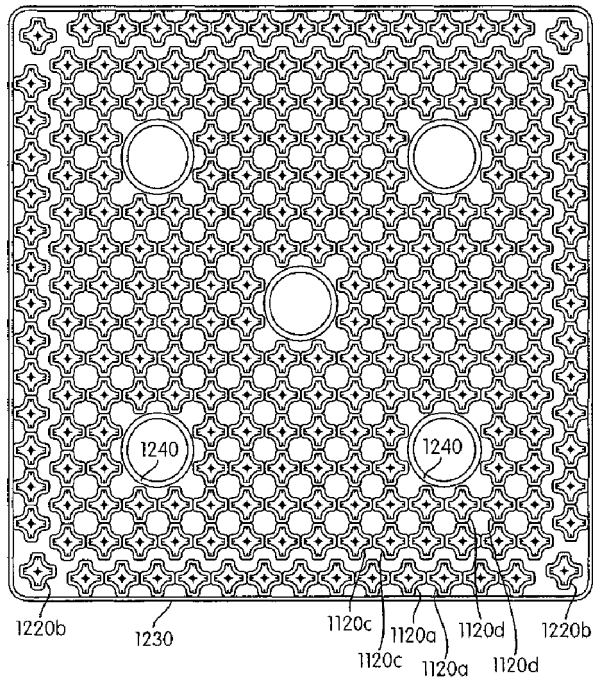


Фиг. 24

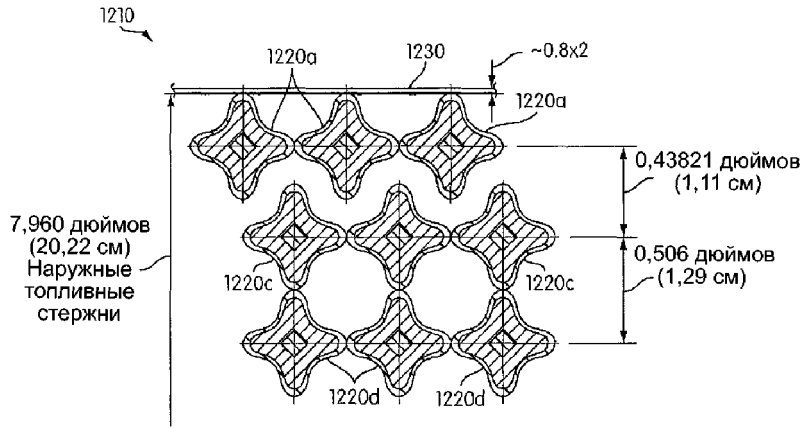


Фиг. 25

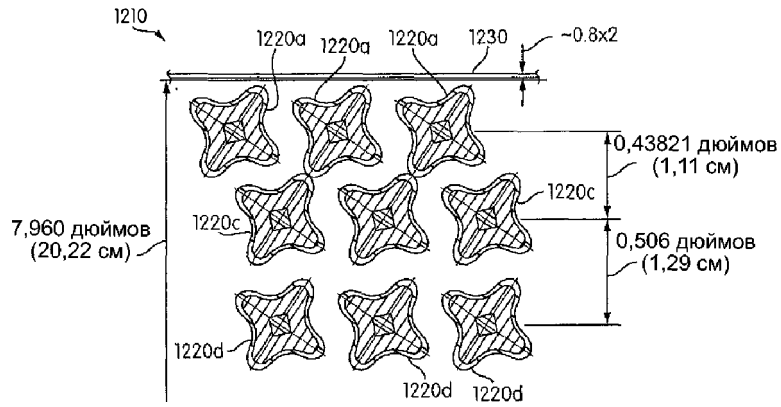
1210



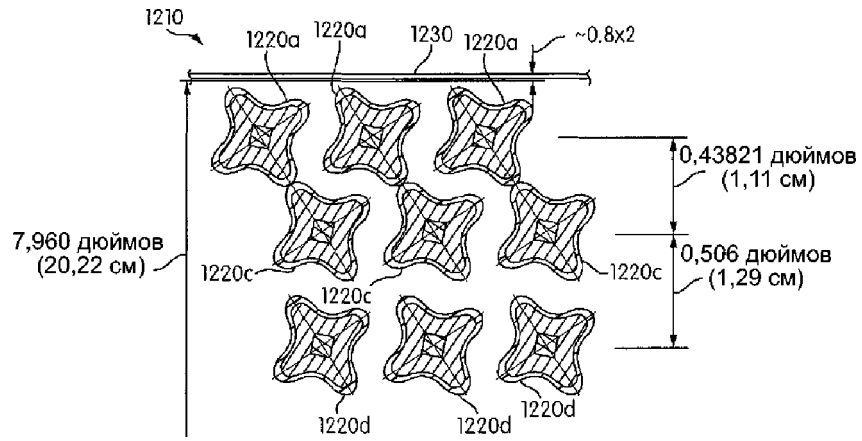
Фиг. 26



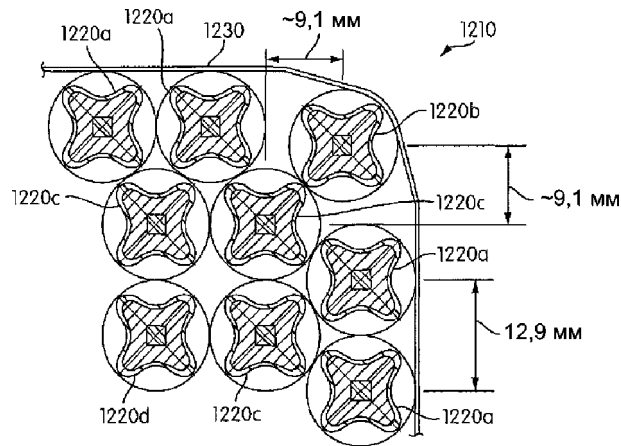
Фиг. 27



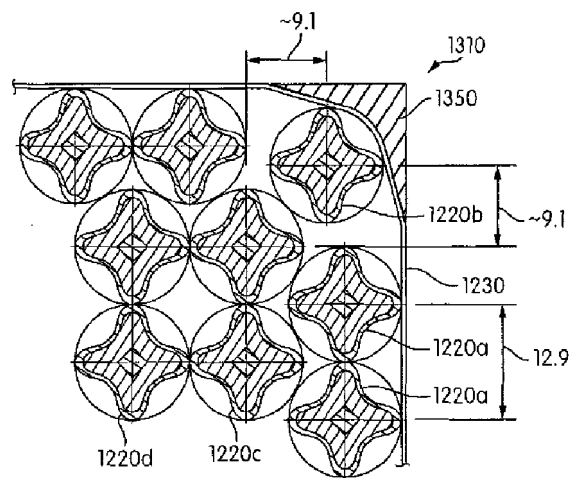
Фиг. 28



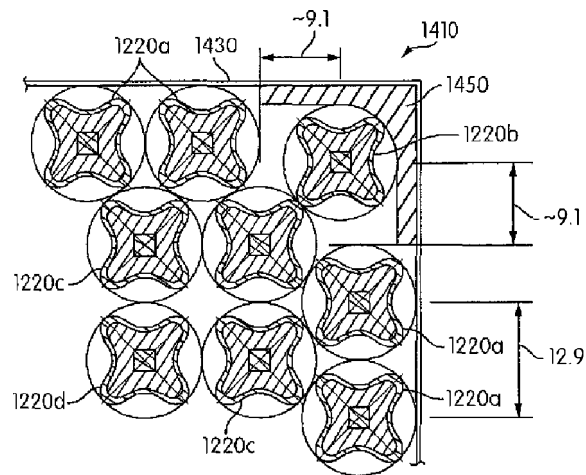
Фиг. 29



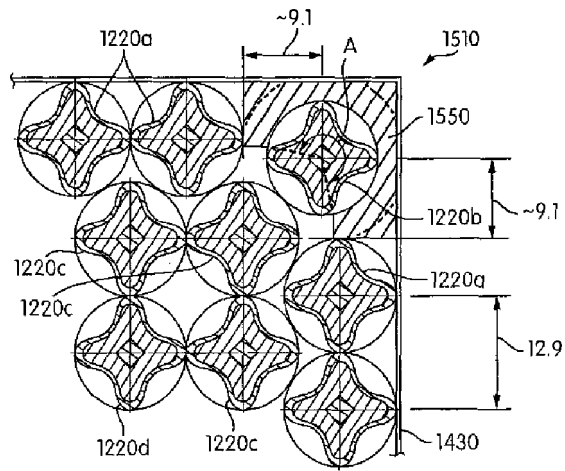
Фиг. 30



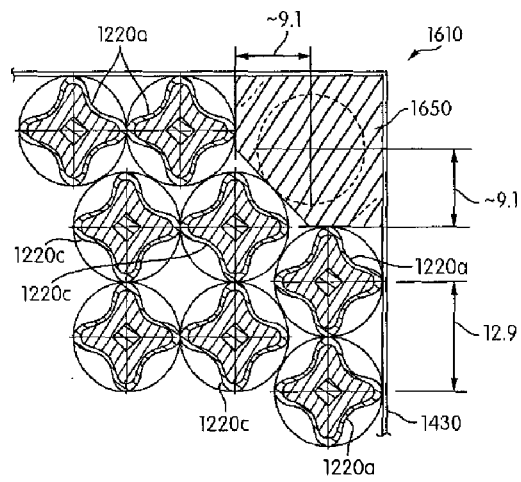
Фиг. 31



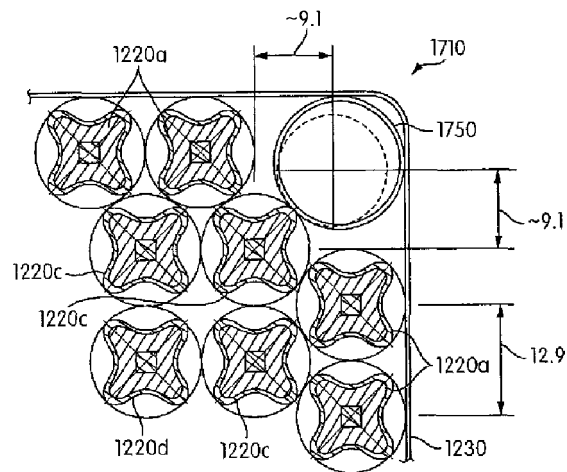
Фиг. 32



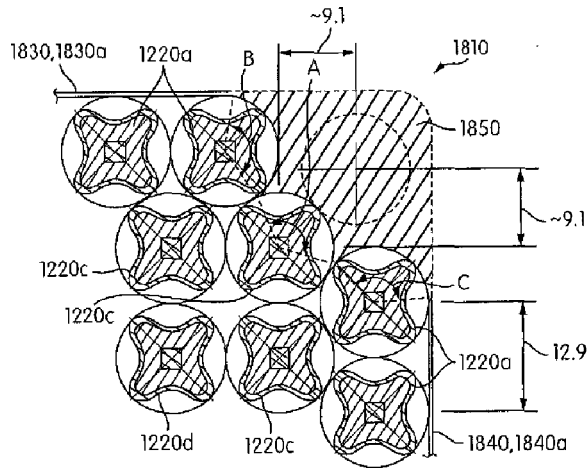
Фиг. 33



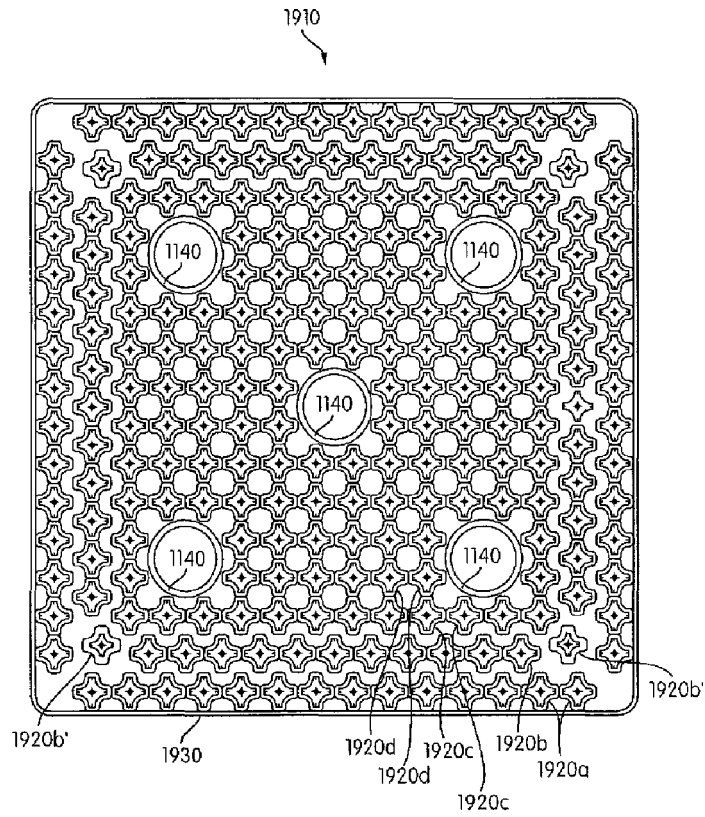
Фиг. 34



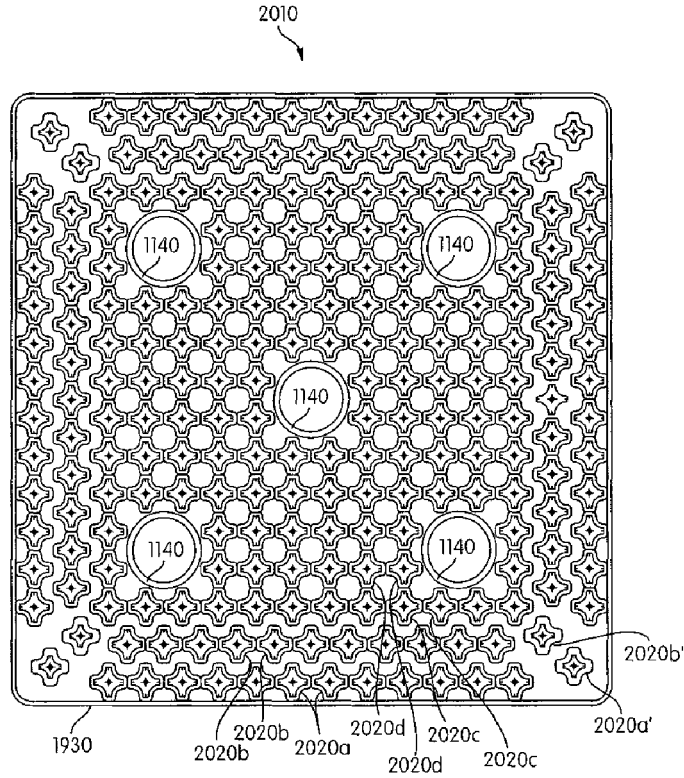
Фиг. 35



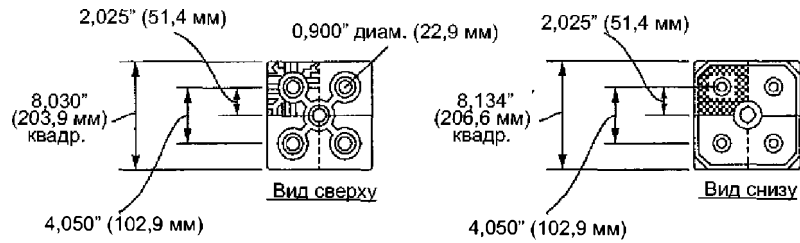
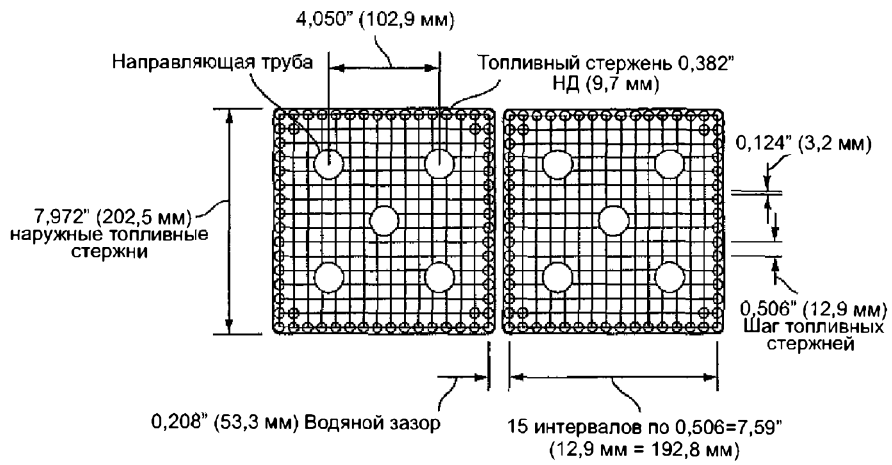
Фиг. 36



Фиг. 37

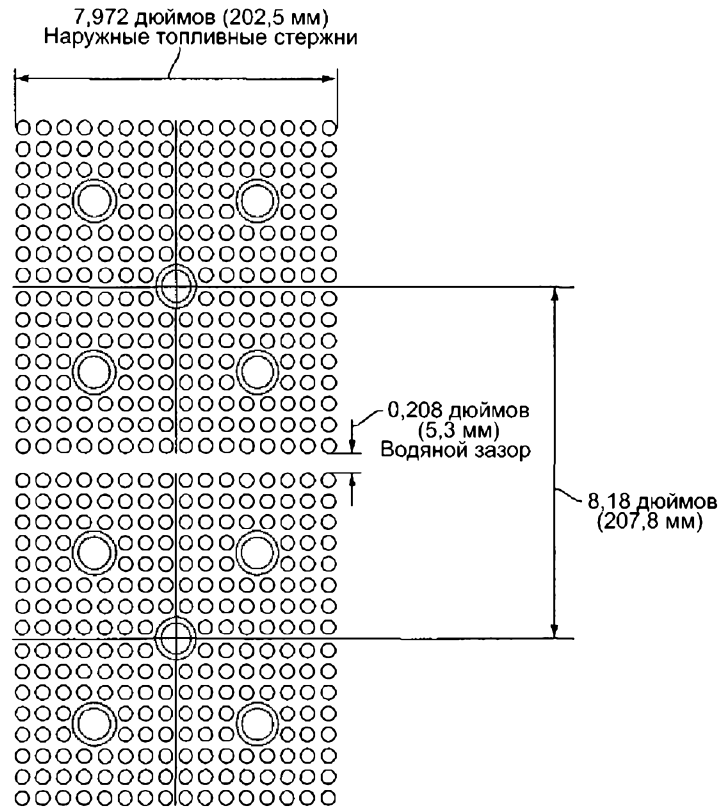


Фиг. 38



Фиг. 39

(известный уровень техники)



Фиг. 40  
(известный уровень техники)

## ОБНОВЛЕННЫЙ ОАБП ПВАЭС

## КОНСТРУКЦИЯ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ

Таблица 4.2-1. Типичные параметры механической конструкции (лист 1 из 4)

Конфигурация активной зоны	
Количество тепловыделяющих сборок в активной зоне, всего	241
Количество СРЭ	89
Количество мест размещения топливных стержней	56 876
Расстояние между тепловыделяющими сборками, от поверхности до поверхности топливного стержня, дюймы	0,208
Промежутки от внешней поверхности топливного стержня до кожуха активной зоны, дюймы	0,214
Гидравлический диаметр, номинальный проток, футы	0,0393
Общая площадь сечения потока (исключая направляющие трубы), кв.футы	60,9
Общая площадь активной зоны, кв.футы	112,3
Эквивалентный диаметр активной зоны, дюймы	143,6
Диаметр описанной окружности активной зоны, дюймы	152,46
Общая загрузка топлива, кг U (в допущении, что все места размещения стержней занимают топливными стержнями)	$1,07 \times 10^5$
Общая масса топлива, фунты UO <sub>2</sub> (в допущении, что все места размещения стержней занимают топливными стержнями)	$2,67 \times 10^5$
Общая масса циркаллой и ZIRLO, фунты	72 500 <sup>(a)</sup>
Объем топлива (включая оболочки), куб.футы	410,8
Тепловыделяющие сборки	
Квадрат размещения топливных стержней	16 x 16
Шаг топливных стержней, дюймы	0,506
Дистанционирующая решетка	
Тип	Листовая пружина
Материал	Циркаллой
Количество в одной сборке	10 <sup>(b)</sup>

a. Масса подразумевает, что все сборки имеют конструкцию PVNGS Unit 2 Batch N design. Фактическая масса варьирует от активной зоны к активной зоне.

b. Начиная с Batch P3R, перегружаемые сборки имеют 9 дистанционирующих решеток из циркаллой.

Фиг. 41  
(известный уровень техники)

Таблица 4.2-1. Типичные параметры механической конструкции (лист 2 из 4)

Тепловыделяющие сборки (продолжение)	
Нижняя дистанционирующая решетка	
Тип	GUARDIAN™ или листовая пружина
Материал	Инконель
Количество в одной сборке	1
Верхняя дистанционирующая решетка (начиная с Batch P3R)	
Тип	Листовая пружина
Материал	Инконель
Количество в одной сборке	1
Общие габариты	
От наружного стержня до наружного стержня, дюймы	7,972x7,972
Топливный стержень	
Материал топливного стержня (спеченные таблетки)	UO <sub>2</sub> или UO <sub>2</sub> - Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Диаметр таблетки, дюймы	0,3255
Длина таблетки, дюймы	0,390
Плотность таблеток (г/см <sup>3</sup> )	10,58
Теоретическая плотность таблеток (г/см <sup>3</sup> )	10,96
Плотность таблеток (% от теоретической)	96,5
Плотность по высоте заполнения, г/см <sup>3</sup>	10,43
Материал оболочки	Циркаллоу или ZIRLO™
Внутренний диаметр оболочки, дюймы	0,332
Наружный диаметр оболочки (номинальный), дюймы	0,382
Толщина оболочки (номинальная), дюймы	0,025
Зазор по диаметру (в холодном состоянии, номинальный), дюймы	0,0065
Активная длина, дюймы	150
Длина накопительной полости, дюймы	Варьируется

Фиг. 42  
(известный уровень техники)

Таблица 4.2-1. Типичные параметры механической конструкции (лист 3 из 4)

Сборки регулирующих элементов (СРЭ)	Полная мощность	Частичная мощность
Количество	76	13
Поглощающие элементы, количество в одной сборке	12 и 4	4
Тип	Цилиндрические стержни	Цилиндрические стержни
Материал оболочки	Инконель 625	Инконель 625
Толщина оболочки (номинальная), дюймы	0,035	0,035
Наружный диаметр оболочки (номинальный), дюймы	0,816	0,816
Зазор по диаметру (номинальный), дюймы	0,009	0,009
Элементы		
Материал поглотителя	В,С/металлический войлок и В,С с уменьшенным диаметром	Инконель 625
Длина поглотителя, дюймы	135-1/2/12/1/2	150,0 (включая кончик пальца)
Диаметр поглотителя, дюймы	0,737/0,664 или 0,737/0,674	0,737 (заготовки инконель 625)
В, С таблетки	(В, С таблетки)	
Плотность, % от теоретической плотности 2,52 г/см <sup>3</sup>	73	нет данных
Масс.% бора, минимум	77,5	нет данных
Стержень с выгорающим поглотителем, оригинальная конструкция <sup>(b)</sup>		
Материал поглотителя	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -B <sub>4</sub> C 0,307	
Диаметр таблетки, дюймы	0,875(1" и 0,500(0,5"))	
Длина таблетки, дюймы, минимум	93(1") и 91(0,5")	
Плотность гранул (% от	3,94	

<sup>(b)</sup> Конструкция перезагружаемой активной зоны может применять оксид эрбия (Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), примешанный к UO<sub>2</sub> топливу, вместо Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C поглотительных стержней. Дизайн перезагружаемых поглотительных стержней механически подобен топливным UO<sub>2</sub> стержням.

Фиг. 43  
(известный уровень техники)

Таблица 4.2-1. Типичные параметры механической конструкции (лист 4 из 4)

Стержень с выгорающим поглотителем, оригинальная конструкция <sup>(b)</sup> (продолжение)	
Материал оболочки	Циркаллой-4
Внутренний диаметр оболочки, дюймы	0,332
Наружный диаметр оболочки, дюймы	0,382
Толщина оболочки (номинальная), дюймы	0,025
Зазор по диаметру (в холодном состоянии, номинальный), дюймы	0,025
Активная длина, дюймы	136,0
Длина накопительной полости, дюймы	Варьируется

Июнь 2003

4.2-54

Редакция 12

Фиг. 44

(известный уровень техники)

