

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **048294**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2024.11.15**

(51) Int. Cl. **B01J 19/24** (2006.01)

(21) Номер заявки  
**202390307**

(22) Дата подачи заявки  
**2021.07.15**

---

(54) **СТРУКТУРИРОВАННЫЙ КАТАЛИЗАТОР**

---

(31) **20187305.6; 21182132.7**

(56) WO-A1-2019228798  
WO-A1-2019228795  
US-A1-2018093886

(32) **2020.07.23; 2021.06.28**

(33) **EP**

(43) **2023.05.17**

(86) **PCT/EP2021/069716**

(87) **WO 2022/017900 2022.01.27**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ТОПСЁЭ А/С (DK)**

(72) Изобретатель:  
**Мортенсен Петер Мельгаард,  
Висманн Себастьян Тор, Ларсен  
Каспер Эмиль, Хансен Андерс Хельбо  
(DK)**

(74) Представитель:  
**Беляева Е.Н., Беляев С.Б. (BY)**

---

(57) Настоящее изобретение касается структурированного катализатора для катализа эндотермической реакции исходного газа с целью его преобразования в газообразный продукт.

**048294**

**B1**

**048294**

**B1**

### Область техники

Структурированный катализатор, реакторная система и способ осуществления эндотермической реакции исходного газа, при котором тепло для эндотермической реакции обеспечивается нагревом сопротивлением.

### Уровень техники

Производство синтез-газа, как правило, происходит на крупных химических заводах из-за энергоемких реакций, необходимых для обеспечения производства. Это затрудняет мелкосерийное производство. Кроме того, токсичность синтез-газа (особенно из-за содержания монооксида углерода) затрудняет хранение синтез-газа и создает значительные риски.

Существует потребность в производстве синтез-газа в необходимых объемах на малых установках.

### Краткое изложение сущности изобретения

В первом аспекте предоставлен структурированный катализатор для катализа эндотермической реакции исходного газа с целью его преобразования в газообразный продукт, при этом указанный структурированный катализатор содержит по меньшей мере одну макроскопическую структуру, расположенную в продольном направлении от передней части к задней части, причем указанная передняя часть образует входное отверстие в указанную макроскопическую структуру для указанного исходного газа, а указанная задняя часть образует выходное отверстие для указанного газообразного продукта, причем указанная макроскопическая структура образует каналы потока, обеспечивая течение исходного газа из указанной передней части в указанную заднюю часть, причем сетчатая структура образована металлическим материалом, который является электропроводящим, и по меньшей мере частично служит подложкой для керамического покрытия, при этом керамическое покрытие служит подложкой для каталитически активного материала, причем сетчатая структура в сечении, поперечном продольному направлению, представляет собой фракцию сечения макроскопической структуры, при этом фракция находится в диапазоне 4-75%, и причем сетчатая структура по меньшей мере в трех различных сечениях в продольном направлении представляет собой различные фракции.

В еще одном аспекте изобретения предусмотрена реакторная система для осуществления эндотермической реакции исходного газа, при этом данная реакторная система содержит следующие элементы:

- a) структурированный катализатор по первому аспекту изобретения;
- b) корпус высокого давления, в котором находится указанный структурированный катализатор, при этом указанный корпус высокого давления содержит входное отверстие для подачи исходного газа и выходное отверстие для отвода газообразного продукта, причем указанное входное отверстие расположено таким образом, что указанный исходный газ поступает в переднюю часть указанного структурированного катализатора, а газообразный продукт выходит из задней части указанного катализатора; и
- c) теплоизоляционный слой между указанным структурированным катализатором и указанным корпусом высокого давления;

Термин "эндотермическая реакция исходного газа" следует понимать как схему реакции, при которой преобразование исходного газа в газообразный продукт предполагает необходимость подачи энергии из окружающей среды.

В еще одном аспекте изобретения предусмотрено применение структурированного катализатора в соответствии с первым аспектом или реактора в соответствии со вторым аспектом, отличающееся тем, что эндотермическая реакция выбрана из группы, включающей в себя паровой риформинг метана, образование цианистого водорода, крекинг метанола, крекинг аммиака, обратную конверсию водяного газа и дегидрирование.

Дополнительные аспекты настоящей технологии подробно описаны ниже, а также на фигурах и в прилагаемой формуле изобретения.

### Описание фигур

На фиг. 1a показано сечение по варианту осуществления реакторной системы по изобретению со структурированным катализатором, содержащим матрицу макроскопических структур;

фиг. 1b иллюстрирует реакторную систему, которая показана на фиг. 1a, при этом удалена часть корпуса высокого давления и теплоизоляционного слоя;

фиг. 2 - увеличенный вид части реакторной системы;

фиг. 3a-3f иллюстрируют различные варианты осуществления прорезей сетчатой структуры;

фиг. 4a-4c иллюстрируют различные варианты осуществления прорезей сетчатой структуры;

фиг. 5 иллюстрирует вариант осуществления макроскопической структуры;

фиг. 6a иллюстрирует относительное металлическое сечение варианта осуществления, показанного на фиг. 5;

фиг. 6b иллюстрирует относительное металлическое сечение на единицу длины варианта осуществления, показанного на фиг. 5;

фиг. 6c иллюстрирует относительную плотность тока варианта осуществления, показанного на фиг. 5;

фиг. 7 иллюстрирует вариант осуществления макроскопической структуры;

фиг. 8a иллюстрирует относительное металлическое сечение варианта осуществления, показанного на фиг. 7;

- фиг. 8b иллюстрирует относительное металлическое сечение на единицу длины варианта осуществления, показанного на фиг. 7;
- фиг. 8с иллюстрирует относительную плотность тока варианта осуществления, показанного на фиг. 7;
- фиг. 9 иллюстрирует вариант осуществления макроскопической структуры;
- фиг. 10a иллюстрирует относительное металлическое сечение варианта осуществления, показанного на фиг. 9;
- фиг. 10b иллюстрирует относительное металлическое сечение на единицу длины варианта осуществления, показанного на фиг. 9;
- фиг. 10с иллюстрирует относительную плотность тока варианта осуществления, показанного на фиг. 9;
- фиг. 11 иллюстрирует вариант осуществления макроскопической структуры;
- фиг. 12a иллюстрирует относительное металлическое сечение варианта осуществления, показанного на фиг. 11;
- фиг. 12b иллюстрирует относительное металлическое сечение на единицу длины варианта осуществления, показанного на фиг. 11;
- фиг. 12с иллюстрирует относительную плотность тока варианта осуществления, показанного на фиг. 11;
- фиг. 13 иллюстрирует вариант осуществления макроскопической структуры;
- фиг. 14a иллюстрирует относительное металлическое сечение варианта осуществления, показанного на фиг. 13;
- фиг. 14b иллюстрирует относительное металлическое сечение на единицу длины варианта осуществления, показанного на фиг. 13;
- фиг. 14с иллюстрирует относительную плотность тока варианта осуществления, показанного на фиг. 13;
- фиг. 15 представляет собой график, иллюстрирующий увеличение сопротивления для вариантов осуществления, проиллюстрированных на фиг. 5, 7, 9, 1 и 13;
- фиг. 16a и 16b иллюстрируют различные виды варианта осуществления структурированного катализатора;
- фиг. 17 иллюстрирует вариант осуществления структурированного катализатора;
- фиг. 18a-18с иллюстрируют различные сечения через вариант осуществления, показанный на фиг. 17;
- фиг. 18d иллюстрирует относительное металлическое сечение варианта осуществления, показанного на фиг. 17;
- фиг. 19a иллюстрирует вариант осуществления структурированного катализатора;
- фиг. 19b иллюстрирует поперечное сечение через вариант осуществления структурированного катализатора, показанного на фиг. 19a.
- фиг. 20 иллюстрирует вариант осуществления структурированного катализатора;
- фиг. 21 иллюстрирует вариант осуществления структурированного катализатора;
- фиг. 22a иллюстрирует два варианта осуществления структурированного катализатора;
- фиг. 22b иллюстрирует поперечное сечение через варианты осуществления структурированного катализатора, показанного на фиг. 22a.
- фиг. 23 a иллюстрирует вариант осуществления макроскопической структуры;
- фиг. 23b иллюстрирует вариант осуществления структурированного катализатора;
- фиг. 24 иллюстрирует вариант осуществления структурированного катализатора;
- фиг. 25 иллюстрирует вариант осуществления макроскопической структуры, и множество матриц макроскопических структур;
- фиг. 26 иллюстрирует различные варианты осуществления структурированного катализатора;
- фиг. 27 иллюстрирует вариант осуществления структурированного катализатора;
- фиг. 28 иллюстрирует различные части для вариантов осуществления макроскопической структуры;
- фиг. 29a иллюстрирует различные части для вариантов осуществления макроскопической структуры;
- фиг. 29b иллюстрирует различные части для вариантов осуществления макроскопической структуры;
- фиг. 30a иллюстрирует часть для варианта осуществления макроскопической структуры; и
- фиг. 30b иллюстрирует часть, показанную на фиг. 30a в собранном элементе.

#### **Подробное описание**

Реакторы с электрическим нагревом позволяют создавать очень компактные химические реакторы, поскольку тепло для реакции подается непосредственно в зону катализатора.

Компактный электрический реактор с использованием монолитного катализатора отличается простотой в эксплуатации и легкостью запуска, позволяя получать газ по необходимости. В результате он позволяет получить относительно недорогой производственный объект, который может производить газ только в необходимых количествах и предполагает необходимость хранения лишь незначительных объемов газа, либо полное отсутствие мощностей для хранения, одновременно с этим значительно сокращая необходимость доставки газа или полностью устраняя ее. Простота технического устройства реактора и реализации технологического процесса делает производство газа привлекательным для относительно

универсальных по местоположению производственных объектов, что снижает риски, связанные с погрузкой-разгрузкой газа.

Вариант осуществления компактного электрического реактора включает структурированный катализатор, содержащий макроскопическую структуру, содержащую трехмерную сетчатую структуру, где сетчатая структура образует пути прохождения потоков, позволяющие исходному газу проходить от передней части к задней части макроскопической структуры. За счет обеспечения сетчатой структуры с нефиксированным поперечным сечением вдоль продольного направления макроскопической структуры можно регулировать электрическое сопротивление в продольном направлении и оптимизировать электрическое сопротивление с учетом сферы применения, таким образом обеспечивая эксплуатацию при повышенной интенсивности теплового потока или более низком электрическом токе. Это позволяет дополнительно повысить эффективность смешивания газа при подаче газа от передней части к задней части, тем самым улучшая характеристики массообмена.

Таким образом, предоставлен структурированный катализатор для катализа эндотермической реакции исходного газа с целью его преобразования в газообразный продукт, при этом указанный структурированный катализатор содержит по меньшей мере одну макроскопическую структуру, расположенную в продольном направлении от передней части к задней части, причем указанная передняя часть образует входное отверстие в указанную макроскопическую структуру для указанного исходного газа, а указанная задняя часть образует выходное отверстие для указанного газообразного продукта, причем указанная макроскопическая структура образует каналы потока, обеспечивая течение исходного газа из указанной передней части в указанную заднюю часть, причем сетчатая структура образована металлическим материалом, который является электропроводящим, и по меньшей мере частично служит подложкой для керамического покрытия, при этом керамическое покрытие служит подложкой для каталитически активного материала, причем сетчатая структура в сечении, поперечном продольному направлению, представляет собой часть поперечного сечения макроскопической структуры, и такая часть находится в диапазоне 4-75%, при этом сетчатая структура в по меньшей мере три различных поперечных сечениях в продольном направлении представляет собой разные фракции.

В поперечном сечении относительно продольного направления сетчатая структура представляет собой часть сечения макроскопической структуры. Таким образом, сетчатая структура представляет собой одну часть сечения, в то время как отверстия представляют собой другую часть того же сечения. Необходимо понимать, что отверстие может быть по меньшей мере частично заполнено материалом, который отличается от металлического материала, из которого сформирована сетчатая структура.

Фракция составляет 4-75%. В рамках каждого сечения вдоль продольного направления макроскопической структуры сетчатая структура может составлять 4-75% поперечного сечения макроскопической структуры. Предпочтительно такая фракция составляет 4-50%, еще более предпочтительно 4-30%.

Макроскопические структуры образованы таким образом, что сетчатая структура по меньшей мере в трех различных сечениях в продольном направлении представляет собой различные фракции, при этом сетчатая структура образует по меньшей мере три различные фракции вдоль продольного направления макроскопической структуры.

Например, макроскопическая структура может включать в себя сетчатую структуру, которая в одном сечении составляет 5%, в другом поперечном сечении - 15%, а в третьем сечении образует сечение размером 25%.

Другая макроскопическая структура может включать в себя сетчатую структуру, которая в одном сечении составляет 7%, в другом поперечном сечении - 30%, а в третьем сечении образует сечение размером 48%.

Очевидно, что вышеупомянутые макроскопические структуры являются примерами макроскопических структур, и что другие макроскопические структуры могут включать в себя сетчатую структуру с другим диапазоном фракций.

Также очевидно, что сетчатая структура в четвертом сечении может представлять собой фракцию, равную фракции первого, второго или третьего сечения. Например, сетчатая структура первого указанного варианта осуществления изобретения может в четвертом сечении представлять собой фракцию в 15%, как и во втором сечении.

Тем не менее, в другом варианте осуществления сетчатая структура первого указанного варианта осуществления изобретения может в четвертом сечении составлять фракцию 28%; т.е. фракцию, отличную от первого, второго и третьего сечения.

В различных вариантах осуществления сечение сетчатой структуры может составлять по меньшей мере 4, предпочтительно 5, более предпочтительно 6, более предпочтительно 7, более предпочтительно 8, более предпочтительно 9, более предпочтительно 10, более предпочтительно 11, и наиболее предпочтительно 12 фракций в продольном направлении. Таким образом, количество фракций может варьироваться от варианта осуществления, предусматривающего три фракции, до вариантов осуществления, предусматривающих несколько фракций, как, например 12 фракций или даже больше.

При уменьшении фракции сечения электрическое сопротивление на единицу объема будет возрастать, что обеспечит возможность работы при повышенном тепловом потоке или более низком токе. Теп-

ловой поток может быть приведен в соответствие с активностью химической реакции путем постоянного уменьшения сечения по аналогии с повышением температуры в структуре и, соответственно, увеличением скорости катализируемой реакции. Кроме того, данное концептуальное решение позволяет производить компактные узлы, где повышенное сопротивление означает, что тепловой поток может быть уравновешен относительно химической реакции с учетом доступной площади поверхности. В целом это означает, что общий минимальный расход материала может быть достигнут для данной конструкции матрицы без риска возникновения нежелательных горячих точек или неуправляемых реакций.

Более того, изменение фракции может быть использовано для прерывания перемещения газового потока и, соответственно, для повышения эффективности перемешивания газового потока и улучшения массообмена, поскольку отверстия в сетчатой структуре обеспечивают возможность смешивания газа, перетекающего из передней части макроскопической структуры в заднюю часть.

Как следует из вышеупомянутых вариантов осуществления, части сечения могут различаться по количеству и размеру, таким образом, обеспечивая возможность локального изменения плотности тока и, соответственно, теплового потока. Целью изобретения является контролируемая реализация изменений с тем, чтобы не создавать нежелательные горячие точки в структуре из-за резких изменений фракций.

Макроскопическая структура, включающая сетчатую структуру с сечениями, образующими различные фракции, позволяет обеспечить более высокое электрическое сопротивление на некоторых участках, избегая высоких плотностей тока на локализованных участках. Следовательно, производительность для данного объема макроскопической структуры может быть увеличена максимально без риска образования горячих точек, которые приводят к нежелательным побочным реакциям или потенциальному механическому отказу.

В варианте осуществления изобретения управление фракциями происходит таким образом, чтобы электрическое сопротивление, и, соответственно, локальный тепловой поток достигали максимальных значений в середине макроскопической структуры в продольном направлении, и были ниже в передней и задней части. Может быть целесообразно обеспечить меньшее значение теплового потока в передней части, где реагирующий газ далек от равновесия, и нежелательные побочные реакции могут представлять сложность. Также, элементы электрических соединений (такие как провода, соединители, шины и т.д.), которые чувствительны к температурам, проще использовать в передней секции при меньшем значении теплового потока. Может быть целесообразно обеспечить меньшее значение теплового потока в задней части, что позволит в рамках химической реакции получить уровень конверсии, близкий к химическому равновесию, и, таким образом, избежать ненужного перегрева газообразного продукта. Также может быть целесообразно обеспечить меньшее значение теплового потока в задней части по причине управления движением тока и предотвращения чрезмерного нагрева материала в части, где температура уже достигла высоких значений.

Макроскопическая структура может иметь электрическое сопротивление, которое более чем на 20%, предпочтительно на 50%, более предпочтительно на 100% и еще более предпочтительно на 300% превышает данный показатель для аналогичной макроскопической структуры без сетчатой структуры. В зависимости от размера и расположения макроскопической структуры значение электрического сопротивления может быть еще выше.

Сетчатая структура образована металлическим материалом. Металлический материал может представлять собой сплав, в состав которого входит одно или более веществ из группы, включающей в себя Fe, Cr, Al, Co, Ni, Zr, Cu, Ti, Mn и Si.

На макроскопическую структуру нанесен каталитически активный материал, который по меньшей мере частично может быть расположен на открытой поверхности макроскопической структуры.

Из-за непосредственной близости между каталитически активным материалом и макроскопической структурой возможен быстрый нагрев каталитически активного материала за счет теплопроводности твердого материала от нагреваемой сопротивлением макроскопической структуры. Важной особенностью процесса нагрева сопротивлением является то, что тепло генерируется внутри самого объекта, а не нагревается внешним источником тепла путем конвективного или кондуктивного теплообмена и/или радиационного нагрева. Кроме того, самая горячая часть реакторной системы, включающая в себя структурированный катализатор, будет находиться внутри корпуса высокого давления реактора. Источник электропитания и структурированный катализатор предпочтительно имеют такие размеры, чтобы по меньшей мере часть структурированного катализатора достигала температуры 850°C, предпочтительно 900°C, более предпочтительно 1000°C и даже более предпочтительно 1100°C. Количество и состав каталитически активного материала могут быть приведены в соответствие с реакцией парового риформинга при данных эксплуатационных условиях. Площадь поверхности макроскопической структуры, часть макроскопической структуры, покрытой керамическим покрытием, тип и структура керамического покрытия, а также количество и состав каталитического материала могут быть приведены в соответствие с эндотермической реакцией при данных эксплуатационных условиях. Однако, следует отметить, что практически вся поверхность макроскопической структуры преимущественно имеет керамическое покрытие и предпочтительно все или большая часть керамического покрытия выступает в качестве подложки каталитически активного материала. Предпочтительно керамическое покрытие не имеют только

те части макроскопической структуры, которые соединены с проводниками.

По тексту настоящего документа термин "макроскопическая структура" означает структуру, которая достаточно велика, чтобы ее можно было увидеть невооруженным глазом без увеличительных устройств. Как правило, макроскопическая структура имеет размеры в диапазоне от десятков сантиметров или до нескольких метров. Макроскопическая структура предпочтительно имеет такие размеры, которые соответствуют по меньшей мере частично внутренним размерам корпуса высокого давления, в котором размещен структурированный катализатор, что позволяет сэкономить место для теплоизоляционного слоя и проводников. Две или более макроскопических структур могут быть соединены, в результате чего получается набор макроскопических структур по меньшей мере один из внешних размеров которых находится в метровом диапазоне, например по меньшей мере один размер такого набора макроскопических структур может составлять 0,5 м, 1 м, 2 м или 5 м. Такие две или более макроскопических структур называются "набором макроскопических структур". В этом случае размеры набора макроскопических структур предпочтительно соответствуют по меньшей мере частично внутреннему размеру корпуса высокого давления, в котором размещен структурированный катализатор (экономия места для теплоизоляционного слоя). Предполагается, что набор макроскопических структур может занимать объем от 0,01 до 10 м<sup>3</sup> или больше. "Структурированный катализатор" может включать в себя одну макроскопическую структуру или набор макроскопических структур, при этом на макроскопических структурах может находиться керамическое покрытие, которое выступает в качестве подложки каталитически активного материала. Если структурированный катализатор содержит набор макроскопических структур, такие макроскопические структуры могут быть электрически соединены между собой. Тем не менее, в качестве альтернативы макроскопические структуры могут быть электрически не связаны друг с другом. Таким образом, структурированный катализатор может включать в себя две или более макроскопических структур, расположенных рядом друг с другом, либо два или более набора, расположенных рядом друг с другом.

Макроскопические структуры могут иметь любые подходящие физические размеры, таким образом, высота может быть меньше ширины макроскопической структуры и наоборот.

Термин "передняя часть макроскопической структуры" означает ту часть макроскопической структуры, где осуществляется подача исходного газа в макроскопическую структуру, а термин "задняя часть макроскопической структуры" означает ту часть макроскопической структуры, где осуществляется выход газа из макроскопической структуры.

На указанной макроскопической структуре может располагаться керамическое покрытие, при этом указанное керамическое покрытие может выступать в качестве подложки каталитически активного материала. Термин "макроскопическая структура, имеющая керамическое покрытие" означает, что по меньшей мере часть поверхности макроскопической структуры покрыта керамическим материалом. Таким образом, данный термин не означает, что вся поверхность макроскопической структуры покрыта керамическим материалом; в частности, по меньшей мере, те части макроскопической структуры, которые электрически соединены с проводниками, не имеют керамического покрытия. Покрытие может представлять собой керамический материал с порами в структуре, что позволяет наносить каталитически активный материал на покрытие и внутри него. Каталитически активный материал преимущественно содержит каталитически активные частицы, имеющие размер в диапазоне приблизительно от 5 нм до 250 нм.

Макроскопическую структуру преимущественно получают с использованием 3D-печати. Процесс получения макроскопической структуры также может включать в себя спекание элементов, полученных с использованием 3D-печати. Керамическое покрытие, которое может содержать каталитически активный материал, можно наносить на макроскопическую структуру перед вторым спеканием в окислительной атмосфере для образования химических связей между керамическим покрытием и макроскопической структурой. В качестве альтернативы, каталитически активный материал может наноситься на керамическое покрытие путем пропитки после второго спекания. Когда между керамическим покрытием и макроскопической структурой образуются химические связи, может быть достигнута высокая теплопроводность между электрически нагреваемой макроскопической структурой и каталитически активным материалом, который расположен на керамическом покрытии, что обеспечивает тесный и почти прямой контакт между источником тепла и каталитически активным материалом структурированного катализатора. Благодаря непосредственной близости источника тепла и каталитически активного материала осуществляется эффективная теплопередача, так что нагревание структурированного катализатора может осуществляться с высокой эффективностью. Таким образом, можно добиться оптимальной обработки газа на единицу объема реакторной системы, поэтому реакторная система, содержащая структурированный катализатор, может быть компактной.

По тексту настоящего документа термины "технологии объемной печати" и "3D-печать" означают технологию производства с использованием металлической добавки. Такие технологии производства с использованием металлической добавки включают в себя процессы 3D-печати, в рамках которых под автоматизированным управлением происходит соединение материала в определенную структуру с получением трехмерного объекта, в котором отверждение структуры происходит, например, путем спекания с получением макроскопической структуры. Кроме того, такие технологии производства с использованием

металлической добавки включают в себя процессы 3D-печати, которые не требуют последующего спекания, например, технологию расплавления материала в заранее сформированном слое или технологию послойной электронно-лучевой плавки материала. Примерами таких технологий расплавления материала в заранее сформированном слое или послойной электронно-лучевой плавки являются процессы трехмерной печати с использованием лазерного луча, электронного луча или плазменной 3D-печати.

Электропроводящий материал содержит Fe, Ni, Cu, Co, Cr, Al, Si или их сплавы. Такой сплав может содержать дополнительные элементы, такие как Mn, Y, Zr, C, Co, Mo или их комбинации. Предпочтительно электропроводящий материал содержит Fe, Cr, Al или их сплав. Такой сплав может содержать дополнительные элементы, такие как Si, Mn, Y, Zr, C, Co, Mo или их комбинации. Предпочтительно каталитически активный материал представляет собой частицы, имеющие размер 2-250 нм. Предпочтительно, проводники и электропроводящий материал изготовлены из различных материалов. Проводники могут быть изготовлены, например, из железа, никеля, алюминия, меди, серебра или их сплавов. Керамическое покрытие представляет собой электроизоляционный материал и, как правило, имеет толщину около 100 мкм, например, 10-500 мкм.

Электропроводящий материал для макроскопической структуры предпочтительно представляет собой когерентный или внутренне цельный материал, что позволяет обеспечить электропроводность по всему электропроводящему материалу и, следовательно, теплопроводность по всему структурированному катализатору, в частности, для нагрева каталитически активного материала. С помощью когерентного или внутренне цельного материала можно обеспечить равномерное распределение тока в электропроводящем материале и, соответственно, равномерное распределение тепла внутри структурированного катализатора. По тексту настоящего документа термин "когерентный" является синонимом термина "связанный", таким образом, "когерентный" относится к материалу, который является внутренне цельным или обладает сцеплением. Из-за того, что структурированный катализатор представляет собой когерентный или внутренне цельный материал, обеспечивается контроль над электрической связностью внутри материала структурированного катализатора и, таким образом, обеспечивается проводимость электропроводящего материала. Следует отметить, что даже если выполняются дальнейшие модификации электропроводящего материала, например, прорези внутри частей электропроводящего материала, электропроводящий материал по-прежнему представляет собой когерентный или внутренне цельный материал.

В целом, когда макроскопическая структура изготовлена по технологии 3D-печати, перепад давления от входа к выходу из реакторной системы может быть значительно снижен по сравнению с реактором, в котором материал катализатора находится в виде окатышей.

В альтернативном варианте макроскопическая структура(-ы) может(-гут) быть изготовлена(-ы) путем гибки, резки и/или сварки листового металла. Необходимо понимать, что структурированный катализатор может включать макроскопическую структуру, изготовленную путем 3D-печати, и макроскопическую структуру, полученную другими способами, такими как сгибание, резка или сварка.

Макроскопическая структура может включать в себя кольцевую стенку, которая формирует внутреннее пространство. Кольцевая стенка может быть образована металлическим материалом, который обладает электропроводностью. В альтернативном варианте осуществления кольцевая стенка может быть образована материалом, который не обладает электропроводностью. Сетчатая структура может располагаться во внутреннем пространстве. В предпочтительном варианте осуществления изобретения макроскопическая структура имеет практически квадратную форму в поперечном сечении, перпендикулярном продольному направлению. Однако, следует понимать, что, по меньшей мере, одна макроскопическая структура может также иметь другие формы поперечного сечения, такие как треугольная, круглая, овальная, пятиугольная, шестиугольная, формы других многоугольников и т.д. Таким образом, кольцевая стенка может быть в значительной степени квадратной, треугольной, круглой и т.д., в зависимости от внешней формы макроскопической структуры.

В одном варианте осуществления кольцевая стенка не содержит отверстий, поперечных продольному направлению, тем самым обеспечивая закрытую боковую стенку, расположенную вокруг сетчатой структуры. Это целесообразно для обеспечения контролируемых путей прохождения газа через макроскопическую структуру.

Сечение сетчатой структуры на совокупном расстоянии может быть непрерывно непостоянным, по меньшей мере, 10%, предпочтительно 20%, более предпочтительно 30%, более предпочтительно 40%, более предпочтительно 50%, более предпочтительно 60%, более предпочтительно 70%, более предпочтительно 80%, и наиболее предпочтительно 90% длины макроскопической структуры в продольном направлении. Под непрерывно непостоянным понимается, что фракция изменяется непрерывно на совокупном расстоянии не менее 10%, где изменение фракции непостоянно. Или другими словами - первая производная фракции по продольному направлению и есть непостоянная и непрерывная функция. Под комбинированным расстоянием понимается расстояние, которое может состоять из двух или более дискретных расстояний с непрерывно непостоянной фракцией, которая прерывается промежуточными расстояниями, при этом фракция не является непрерывно непостоянной, т.е. постоянной.

Изменение фракции может быть менее 500% на мм в продольном направлении, предпочтительно менее 100% на мм, и еще более предпочтительно менее 50% на мм. Меньшие изменения приводят к

меньшим нарушениям плотности тока в структуре и, соответственно, меньшей вероятности образования локальных горячих точек.

Необходимо понимать, что сечение сетчатой структуры в рамках альтернативных или дополнительных вариантов может быть сплошь непостоянным на совокупной протяженности не менее 10%, предпочтительно 20%, более предпочтительно 30%, более предпочтительно 40%, более предпочтительно 50%, более предпочтительно 60%, более предпочтительно 70%, более предпочтительно 80%, и наиболее предпочтительно 90% длины макроскопической структуры в направлении, которое является поперечным продольному.

Предусмотрев сетчатую структуру по меньшей мере с тремя различными сечениями с различными фракциями, можно добиться того, что градиент сопротивлений по меньшей мере на одном участке в продольном направлении будет существенно выше, чем средний градиент сопротивлений в продольном направлении.

Дополнительными и/или альтернативными вариантами осуществления может быть предусмотрено, что градиент сопротивления, по меньшей мере, на одном участке в продольном направлении будет существенно ниже, чем средний градиент сопротивления в продольном направлении.

Сетчатая структура может включать в себя множество прорезей, которые отличаются тем, что прорези могут быть заполнены вырезанным материалом, имеющим более низкую проводимость по сравнению с металлическим материалом. Прорези могут быть сформированы на этапе 3D-печати, которая может использоваться для получения сетчатой структуры.

В одном варианте осуществления вырезанный материал имеет пустоты. Иными словами, прорези могут быть пустыми, что обеспечивает наличие отверстий, через которые может проходить газ при перемещении из передней части в заднюю. Такие прорези могут повысить интенсивность смешивания газа, проходящего через макроскопическую структуру.

В альтернативном варианте осуществления вырезанный материал представляет собой твердый материал. Соответственно, прорези могут быть закрыты, не позволяя газу, переходящему из передней части в заднюю через данные прорези, проходить через них. Сетчатая структура может включать в себя прорези, заполненные различными материалами, отличающиеся тем, что первая прорезь может быть заполнена первым вырезанным материалом, а вторая - вторым вырезанным материалом. В одном из вариантов осуществления твердый вырезанный материал по меньшей мере частично служит основой для керамического покрытия с каталитически активным материалом, аналогично покрытию, основу которого составляет металлический материал. В данном варианте осуществления повышенная каталитическая активность достигается параллельно с контролем сопротивления материала.

Твердый вырезанный материал может обладать термомеханическими свойствами, которые по сути аналогичны термомеханическим свойствам металлического материала, образующего сетчатую структуру. К термомеханическим свойствам может относиться коэффициент термического расширения, который по сути позволяет обеспечить существенно равномерное расширение сетчатой структуры и твердого вырезанного материала, расположенного в прорезях в ходе использования катализатора. Дополнительно или в качестве альтернативы термомеханические свойства могут быть представлены прочностью на разрыв.

Сетчатая структура в одном варианте осуществления может включать в себя одну или более прорезей с пустотами, а также одну или более прорезей, заполненных твердым вырезаемым материалом. Таким образом, в одном варианте осуществления сетчатая структура может включать в себя первую подгруппу прорезей, представляющих собой пустоты, а вторую подгруппу прорезей, заполненных твердым вырезаемым материалом. Следует понимать, что подгруппа может включать в себя только одну прорезь. Также следует понимать, что прорези в составе второй подгруппы могут быть заполнены различными материалами, т.е. первая прорезь заполнена первым вырезанным материалом, а вторая - вторым вырезанным материалом.

Прорези могут иметь большое количество форм. Например, хотя бы одна из прорезей имеет форму из фигур следующей группы: шар, диск, эллипсоид, капля, спираль и многогранник, такой как параллелепипед, пирамида, ромб.

В одном варианте осуществления все прорези имеют одинаковую форму, в то время как, по меньшей мере, некоторые из прорезей в других вариантах осуществления имеют другую форму. Например, сетчатая структура может включать в себя первую группу прорезей в форме диска и вторую группу прорезей в форме шара. Таким образом, сетчатая структура может включать в себя прорези, из которых по меньшей мере две прорези имеют различную форму и/или очертание.

Ряд прорезей может быть расположен на равном расстоянии вдоль продольного направления макроскопической структуры. В рамках альтернативного варианта осуществления прорези могут быть расположены на разном расстоянии вдоль продольного направления. Кроме того, следует понимать, что сетчатая структура может включать в себя ряд прорезей, расположенных на равном расстоянии вдоль продольного направления, а также ряд прорезей, расположенных на разном расстоянии вдоль продольного направления. Две группы прорезей могут, например, быть расположены в продольном направлении параллельно друг другу.

Кроме того, ряд прорезей может быть расположен на равном расстоянии вдоль продольного направления макроскопической структуры.

В одном из вариантов осуществления изобретения первая группа прорезей и вторая группа прорезей чередуются в продольном направлении. Прорези первой и второй группы могут отличаться по размеру и/или форме, и/или вырезанному материалу, который может использоваться для заполнения прорезей.

В варианте осуществления изобретения по меньшей мере часть сетчатой структуры может быть представлена в виде трехмерной сетчатой структуры, тем самым позволяя потоку газа проходить через макроскопическую структуру от передней части к задней по направлению потока, который является нелинейным, то есть предполагает нелинейное перемещение потока газа.

В одном варианте осуществления изобретения по меньшей мере часть сетчатой структуры может образовывать множество параллельных каналов потока.

В одном варианте осуществления изобретения сетчатая структура может образовывать множество внутренних стенок, которые могут быть расположены во внутреннем пространстве, образованном кольцевой стенкой. Множество внутренних стенок может образовывать множество каналов для прохождения потока от передней части к задней. Таким образом, сетчатая структура может иметь несколько параллельных каналов, несколько непараллельных каналов и/или более каналов с меняющимся направлением, при этом каналы ограничены стенками. Таким образом, можно использовать несколько различных форм макроскопической структуры до тех пор, пока площадь поверхности структурированного катализатора, на которую воздействует газ, будет максимальной. В предпочтительном варианте осуществления макроскопическая структура имеет параллельные каналы, поскольку такие параллельные каналы обеспечивают очень небольшой перепад давления в структурированном катализаторе. В предпочтительном варианте параллельные продольные каналы скошены в продольном направлении макроскопической структуры. Таким образом, молекулы газа, поступающего через макроскопическую структуру, будут ударяться о стенки внутри каналов, а не просто поступать прямо через канал без соприкосновения со стенкой. Размер каналов должен быть таким, чтобы обеспечить достаточное сопротивление макроскопической структуры. Например, каналы могут быть квадратными (в поперечном сечении, перпендикулярном каналам) с длиной стороны 1-3 мм, однако также возможны каналы с максимальной протяженностью в поперечном сечении приблизительно до 4 см.

Толщина стенок может, например, составлять 0,2-2 мм, например, приблизительно 0,5 мм, а толщина керамического покрытия, расположенного на стенках, может составлять 10 мкм - 500 мкм, например, 50 мкм - 200 мкм, например, 100 мкм.

Макроскопическая структура может включать в себя элементы, направляющие поток, что позволяет распределять поток газа, проходящего от передней части к задней. Такие элементы, направляющие поток, могут быть напечатаны на 3D-принтере и являться неотъемлемой частью макроскопической структуры. Элементы, направляющие поток, могут быть частью сетчатой структуры, а также могут быть напечатаны на 3D-принтере как часть сетчатой структуры.

В одном варианте осуществления изобретения элементы, направляющие поток, могут быть распределены равномерно вдоль продольного направления макроскопической структуры, тогда как в другом варианте они могут быть распределены неравномерно. Также следует понимать, что элемент, направляющий поток, может в одном варианте быть расположен вдоль части продольного направления, а в альтернативном варианте - вдоль всей длины макроскопической структуры в продольном направлении.

Направляющие поток элементы могут дополнительно выступать в качестве электрических клемм, которые могут минимизировать контактное сопротивление и, таким образом, обеспечить более равномерное распределение тока.

Структурированный катализатор может включать две или более макроскопических структур, при этом по меньшей мере две макроскопические структуры электрически соединены, образуя, таким образом, комплекс, включающий в себя две или более макроскопических структур.

Две соседние макроскопические структуры могут быть изготовлены с помощью 3D-печати как одно целое, что позволяет получить электрическое соединение между двумя макроскопическими структурами на минимально удалении от передней или задней части указанных макроскопических структур. Иными словами, электрическое соединение может быть либо в области передней части, либо задней части макроскопической структуры.

В конкретном варианте структурированного катализатора по изобретению электрическое соединение между первой и второй макроскопическими структурами реализуется при помощи механического соединения, зажима, пайки, сварки или любого сочетания указанных соединения.

В конкретном варианте осуществления структурированного катализатора по изобретению электрическое соединение между первой и второй макроскопическими структурами реализовано в виде соединителя, включающего в себя по меньшей мере два средства зацепления, каждое из соединено с одной из указанных первой и второй макроскопических структур, при этом средство зацепления обладает внутренней поверхностью, форма которой соответствует по меньшей мере части внешней поверхности указанных первой и второй макроскопических структур, и при этом средство зацепления прикреплено к внешней поверхности кольцевой стенки за счет посадки с натягом. В контексте настоящего изобретения

под "посадкой с натягом" (известной также как прессовая или фрикционная посадка) следует понимать крепление между двумя плотно прилегающими сопрягаемыми деталями для получения соединения, которое удерживается вместе за счет трения после того, как детали сдвигаются/прижимаются друг к другу. Соединитель и макроскопическая структура (структуры) могут быть соединены путем приложения динамического давления, например, при нажатии на одну часть с целью надеть/задвинуть ее на/в другую. В конкретном варианте соединитель выполнен из сплава, содержащего одно или более веществ из группы, включающей в себя Fe, Cr, Al, Co, Ni, Zr, Cu, Ti, Mn и Si.

В конкретном варианте осуществления структурированного катализатора по изобретению электрическое соединение между первой и второй макроскопическими структурами выполнено в виде переключки из электропроводящего материала, при этом переключка и первая и вторая макроскопические структуры вместе образуют когерентную структуру. В данном контексте "когерентный" означает образующий непрерывную фазу. В конкретном варианте осуществления изобретения переключка образуется за счет обеспечения наличия электропроводящих материалов первой макроскопической структуры, второй макроскопической структуры и переключки в виде трех отдельных объектов, а также соединения отдельных объектов вместе способом, содержащим этап спекания или окислительную обработку. В конкретном варианте осуществления сочетание переключки и первой и второй макроскопических структур печатается на 3D-принтере, после чего спекается. В конкретном варианте осуществления переключка выполнена из сплава, содержащего одно или более веществ из группы, включающей в себя Fe, Cr, Al, Co, Ni, Zr, Cu, Ti, Mn и Si. В конкретном варианте осуществления проводящие материалы переключки и первой и второй макроскопических структур являются идентичными.

Структурированный катализатор может в одном варианте осуществления включать в себя, по меньшей мере, первую и вторую макроскопические структуры, при этом вторая макроскопическая структура может быть расположена по меньшей мере частично по окружности вокруг первой макроскопической структуры. В одном из вариантов осуществления вторая макроскопическая структура может представлять собой удлиненную структуру, простирающуюся в продольном направлении и являющуюся полый, таким образом, позволяя полностью окружить первую макроскопическую структуру, при этом внутренняя поверхность второй макроскопической структуры обращена к внешней поверхности первой макроскопической структуры. В альтернативном варианте осуществления вторая макроскопическая структура может располагаться по окружности частично вокруг первой макроскопической структуры, в результате чего часть внутренней поверхности второй макроскопической структуры обращена к части внешней поверхности первой макроскопической структуры. В качестве примера более позднего варианта осуществления первая макроскопическая структура может в сечении, поперечном продольному направлению, образовывать преимущественно круглую форму, тогда как вторая макроскопическая структура в сечении, поперечном продольному направлению, может иметь преимущественно C-образную форму, таким образом частично вмещая в себя первую макроскопическую структуру, в случаях, когда она расположена частично по окружности вокруг первой макроскопической структуры.

Вторая макроскопическая структура может быть расположена по окружности вокруг по меньшей мере 50%, например, по меньшей мере 60%, например, по меньшей мере 70%, например, по меньшей мере 80%, например, по меньшей мере 90%, например, 100% внешней поверхности первой макроскопической структуры. В случаях, когда вторая макроскопическая структура расположена по окружности вокруг 50% внешней поверхности первой макроскопической структуры, половина внешней поверхности первой макроскопической структуры обращена ко второй макроскопической структуре, тогда как другие 50% внешней поверхности первой макроскопической структуры в сторону второй макроскопической структурой не обращены.

Первая и вторая макроскопические структуры могут иметь электрическое соединение в задней части, отличающееся тем, что структурированный катализатор может быть разработан таким образом, чтобы направлять электрический ток через первую макроскопическую структуру от передней части к указанной задней части, а затем через вторую макроскопическую структуру от задней части к передней, при этом вторая макроскопическая структура расположена по окружности вокруг первой макроскопической структуры.

Первая и вторая макроскопические структуры могут быть исполнены как одно целое, а в альтернативном варианте осуществления могут быть исполнены как два отдельных элемента, которые впоследствии могут быть присоединены друг к другу в задней части, таким образом обеспечивая электрическое соединение между первой и второй макроскопическими структурами.

Для обеспечения размещения второй макроскопической структуры по меньшей мере частично вокруг первой макроскопической структуры, внешняя поверхность первой макроскопической структуры может совпадать с внутренней поверхностью второй макроскопической структуры. Следует понимать, что формы могут совпадать, а размеры отличаться для того, чтобы первая и вторая макроскопические структуры не соприкасались друг с другом по своему продольному направлению. Первая и вторая макроскопические структуры могут быть электрически соединены в задней части, что обеспечивает прохождение тока через первую и вторую макроскопические структуры.

Тот факт, что первая макроскопическая структура имеет внешнюю поверхность, которая соответ-

ствует внутренней поверхности второй макрокопической структуры, позволяет свести к минимуму расстояние между первой и второй макрокопическими структурами.

В одном варианте осуществления внешняя поверхность первой макрокопической структуры в сечении, поперечном продольному направлению, может быть преимущественно круглой. По меньшей мере часть внешней поверхности второй макрокопической структуры в сечении, поперечном продольному направлению, также может быть преимущественно круглой. В альтернативном варианте осуществления наружная поверхность первой макрокопической структуры в сечении, поперечном продольному направлению, может быть преимущественно овальной, квадратной, треугольной, пятиугольной, шестиугольной либо иметь форму другого многоугольника. Таким образом, внешняя поверхность может иметь любую произвольную форму по меньшей мере часть внутренней поверхности второй макрокопической структуры также может образовывать любую из упомянутых форм или участок соответствующей формы. Последнее особенно важно в вариантах осуществления, которые отличаются тем, что вторая макрокопическая структура расположена частично вокруг первой макрокопической структуры.

Первая и вторая макрокопические структуры могут быть расположены преимущественно соосно.

Следует понимать, что структурированный катализатор может дополнительно включать в себя третью макрокопическую структуру, которая может быть расположена по меньшей мере частично вокруг второй макрокопической структуры. Вторая и третья макрокопические структуры могут иметь соединение в передней части, отличающееся тем, что структурированный катализатор может быть разработан таким образом, чтобы направлять электрический ток через первую макрокопическую структуру от передней части к указанной задней части, а затем через вторую макрокопическую структуру от задней части к передней, а затем через третью макрокопическую структуру от передней части к задней.

Первая, вторая и третья макрокопические структуры могут быть расположены в значительной степени соосно. Следует понимать, что приведенные выше замечания касательно относительной формы и размера первой и второй макрокопических структур в равной степени относятся ко второй и третьей макрокопическим структурам.

Кроме того, следует понимать, что структурированный катализатор может включать в себя еще больше макрокопических структур, например, четыре, пять или более.

Две макрокопические структуры могут включать в себя параллельные внешние секции, обеспечивая, таким образом, геометрическое соединение в продольном направлении или в направлении, поперечном продольному направлению двух макрокопических структур. Например, параллельные внешние секции могут образовывать часть сетчатой структуры, часть периферийной стены или могут быть отдельными элементами, прикрепленными к каждой из макрокопических структур. В одном варианте осуществления одна часть параллельной структуры представляет собой отдельный элемент, прикрепленный к одной из макрокопических структур, в то время как другая часть параллельной структуры образует часть другой макрокопической структуры.

Две макрокопические структуры могут быть скреплены путем сварки, пайки или механического прессования. При сжатии сила трения обеспечивает удержание вместе двух макрокопических структур.

По меньшей мере одна макрокопическая структура может включать в себя соединительную секцию, которая позволяет непосредственно закрепить электрическое соединение, при этом указанная соединительная секция печатается на 3D-принтере и является частью макрокопической структуры. Электрическое соединение может быть предусмотрено для того, чтобы обеспечивать питание от источника электричества.

Толщина кольцевой стенки в сечении, обеспечивающем электрическое соединение со второй макрокопической структурой, может быть на 25%, предпочтительно на 50%, еще более предпочтительно на 100% и еще более предпочтительно на 200% выше средней толщины кольцевой стенки, при этом толщина кольцевой определяется как размер кольцевой стенки в направлении, перпендикулярном продольному.

В одном варианте осуществления структурированный катализатор может представлять собой матрицу, включающую в себя первую и вторую макрокопические структуры, где:

- a) первая и вторая макрокопические структуры содержат трехмерную сетчатую структуру;
- b) матрица содержит, по меньшей мере, первый и второй проводники, электрически соединенные с указанной первой и второй макрокопическими структурами, соответственно, и с источником электропитания, причем указанный источник электропитания рассчитан на нагрев, по меньшей мере, части указанных первой и второй макрокопических структур до температуры по меньшей мере 500°C путем пропускания электрического тока через указанную макрокопическую структуру, и причем проводники соединены в соответствующих положениях в составе матрицы ближе к указанной передней части, чем к указанной задней части,
- c) указанные первая и вторая макрокопические структуры электрически соединены перемычкой из электропроводящего материала, и
- d) матрица выполнена с возможностью направления электрического тока от первого проводника через первую макрокопическую структуру к указанной задней части, после чего через перемычку и затем через вторую макрокопическую структуру ко второму проводнику.

Матрица может быть изготовлена путем 3D-печати первой макрокопической структуры, второй

макроскопической структуры и перемычки, которые все вместе составляют единое целое.

В качестве альтернативы матрица может быть изготовлена путем 3D-печати первой макроскопической структуры, второй макроскопической структуры и перемычки, а также необязательного электрического соединения, которые все вместе составляют единое целое.

В одном варианте осуществления второй проводник не напрямую электрически соединен со второй макроскопической структурой.

Матрица может дополнительно включать в себя (i) одну или более расположенных вблизи друг от друга дополнительных промежуточных макроскопических структур и (ii) одну концевую макроскопическую структуру, при этом каждая дополнительная промежуточная макроскопическая структура соединена, по меньшей мере, с двумя расположенными вблизи макроскопическими структурами при помощи перемычки из электропроводящего материала, при этом концевая макроскопическая структура соединена, по меньшей мере, с одной смежной макроскопической структурой, а второй проводник соединен с концевой макроскопической структурой на концевой макроскопической структуре в положении, которое находится ближе к указанной передней части, чем к указанной задней части.

Первая и вторая макроскопические структуры могут быть соединены при помощи перемычки в задней части матрицы.

Предусмотрена реакторная система для осуществления эндотермической реакции исходного газа, при этом данная реакторная система содержит следующие элементы:

- a) структурированный катализатор в соответствии с приведенным выше описанием;
- b) корпус высокого давления, в котором находится указанный структурированный катализатор, при этом указанный корпус высокого давления содержит входное отверстие для подачи исходного газа и выходное отверстие для отвода газообразного продукта, причем указанное входное отверстие расположено таким образом, что указанный исходный газ поступает в переднюю часть указанного структурированного катализатора, а газообразный продукт выходит из задней части указанного катализатора; и
- c) теплоизоляционный слой между указанным структурированным катализатором и указанным корпусом высокого давления.

Следует понимать, что специалисту в данной области будет легко подтвердить, что любой признак, описанный в сочетании со структурированным катализатором, также может быть объединен с реакторной системой для проведения эндотермической реакции исходного газа и обратной реакции.

Описанный выше структурированный катализатор целесообразно использовать в реакторной системе для проведения эндотермической реакции сырьевого газа. В связи с этим замечания, изложенные выше в отношении структурированного катализатора, в равной степени касаются и реакторной системы.

В соответствии с топологией реакторной системы сжатый исходный газ подается в нее через входное отверстие и направляется в корпус высокого давления реакторной системы. Корпус высокого давления имеет такую внутреннюю конфигурацию теплоизоляционных слоев и инертного материала, чтобы исходный газ направлялся через каналы структурированного катализатора, где он будет контактировать с керамическим покрытием и каталитически активным материалом, который расположен на подложке из керамических покрытий, при этом каталитически активный материал будет катализировать эндотермическую реакцию. Кроме того, нагревание структурированного катализатора обеспечивает необходимое тепло для эндотермической реакции. Газообразный продукт из структурированного катализатора направляется к выходному отверстию из реакторной системы.

Когда корпус высокого давления включает входное отверстие для подачи исходного газа и выходное отверстие для отвода газообразного продукта, причем указанное входное отверстие расположено таким образом, что указанный исходный газ подается в переднюю часть структурированного катализатора, а газообразный продукт выходит из задней части структурированного катализатора, и когда по меньшей мере два проводника подсоединены к структурированному катализатору в точке на структурированном катализаторе, которая расположена ближе к передней части структурированного катализатора, чем к задней части структурированного катализатора по меньшей мере два проводника могут быть размещены в относительно более холодной части реакторной системы. Передняя часть структурированного катализатора имеет более низкую температуру, чем задняя часть структурированного катализатора из-за следующих факторов:

исходный газ, подача которого осуществляется через входное отверстие, может охлаждать по меньшей мере два проводника перед нагревом структурированным катализатором далее по пути прохождения газа через структурированный катализатор;

исходный газ на подаче в переднюю часть структурированного катализатора будет иметь более низкую температуру, чем газообразный продукт, выходящий из задней части структурированного катализатора из-за тепла, которое обеспечивается электронагревом структурированного катализатора:

эндотермический характер реакции предполагает поглощение тепла из окружающей среды,

структурированный катализатор имеет конструкцию, которая позволяет электрическому току проходить от одного проводника по сути к задней части структурированного катализатора и возвращаться ко второму проводнику из по меньшей мере двух проводников.

Температурный профиль в структурированном катализаторе может соответствовать практически

непрерывно возрастающей температуре по пути прохождения исходного газа через структурированный катализатор.

При использовании реакторной системы по изобретению для облегчения реакции парового риформинга, по сравнению с традиционно используемой трубчатой риформинг-установкой с огнем она демонстрирует некоторые преимущества. Для реакторной системы согласно изобретению не требуется печь, и это значительно уменьшает общий размер реактора. Кроме того, преимуществом является то, что количество продукта, полученного в реакторе с одним корпусом высокого давления, значительно больше по сравнению с известными трубчатыми установками парового риформинга. В стандартном трубчатом реакторе парового риформинга количество продукта, получаемого в одной трубе трубчатой установки парового риформинга, составляет достигает  $500 \text{ нм}^3/\text{ч}$ . Для сравнения, с помощью реакторной системы по изобретению может обеспечиваться производительность до  $2000 \text{ нм}^3/\text{ч}$  и более, например, до  $10000 \text{ нм}^3/\text{ч}$  и более в одном корпусе высокого давления. При этом в исходном газе может не присутствовать  $\text{O}_2$ , а в полученном синтез-газе может быть менее 10% метана. Когда в одном корпусе высокого давления размещается катализатор, при котором обеспечивается производительность до  $10000 \text{ нм}^3/\text{ч}$  или более газобразного продукта, пропадает необходимость в нескольких корпусах высокого давления или в устройстве для распределения исходного газа в несколько таких отдельных корпусов высокого давления.

Другое преимущество данной реакторной системы состоит в том, что внутри реакторной системы поток, проходящий через структурированный катализатор, может быть направлен вверх из-за того, что структурированный катализатор имеет макроскопическую структуру. В качестве альтернативы поток через структурированный катализатор может быть направлен горизонтально или иметь любое другое подходящее направление. Ситуация усложняется, если реактор содержит гранулы, поскольку возникает риск формирования псевдооживленного слоя, измельчения и выдувания гранул. Таким образом, можно не использовать большое количество труб, а это снижает затраты на установку. Кроме того, в случае восходящего или горизонтального потока повышается гибкость конфигурации установки.

Кроме того, необходимо помнить, что выражение "по меньшей мере два проводника подсоединены к структурированному катализатору в точке на структурированном катализаторе, которая расположена ближе к передней части структурированного катализатора, чем к задней части структурированного катализатора" означает, что оба проводника/все проводники подсоединены ближе к передней части структурированного катализатора, чем к задней части по меньшей мере два проводника предпочтительно подсоединяются к передней части структурированного катализатора или в пределах четверти длины макроскопической структуры, которая ближе всего расположена к передней части.

Предусмотрено применение структурированного катализатора согласно описанию выше или реактора согласно описанию выше, отличающееся тем, что эндотермическая реакция выбрана из группы, включающей в себя паровой риформинг метана, образование цианистого водорода, крекинг метанола, крекинг аммиака, обратную конверсию водяного газа и дегидрирование.

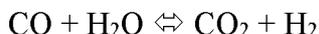
Термин "дегидрирование" означает следующую реакцию:



Где  $\text{R}_1$  и  $\text{R}_2$  могут представлять собой любую подходящую группу в молекуле углеводорода, такую как  $-\text{H}$ ,  $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{CH}_2$  или  $-\text{CH}$ .

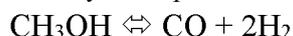
В одном из вариантов осуществления эндотермическая реакция представляет собой дегидрирование углеводородов. В качестве каталитически активного материала может выступать Pt. Максимальная температура реактора может составлять  $500\text{-}700^\circ\text{C}$ . Давление исходного газа может составлять 2-5 бар.

Термин "конверсия водяного газа" означает следующие реакции:



В одном из вариантов осуществления изобретения эндотермическая реакция представляет собой обратную реакцию конверсии водяного газа (обратная реакция конверсии водяного газа). Максимальная температура реактора может составлять  $600\text{-}1300^\circ\text{C}$ . Давление исходного газа может составлять 2-80 бар, предпочтительно 10-40 бар. В одном из вариантов осуществления изобретения макроскопическая структура состоит из сплава Fe Cr Al, на который нанесено керамическое покрытие из смеси  $\text{ZrCO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а в качестве каталитически активного материала выступает Mn. В другом варианте осуществления макроскопическая структура состоит из сплава Fe Cr Al, на который нанесено керамическое покрытие из смеси  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , а в качестве каталитически активного материала выступает Ni.

Термин "крекинг метанола" означает следующие реакции:

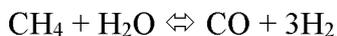


Реакция крекинга метанола, как правило, сопровождается реакцией конверсии водяного газа.

В одном из вариантов осуществления изобретения эндотермическая реакция представляет собой крекинг метанола. Максимальная температура реактора может составлять  $200\text{-}300^\circ\text{C}$ . Давление исходно-

го газа может составлять 2-30 бар, предпочтительно около 25 бар. В одном из вариантов осуществления изобретения макроскопическая структура состоит из сплава Fe Cr Al, который поддерживает керамическое покрытие из смеси  $ZrO_2$  и  $Al_2O_3$ , а в качестве каталитически активного материала применяется CuZn. В другом варианте осуществления макроскопическая структура состоит из сплава Fe Cr Al, на который нанесено керамическое покрытие из смеси  $ZrO_2$  и  $MgAl_2O_4$ , а в качестве каталитически активного материала выступает Ni.

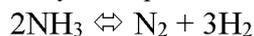
Кроме того, термин "паровой риформинг" означает реакцию риформинга по одному или нескольким из приведенных ниже уравнений:



Указанные реакции обычно сочетаются с реакцией конверсии водяного газа.

В одном из вариантов осуществления эндотермическая реакция представлена паровым риформингом углеводородов. Максимальная температура реактора может составлять 850-1300°C. Давление исходного газа может составлять 5-180 бар, предпочтительно около 25 бар. В качестве каталитически активного материала могут использоваться Ni, Ru, Rh, Ir или их комбинации, в то время как керамическое покрытие может быть представлено  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $MgAl_2O_4$ ,  $CaAl_2O_4$  или их комбинациями, а также может смешиваться с оксидами, такими как Y, Ti, La или Ce. В одном из вариантов осуществления макроскопическая структура состоит из сплава Fe Cr Al, который нанесено керамическое покрытие из смеси  $ZrO_2$  и  $MgAl_2O_4$ , а в качестве каталитически активного материала применяется никель.

Термин "крекинг аммиака" означает следующие реакции:



В одном из вариантов осуществления изобретения эндотермическая реакция представляет собой крекинг аммиака. В качестве каталитически активного материала может выступать Fe или Ru. Максимальная температура реактора может составлять 400-700°C. Давление исходного газа может составлять 2-30 бар, предпочтительно около 25 бар.

Термин "синтез цианистого водорода" означает следующие реакции:



В одном из вариантов осуществления изобретения эндотермическая реакция представляет собой синтез цианистого водорода или процесс синтеза органических нитрилов. В качестве каталитически активного материала может выступать Pt, Co или SnCo. Максимальная температура реактора может составлять 700-1200°C. Давление исходного газа может составлять 2-30 бар, предпочтительно около 5 бар.

В одном из вариантов осуществления изобретения реакторная система дополнительно содержит слой каталитического материала, такого как гранулированный катализатор, по ходу процесса до структурированного катализатора внутри корпуса высокого давления. В настоящем документе термин "по ходу процесса до" рассматривается по направлению потока исходного газа. Таким образом, в настоящем документе термин "по ходу процесса до" означает, что исходный газ направляется через слой каталитического материала до подачи в структурированный катализатор. Указанный слой катализатора может использоваться для предварительной подготовки исходной смеси, например, путем адиабатической реакции в процессе обеспечения теплового равновесия химической реакции, такой как конверсия водяного газа. В рамках дополнительного/альтернативного варианта осуществления слой каталитического материала можно использовать в качестве защиты расположенного ниже по потоку структурированного катализатора от загрязнения примесями, такими как сера и/или хлор. Слой каталитического материала не требует специального нагрева, однако может осуществляться не прямой нагрев слоя каталитического материала, если он находится в непосредственной близости от структурированного катализатора.

В одном из вариантов осуществления изобретения внутри корпуса высокого давления после указанного структурированного катализатора размещается слой каталитического материала. Такой каталитический материал может быть в виде зерен, экструдатов или гранул катализатора. В результате получаем ситуацию, когда четвертый каталитический материал может быть использован для снижения температуры приближения к равновесным условиям для газа, покидающего структурированный катализатор, путем создания псевдоадиабатического уравнивания соответствующих реакций.

Следует понимать, что специалисту в данной области не составит труда подтвердить, что любой признак, описанный в сочетании со структурированным катализатором, и реакторной системой для проведения эндотермической реакции исходного газа, может использоваться в данной области применения. В связи с этим замечания, приведенные выше в отношении структурированного катализатора и реактор-

ной системы, в равной степени применимы к вариантам использования предмета настоящего изобретения.

#### **Подробное описание фигур**

На всех фигурах одинаковые номера позиций означают одинаковые элементы.

На фиг. 1 представлен вид в поперечном разрезе реакторной системы 100 в соответствии с одним вариантом осуществления изобретения. Реакторная система 100 содержит структурированный катализатор 10, выполненный в виде матрицы макроскопических структур 5. Каждая макроскопическая структура 5 в составе матрицы имеет керамическое покрытие, пропитанное каталитически активным материалом. Кроме того, реакторная система 100 содержит проводники 40, 40', подключенные к источнику электропитания (не показан на фигурах) и к структурированному катализатору 10, а именно к матрице макроскопических структур. Проводники 40, 40' проходят через стенку корпуса высокого давления 20, содержащего структурированный катализатор, а также через изоляционный материал 30 на внутренней стороне корпуса высокого давления через фитинги 50. Проводники 40' соединены с матрицей макроскопических структур 5 при помощи проводящих контактных шин 41.

В одном из вариантов осуществления изобретения используется источник электропитания с напряжением 26 В и током 1200 А. В еще одном варианте осуществления изобретения используется источник электропитания с напряжением 5 В и ток 240 А. Ток подается по проводникам 40, 40' к проводящим контактным шинам 41, и ток проходит через структурированный катализатор 10 от одной проводящей контактной шины 41, например, от проводящей контактной шины, которая на фиг. 1а показана слева, до другой проводящей контактной шины 41, например, проводящей контактной шины, которая на фиг. 1а показана справа. Ток может быть переменным и, например, идти попеременно в обоих направлениях, или постоянным и идти в одном из двух направлений.

Макроскопические структуры 5 выполнены из электропроводящего материала. Особенно предпочтительным является сплав кантал, состоящий из алюминия, железа и хрома. Керамическое покрытие, например, оксид, нанесенное на структурированный катализатор 5, пропитано каталитически активным материалом. Проводники 40, 40' выполнены из таких материалов, как железо, алюминий, никель, медь или их сплавы.

В процессе эксплуатации исходный газ поступает в реакторную систему 100 сверху, как обозначено стрелкой 11. Газообразный продукт выходит из реакторной системы снизу, как обозначено стрелкой 12.

На фиг. 1б показана реакторная система 100 фиг. 1а со снятой частью корпуса высокого давления 20 и теплоизоляционным слоем 30, а на фиг. 2 - увеличенный вид части реакторной системы 100. На фиг. 1б и 2 соединения между проводниками 40' и проводящими контактными шинами 41 показаны более понятно, чем на фиг. 1а. Кроме того, видно, что проводники 40 проходят через стенки корпуса высокого давления посредством фитинга 50, и что внутри корпуса высокого давления один проводник 40 разделяется на три проводника 40'. Следует отметить, что может использоваться любое подходящее количество проводников 40', например, меньше трех или больше трех проводников.

В реакторной системе, показанной на фиг. 1а, 1б и 2, проводники 40, 40' проходят через стенку корпуса высокого давления 20, содержащего структурированный катализатор, и через изоляционный материал 30 на внутренней стороне корпуса высокого давления через фитинги 50. Исходный газ для эндотермической реакции подается в реакторную систему 100 через выпускное отверстие в верхней части реакторной системы 100, как показано стрелкой 11, а газообразный продукт выходит из реакторной системы 100 через выпускное отверстие в нижней части реакторной системы 100, как показано стрелкой 12. Более того, рядом с фитингами 50 или в сочетании с фитингами могут быть преимущественно расположены одно или более дополнительных входных отверстий (не показаны на фиг. 1а-2). Такие дополнительные входные отверстия позволяют охлаждающему газу проходить рядом с проводником, вокруг проводника или внутри по меньшей мере одного проводника внутри корпуса высокого давления, что позволяет уменьшить нагрев фитинга. Охлаждающий газ может, например, представлять собой водород, азот, метан или их смеси. Температура охлаждающего газа на входе в корпус высокого давления может составлять, например, около 100°C.

В реакторной системе 100, показанной на фиг. 1а-2, между нижней частью структурированного катализатора 10 и дном корпуса высокого давления преимущественно присутствует инертный материал (не показан на фиг. 1а-2). Более того, инертный материал предпочтительно присутствует между внешними сторонами структурированного катализатора 10 макроскопических структур 5 и изоляционным материалом 30. Таким образом, одна сторона изоляционного материала 30 обращена к внутренней стороне корпуса высокого давления 20, а другая сторона изоляционного материала 30 обращена к инертному материалу. В качестве инертного материала может выступать, например, керамический материал, который может иметь форму гранул. Инертный материал способствует контролю перепада давления в реакторной системе 100 и контролю потока газа через реакторную систему 100, таким образом, чтобы поток газа поступал по поверхностям структурированного катализатора 10.

На фиг. 3а-3г показаны шесть различных сетчатых структур 6, где показана лишь часть сетчатой структуры 6. Макроскопическая структура содержит трехмерную сетчатую структуру 6, где сетчатая структура 6 образует пути прохождения потоков, позволяющие сырьевому газу проходить от передней части 14 (см. фиг. 5) к задней части 15 (см. фиг. 5) макроскопической структуры 5. Сетчатая структура 6

образована металлическим материалом, который является электропроводящим, и который, по меньшей мере, частично, служит подложкой для керамического покрытия, при этом указанное керамическое покрытие выступает в качестве подложки каталитически активного материала. Каждая из шести различных частей сетчатой структуры 6 содержит различные варианты осуществления прорези 60 в сетчатой структуре.

Распределение тока в элементе определяется законом Ома, который для простого проводника с постоянным током звучит как:

$$U = R \cdot I$$

Где  $U$  - потенциал [В],  
 $R$  - сопротивление [ $\Omega$ ] и  
 $I$  - ток [А].

Для трехмерных геометрических форм это можно записать так:

$$E = \rho_{res} \cdot J$$

Где  $E$  - вектор электрического поля [В/м],  
 $\rho_{res}$  удельное сопротивление [ $\Omega \cdot m$ ] и  
 $J$  вектор плотности тока [ $A/m^2$ ].

Сопротивление,  $R$ , по сути, зависит от геометрической формы, где удельное сопротивление является конкретным параметром материала, полученным из сопротивления сечения на значение длины.

$$\rho_{res} = R \cdot \frac{A}{L}$$

Потери термического сопротивления определяются как произведение тока и снижения потенциала по элементу, которое может быть переписано на основе закона Ома в зависимости от регулирования потенциала или тока.

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = R \cdot I^2$$

Ввиду того, что сопротивление  $R$  представляет собой параметр, который зависит от геометрической формы, питание, подаваемое на участок, может регулироваться путем изменения площади сечения.

На фиг. 3a-3f показаны шесть различных способов изменения сечения сетчатой структуры 6 с помощью шести различных примеров прорезей 60. На фиг. 3a показана прорезь 60 в виде сферы, на фиг. 3b показана прорезь 60 в виде диска, на фиг. 3c - прорезь 60 в виде эллипсоида, на фиг. 3d - прорезь 60 в виде капли, на фиг. 3e - прорезь 60 в форме ромба, а на фиг. 3f - ромбовидная прорезь 60.

Прорези 60 могут быть заполнены вырезанным материалом, имеющим более низкую проводимость по сравнению с металлическим материалом, из которой состоит сетчатая структура 6. Вырезанный материал может быть с пустотами (т.е. быть пустым) или твердым.

Фиг. 4a-4b иллюстрируют различные варианты осуществления прорезей 60 сетчатой конструкции 6. Показана только часть сетчатой структуры 6. На фиг. 4a видно, что прорезь 60 сформирована в одной плоскости сетчатой структуры 6, тогда как прорезь 6, изображенная на фиг. 4b, пересекает две плоскости, а прорезь 6, изображенная на фиг. 4c, пересекает три плоскости.

В сечении поперечном продольному направлению сетчатая структура 6 представляет собой часть сечения макроскопической структуры 5. Фракция находится в диапазоне 4-75%. Сетчатая структура состоит по меньшей мере из трех различных сечений, которые в продольном направлении образуют различные фракции.

На приведенных ниже фигурах показаны различные варианты осуществления макроскопической структуры 5 с различными сетчатыми структурами 5. Геометрия каждого из вариантов показана на отдельной фигуре; т.е. на фиг. 5, 7, 9, 11 и 13.

В сечении, поперечном продольному направлению, сетчатая структура 6 представляет собой часть сечения макроскопической структуры 5. Фракция для каждого варианта осуществления показана на отдельном графике на фиг. 6a, 8a, 10a, 12a и 14a соответственно. На данных фигурах фракции показаны в виде относительного металлического сечения.

Для каждого из вариантов осуществления на фиг. 6b, 8b, 10b, 12b и 14b показано относительное изменение площади сечения сетчатой структуры на единицу длины, при этом в данном случае единица представляет собой единую макроскопическую структуру. Сечение примерно аналогично распределению плотности тока, определяемому по закону Ома. Это также показано на отдельных фигурах для некоторых структур на основе моделирования с использованием ПО Comsol; см. фиг. 6c, 8c, 10c, 12c и 14c.

Фиг. 5 иллюстрирует вариант осуществления макроскопической структуры 5, в которой сетчатая структура 6 содержит множество прорезей 60. Все прорези 60 имеют сферическую форму и заполнены твердым вырезанным материалом. Прорези 60 пересекают внутренние стенки 61 сетчатой конструкции 6. Множество внутренних стенок 61 образует множество каналов 62 для прохождения потока от перед-

ней части 14 к задней части 15. В продемонстрированном варианте осуществления сетчатая структура образует множество параллельных каналов 62. Множество внутренних стенок 61 располагается во внутреннем пространстве, образованном кольцевой стенкой 63. В продемонстрированном варианте кольцевая стенка не имеет прорезей.

Сопротивление указанной макрокопической конструкции 5 составляет 220% по сравнению с макрокопической структурой с параллельными каналами потока без сферических прорезей 60. Расчеты показали, что 51% общего объема макрокопической структуры - выше 5% средней плотности тока, а 32% - ниже. В точке с пиковым током плотность тока превышает общее среднее значение на 173%.

На фиг. 6а показано относительное металлическое сечение варианта осуществления макрокопической структуры 5, показанного на фиг. 5. Как показано на фигуре, фракция для этого варианта осуществления находится в диапазоне от 17 до 30%, охватывая все возможные значения указанного диапазона, что обусловлено непрерывным характером кривых. По протяженности структуры фракция демонстрирует непрерывно непостоянное поведение на более чем 90% продольного направления.

На фиг. 6б показано относительное изменение площади сечения на единицу длины по варианту осуществления макрокопической структуры 5, показанному на фиг. 5. Как показано на фигуре, сечение может изменяться до 80% в пределах 1 мм длины макрокопической структуры 5.

На фиг. 6с показана плотность тока макрокопической структуры 5, смоделированная ПО Comsol. Это демонстрирует, как прорези 60 способствуют увеличению плотности тока в оставшейся части сетчатой структуры 6. Масштаб фигуры представляет собой относительную шкалу от 1 до 0 с использованием пикового тока в качестве значения нормализации.

Фиг. 7 иллюстрирует вариант осуществления макрокопической структуры 5, в которой сетчатая структура 6 содержит множество прорезей 60. Прорези 60 представляют собой округлые каналы, расположенные перпендикулярно продольному направлению макрокопической структуры. В этом варианте осуществления изобретения прорези 60 не заполнены. Во время использования пустоты 60 (пустые прорези) будут заполняться газом, проходящим через макрокопическую структуру 5. Прорези 60 пересекают внутренние стенки 61 сетчатой конструкции 6. Ряды прорезей 60 чередуются с двумя каналами и тремя каналами соответственно.

Сопротивление указанной макрокопической конструкции 7 составляет 142% по сравнению с макрокопической структурой с параллельными каналами потока без прорезей 60. Расчеты показали, что 46% общего объема макрокопической структуры превышает 5% средней плотности тока, а 30% - ниже. В точке с пиковым током плотность тока превышает общее среднее значение на 109%.

Множество внутренних стенок 61 образует множество каналов 62 для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15. В продемонстрированном варианте осуществления сетчатая структура образует множество параллельных каналов 62. Множество внутренних стенок 61 располагается во внутреннем пространстве, образованном кольцевой стенкой 63. В показанном варианте осуществления кольцевая стенка 63 также содержит прорези 60, поскольку каналы 60 идут от одной стороны макрокопической структуры 5 к противоположной стороне.

На фиг. 8а показано относительное металлическое сечение варианта осуществления макрокопической структуры 5, показанного на фиг. 7. Как показано на фигуре, фракция для этого варианта осуществления находится в диапазоне от 17 до 30%. По протяженности структуры фракция демонстрирует непрерывно непостоянное поведение на более чем 60% продольного направления.

На фиг. 8б показано относительное изменение площади сечения на единицу длины по варианту осуществления макрокопической структуры 5, показанному на фиг. 7. Как показано на фигуре, сечение может изменяться до 60% в пределах 1 мм длины макрокопической структуры 5.

На фиг. 8с показана плотность тока макрокопической структуры 5, смоделированная ПО Comsol. Это демонстрирует, как прорези 60 способствуют увеличению плотности тока в оставшейся части сетчатой структуры 6. Масштаб фигуры представляет собой относительную шкалу от 1 до 0 с использованием пикового тока в качестве значения нормализации.

Фиг. 9 иллюстрирует вариант осуществления макрокопической структуры 5, в которой сетчатая структура 6 содержит множество прорезей 60. Прорези 60 представляют собой округлые каналы, расположенные перпендикулярно продольному направлению макрокопической структуры. В этом варианте осуществления изобретения прорези 60 не заполнены. Прорези 60 пересекают внутренние стенки 61 сетчатой конструкции 6. Вариант осуществления аналогичен варианту осуществления, показанному на фиг. 7, за исключением того, что все прорези 60 в данном варианте осуществления расположены рядами по два канала в каждом.

Сопротивление указанной макрокопической конструкции 9 составляет 125% по сравнению с макрокопической структурой с параллельными каналами для потока без прорезей 60. Расчеты показали, что 63% общего объема макрокопической структуры превышает 5% средней плотности тока, а 23% - ниже. В точке с пиковым током плотность тока превышает общее среднее значение на 96%.

Множество внутренних стенок 61 образует множество каналов 62 для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15. В продемонстрированном варианте осуществления сетчатая структура образует множество параллельных каналов 62. Множество внутренних стенок 61 располагается во внут-

реннем пространстве, образованном кольцевой стенкой 63. В показанном варианте осуществления кольцевая стенка 63 также содержит прорези 60, поскольку каналы 60 идут от одной стороны макрокопической структуры 5 к противоположной стороне.

На фиг. 10a показано относительное металлическое сечение варианта осуществления макрокопической структуры 5, показанного на фиг. 9. Как показано на фигуре, фракция для этого варианта осуществления находится в диапазоне от 21 до 30%.

На фиг. 10b показано относительное изменение площади сечения на единицу длины по варианту осуществления макрокопической структуры 5, показанному на фиг. 9. Как показано на фигуре, сечение может изменяться до 20% в пределах 1 мм длины макрокопической структуры 5.

На фиг. 10c показана плотность тока макрокопической структуры 5, смоделированная ПО Comsol. Это демонстрирует, как прорези 60 способствуют увеличению плотности тока в оставшейся части сетчатой структуры 6. Масштаб фигуры представляет собой относительную шкалу от 1 до 0 с использованием пикового тока в качестве значения нормализации.

На фиг. 11 показан вариант осуществления макрокопической структуры 5, в которой сетчатая структура 6 выполнена в виде ячеек сетки.

Сопротивление указанной макрокопической конструкции 11 составляет 304% по сравнению с макрокопической структурой с параллельными каналами для потока без прорезей 60. Расчеты показали, что 71% общего объема макрокопической структуры превышает 5% средней плотности тока, а 24% - имеют меньшее значение. В точке с пиковым током плотность тока превышает общее среднее значение на 389%.

Сетка 6 образует множество каналов 62 для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15. Сетка 6 располагается во внутреннем пространстве, образованном кольцевой стенкой 63. Для целей наглядности одна часть кольцевой стенки 63 удалена.

На фиг. 12a показано относительное металлическое сечение варианта осуществления макрокопической структуры 5, показанного на фиг. 11. Как показано на фигуре, фракция для этого варианта осуществления находится в диапазоне от 10,5 до 16%.

На фиг. 12b показано относительное изменение площади сечения на единицу длины по варианту осуществления макрокопической структуры 5, показанному на фиг. 11. Как показано на фигуре, сечение может изменяться до 25% в пределах 1 мм длины макрокопической структуры 5.

На фиг. 12c показана плотность тока макрокопической структуры 5, смоделированная ПО Comsol. Это демонстрирует, как прорези 60 способствуют увеличению плотности тока в оставшейся части сетчатой структуры 6. Масштаб фигуры представляет собой относительную шкалу от 1 до 0 с использованием пикового тока в качестве значения нормализации.

На фиг. 13 показан вариант осуществления макрокопической структуры 5, в которой сетчатая структура 6 выполнена в виде ячеек сетки. Сетка 6 образует множество каналов для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15. Сетка 6 соединена с манифольдом 65 в передней части 14 и задней части 15. В данном варианте осуществления макрокопическая структура 5 не содержит кольцевую стенку.

Сопротивление указанной макрокопической конструкции 13 составляет 1087% по сравнению с макрокопической структурой с параллельными каналами для потока без прорезей 60. Расчеты показали, что 36% общего объема макрокопической структуры превышает 5% средней плотности тока, а 55% - имеют меньшее значение. В точке с пиковым током плотность тока превышает общее среднее значение на 791%.

На фиг. 14a показано относительное металлическое сечение варианта осуществления макрокопической структуры 5, показанного на фиг. 13. Как показано на фигуре, фракция для этого варианта осуществления находится в диапазоне от 4 до 75%.

На фиг. 14b показано относительное изменение площади сечения на единицу длины по варианту осуществления макрокопической структуры 5, показанному на фиг. 13. Как показано на фигуре, сечение может изменяться до 50% в пределах 1 мм длины ячеистой структуры 6. Изменение составляет более 100%/мм участка между ячеистой сеткой 6 и манифольдом 65 в передней части 14 и участка между ячеистой сеткой 6 и манифольдом 65 в задней части 15.

На фиг. 14c показана плотность тока макрокопической структуры 5, смоделированная ПО Comsol. Это демонстрирует, как ячеистая сетчатая структура 6 способствуют увеличению плотности тока в оставшейся части сетчатой структуры 6. Масштаб фигуры представляет собой относительную шкалу от 1 до 0 с использованием пикового тока в качестве значения нормализации.

На фиг. 15 показано увеличение относительного сопротивления представленных вариантов осуществления на фиг. 5, 7, 9, 11 и 13 по сравнению с макрокопической структурой с параллельными каналами потока без сетчатой структуры с изменяющимися фракциями. Очевидно, что использованием предусмотренных изобретением, позволяет получить более высокие значения сопротивления от +25% до +1000%. Моделирование значений сопротивления выполнялось с использованием ПО Comsol. В ходе моделирования используется удельное сопротивление 134 мкОм·см (соответствует использованию кантала).

На фиг. 16а и 16б показаны различные виды варианта осуществления структурированного катализатора 10, включающего в себя две макроскопические структуры 5, каждая из которых предполагает наличие в своем составе сетчатой структуры 6, которая образует множество внутренних стенок 61.

Множество внутренних стенок 61 образует множество каналов 62 для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15. На фиг. 16а показаны каналы сверху (от передней части 14), в то время как на фиг. 16б показаны каналы снизу (от задней части 15).

В показанном варианте осуществления макроскопические структуры 5 соединены друг с другом в задней части 15 без использования отдельной перемычки для соединения двух макроскопических структур 5, поскольку макроскопические структуры 5 соединены друг с другом в задней части 15. Как показано на фиг. 16б, внутренние стенки 62 толще в задней части, чем в передней. Такие более толстые стенки активно охлаждаются газовым потоком с обеих сторон в каналах 62.

Фиг. 17 иллюстрирует вариант осуществления структурированного катализатора 10, содержащего две макроскопические структуры 5, каждая из которых содержит сетчатую структуру 6, которая образует множество внутренних стенок 61. Множество внутренних стенок 61 образует множество каналов 62 для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15.

В показанном варианте осуществления макроскопическая структура 5 соединена с другими структурами в задней части 15 с помощью множества отдельных перемычек 66, соединяющих левую сторону одной макроскопической структуры 5 с правой стороной прилегающих макроскопических структур 5.

В показанном варианте осуществления каналы 62 потока преимущественно параллельны на некоторых участках в продольном направлении, в то время как направление и/или площадь сечения, по меньшей мере, некоторых из каналов 62 потока изменяются по продольному направлению на других участках. Как видно в верхней части макроскопических структур 5, толщина стенок некоторых каналов потока больше, чем толщина стенок других каналов потока, в результате чего макроскопические структуры 5 имеют внутренние стенки с неравномерной толщиной стенок. Изменяя направление и/или площадь сечения по меньшей мере части внутренней стенки 61, можно также изменять площадь сечения макроскопической структуры в продольном направлении. Высота различных участков в продольном направлении может варьироваться аналогичным образом.

На фиг. 18а-18с представлены различные сечения варианта осуществления, показанного на фиг. 17. На фиг. 18а показано сечение структурированного катализатора вверху в районе передней части 14. Более толстые стенки 61 позволяют обеспечить лучшее распределение тока через данный участок макроскопической структуры 5. На фиг. 18а показано сечение структурированного катализатора в средней части. Равномерная толщина стенок 61 на данном участке позволяет обеспечить равномерный нагрев данного участка макроскопической конструкции 5. На фиг. 18а показано сечение структурированного катализатора внизу в районе задней части 15. Более толстые стенки 61 позволяют обеспечить лучшее распределение тока через данный участок макроскопической структуры 5.

На фиг. 18d показано относительное металлическое сечение варианта осуществления, представленного на фиг. 17. Как показано на фигуре, фракция для этого варианта осуществления находится в диапазоне от 42 до 100%.

На каждой из фиг. 19а-22б структурированный катализатор 10 содержит первую макроскопическую структуру 5А и вторую макроскопическую структуру 5В, каждая из которых проходит в продольном направлении от передней части 14 к задней части 15, где передняя часть 14 образует вход в макроскопическую структуру 10 для исходного газа, а задняя часть 15 образует выход для газообразного продукта.

В состав первой и второй макроскопических структур 5А, 5В входит трехмерная сетчатая структура (см. фиг. 19а), которая отличается тем, что сетчатая структура образует пути потока, позволяющие исходному газу проходить от передней части 14 к задней части 15. Как показано в левой части фиг. 19а по меньшей мере часть сетчатой структуры образует множество параллельных каналов 62 потока. Тем не менее, следует понимать, что по меньшей мере некоторые из каналов могут быть непараллельными.

Каналы 62 потока показаны только на левой стороне фиг. 19а. В остальных частях фиг. 19а-33b отверстия в сетчатой структуре, такие как каналы потока, прорези, щели и т.д. не показаны.

Вторая макроскопическая структура 5В расположена по окружности вокруг первой макроскопической структуры 5А, и первая и вторая макроскопические структуры 5А, 5В электрически соединены в задней части 15. Структурированный катализатор 10 разработан таким образом, чтобы направлять электрический ток через первую макроскопическую структуру 5А от передней части 14 к задней части 15, а затем через вторую макроскопическую структуру 5В от задней части 15 к передней части 14, обеспечивая электрическое соединение первой и второй макроскопических структур 5А, 5В в задней части 15.

В показанных вариантах осуществления вторая макроскопическая структура 5В представляет собой удлиненную структуру, которая вытянута в продольном направлении от передней части 14 к задней части 15. Вторая макроскопическая структура 5В является полой и, таким образом, полностью окружает первую макроскопическую структуру 5А, при этом внутренняя поверхность второй макроскопической структуры 5В обращена к внешней поверхности первой макроскопической структуры 5А.

Следует понимать, что в альтернативном варианте осуществления (не показано) вторая макроскопическая структура может располагаться по окружности частично вокруг первой макроскопической

структуры, в результате чего часть внутренней поверхности второй макрокопической структуры обращена к части внешней поверхности первой макрокопической структуры.

Первая и вторая макрокопические структуры 5А, 5В по меньшей мере частично выступают в качестве подложки для керамического покрытия, на которое нанесен каталитически активный материал.

На фиг. 19а в состав структурированного катализатора 10 входит первая макрокопическая структура 5А и вторая макрокопическая структура 5В, каждая из которых простирается в продольном направлении от передней части 14 к задней части 15. Каждая из первой и второй макрокопических структур 5А, 5В образует круглую внешнюю форму в сечении, перпендикулярном продольному направлению.

На фиг. 19б показано поперечное сечение через вариант осуществления структурированного катализатора 10, как показано на фиг. 19а. Каналы 62 потока четко видны в левой части сечения. Кроме того, сечения четко свидетельствуют о том, что первая и вторая макрокопические структуры 5А, 5В соединены в задней части 15.

На фиг. 20 в состав структурированного катализатора 10 входит первая макрокопическая структура 5А и вторая макрокопическая структура 5В, каждая из которых простирается в продольном направлении от передней части 14 к задней части 15. Каждая из первой и второй макрокопических структур 5А, 5В образует квадратную внешнюю форму в сечении, перпендикулярном продольному направлению. В сечении справа четко видно, что первая и вторая макрокопические структуры 5А, 5В соединены в задней части 15.

На фиг. 21 в состав структурированного катализатора 10 входит первая макрокопическая структура 5А и вторая макрокопическая структура 5В, каждая из которых простирается в продольном направлении от передней части 14 к задней части 15. Каждая из первой и второй макрокопических структур 5А, 5В образует органическую внешнюю форму в сечении, перпендикулярном продольному направлению. В сечении справа четко видно, что первая и вторая макрокопические структуры 5А, 5В соединены в задней части 15.

На фиг. 22а представлены два варианта осуществления структурированного катализатора 10, каждый из которых предусмотрено наличие первой макрокопической структуры 5А и второй макрокопической структуры 5В, каждая из которых простирается в продольном направлении от передней части 14 к задней части 15. Каждая из первой и второй макрокопических структур 5А, 5В слева образует шестиугольную внешнюю форму в сечении, перпендикулярном продольному направлению, в то время как каждая из первой и второй макрокопических структур 5А, 5В справа образует треугольную внешнюю форму в сечении перпендикулярно продольному направлению.

На фиг. 22б показаны сечения вариантов осуществления структурированного катализатора 10, отображенного на фиг. 22а. Сечения четко свидетельствуют о том, что первая и вторая макрокопические структуры 5А, 5В соединены в задней части 15.

На фиг. 23а показан вариант осуществления макрокопической структуры 5, в которой сетчатая структура 6 выполнена в виде ячеек сетки. Сетка 6 образует множество каналов для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15. Сетка 6 соединена с манифольдом 65 в передней части 14 и задней части 15. В данном варианте осуществления макрокопическая структура 5 не содержит кольцевую стенку. Показанный вариант аналогичен варианту, приведенному на фиг. 13, с более плотной сеткой 6.

На фиг. 23б показан вариант осуществления структурированного катализатора 10, включающего в себя две макрокопические структуры 5, которые соединены в передней части 14 и образуют U-образный структурированный катализатор 10. Сетчатая структура 6 каждой из макрокопических структур 5 представлена в виде ячеек. Ячеистая сетка 6 образует множество каналов для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15. Радиальный и осевой размеры сетчатой структуры 6 изменяются в продольном направлении структурированного катализатора 10. В средней части каждой из макрокопических структур 5 ячеистая сетка 6 аналогична сетке варианта осуществления, показанного на фиг. 23а. Эффективное управление током в сетчатых структурах 6 осуществляется за счет изменения сетчатой структуры 6 в осевом и радиальном направлениях.

Фиг. 24 иллюстрирует вариант осуществления структурированного катализатора 10, содержащего две макрокопические структуры 5, соединенные в задней части 15 интегрированной перемычкой 66. В состав каждой из макрокопических структур 5 входит сетчатая структура 6, которая образует множество внутренних стенок 61. Множество внутренних стенок 61 образует множество существенно параллельных каналов 62 для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15. Каналы 62 потока расположены во внутреннем пространстве, образованном кольцевой стенкой 63.

Кольцевая стенка 63 не доходит до нижней части макрокопических структур 5, чтобы, таким образом, свести к минимуму плотность тока в задней части (внизу) и облегчить его охлаждение. В передней части (сверху) структурированный катализатор 10 содержит два проводника 40, обеспечивающих подключение к источнику электропитания.

На фиг. 25 показан вариант осуществления макрокопической структуры 5, и множество матриц макрокопических структур 5. Каждая из макрокопических структур 5 проходит от передней части 14 до задней части 15. Каждая из макрокопических структур 5 содержит сетчатую структуру 6, которая

образует множество внутренних стенок 61. Множество внутренних стенок 61 образует множество существенно параллельных каналов 62 для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15. Каналы 62 потока расположены во внутреннем пространстве, образованном кольцевой стенкой 63.

В первом варианте осуществления слева показана одна макроскопическая структура 5.

Во втором варианте осуществления две макроскопические структуры 5 соединены друг с другом в задней части 15, при этом ток может проходить от передней части 14 к задней части 15 одной из макроскопических структур 5 и впоследствии от задней части 15 к передней части 15 другой макроскопической структуры 5.

В третьем варианте осуществления матрица содержит четыре макроскопические структуры 5, аналогичные другим макроскопическим структурам 5, предусмотренным первым и вторым вариантами осуществления и показанными на фиг. 25. Вторая макроскопическая структура 5 соединена с третьей макроскопической структурой 5 в передней части 14, а третья макроскопическая структура 5 соединена с четвертой макроскопической структурой 5 в задней части 15.

В четвертом варианте матрица содержит множество макроскопических структур 5, расположенных в форме блока. Некоторые из макроскопических структур 5 соединены с соседней макроскопической структурой 5 в передней части 14, тогда как некоторые макроскопические структуры 5 соединены с соседней макроскопической структурой 5 в задней части 15. Четвертый вариант осуществления дополнительно предусматривает множество прорезей 60 в виде щелей.

Во всех четырех вариантах поток газа пропорционально распределен от передней части 14 к задней части 15.

На фиг. 26 показаны различные варианты осуществления структурированного катализатора 10. Структурированный катализатор 10 содержит макроскопическую структуру 5 в виде множества пластинчатых элементов 5', таким образом, образуя сетчатую структуру 6, которая формирует множество внутренних стенок 61. Множество внутренних стенок 61 образует множество каналов 62 для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15.

В верхнем варианте осуществления каждый из пластинчатых элементов 5' соединен со стержнеподобными электропроводящими элементами 67, при этом элементы 67 соединены с электропроводящими элементами 67, выступающими из внутреннего пространства, что обеспечивает соединение с соседним структурированным катализатором для образования матрицы.

В двух нижних вариантах осуществления макроскопическая структура 5 имеет форму пластинчатого элемента 5', который изогнут с образованием множества внутренних стенок 61.

В нижнем левом варианте осуществления пластинчатый элемент 5' соединен с стержнеподобными электропроводящими элементами 67, выступающими из внутреннего пространства через низ, что обеспечивает соединение со структурированным катализатором для образования матрицы. В нижнем правом варианте осуществления пластинчатый элемент 5' соединен с стержнеподобными электропроводящими элементами 67, выступающими из внутреннего пространства в направлении, поперечном продольному, что обеспечивает соединение с соседним структурированным катализатором для образования матрицы.

В пластинчатых элементах могут быть устроены одна или более прорезей, таких как щели и/или сквозные отверстия различной формы (см. фиг. 28).

На фиг. 27 представлен вариант осуществления структурированного катализатора 10. Структурированный катализатор 10 аналогичен вариантам осуществления, представленным на фиг. 26, которые включают в себя макроскопическую структуру 5 в виде множества пластинчатых элементов 5'. В пластинчатых элементах могут быть устроены одна или более прорезей в виде пластинчатых элементов (см. фиг. 28).

На противоположных краях изогнутого пластинчатого элемента 5' предусмотрены углубления 68 для облегчения монтажа структурированного катализатора 10 в реакторе (см., например, фиг. 1а).

На фиг. 28 показан другой пластинчатый элемент 5', который можно использовать в качестве макроскопической структуры 5 или частей макроскопической структуры в структурированных катализаторах в соответствии с раскрытым вариантом осуществления изобретения. Пластинчатые элементы 5' могут быть расположены в виде пластин, простирающихся преимущественно от передней части к задней части (см., например, верхний вариант осуществления, показанный на фиг. 26). В качестве альтернативы, пластинчатые элементы 5' могут быть согнуты, при этом изогнутый элемент может проходить преимущественно от передней части к задней части (см., например, нижние варианты осуществления, представленные на фиг. 26, или вариант осуществления, показанный на фиг. 27).

Как показано, пластинчатые элементы 5' могут иметь одну или более прорезей 60 в виде щелей и/или сквозных отверстий различной формы. В верхних вариантах осуществления прорези выполнены в виде небольших сквозных отверстий, что сформировать мелкую сетку. Во втором варианте осуществления прорези выполнены в виде двух рядов одинаковых ромбовидных сквозных отверстий. В третьем варианте осуществления прорези выполнены в виде щелей, чередующихся от противоположных краев пластинчатого элемента 5', где щели заканчиваются круглым сквозным отверстием. В четвертом варианте осуществления прорези выполнены в виде двух рядов удлиненных сквозных отверстий, причем длина сквозных отверстий различается, так как первый ряд содержит более длинные сквозные отверстия, чем

второй. В пятом варианте прорези выполнены в виде круглых сквозных отверстий одинакового размера. Прорези выполнены в два преимущественно параллельных ряда и расположены зигзагообразно.

Следует понимать, что размер и форма прорези могут варьироваться, а приведенные варианты осуществления приведены в качестве примеров. Различные прорези, представленные в пяти различных вариантах осуществления, могут объединяться для получения пластинчатого элемента 5' с прорезями иной формы, например, ромбовидная прорезь может объединяться со щелями и/или круглыми прорезями.

Кроме того, следует понимать, что верхний вариант осуществления, представленный на фиг. 26, может, например, включать в себя множество одинаковых пластинчатых элементов 5' или множество пластинчатых элементов, из которых по меньшей мере два элемента отличаются друг от друга.

На фиг. 29а и 29б показан другой пластинчатый элемент 5', который можно использовать в качестве макроскопической структуры 5 или частей макроскопической структуры в структурированных катализаторах в соответствии с раскрытым вариантом осуществления изобретения. Пластинчатый элемент 5' может включать в себя прорези, например, показано на фиг. 28.

На фиг. 29а показано сечение, поперечное продольному направлению пластинчатых элементов 5', которые свернуты в спираль. Пластинчатые элементы 5' соединены со стержнеподобными электропроводящими элементами 67, что обеспечивает соединение с источником электропитания.

На фиг. 29б показано сечение, которое расположено в продольном направлении пластинчатых элементов 5', которые приобретают рифленую форму. В верхнем варианте осуществления рифленые элементы имеют более острые углы, чем в среднем варианте осуществления. Нижний вариант осуществления аналогичен среднему варианту, но предусматривает добавление плоского элемента, прикрепленного к рифленому элементу.

Указанные рифленые элементы 5' могут использоваться, например, в вариантах осуществления, показанных на фиг. 26 и 27. Кроме того, следует понимать, что спиралевидные элементы 5' на фиг. 29а также могут быть рифлеными; то есть вариант осуществления, показанный на фиг. 29а, образован одним из вариантов осуществления, показанных на фиг. 29б. За счет рифления спиралевидного элемента 5' электропроводящий материал может образовывать большую площадь сечения.

На фиг. 30а показана внутренняя стенка 61 для использования в качестве части макроскопической структуры 5. Внутренняя стенка 61 содержит множество прорезей 60 в виде щелей, отходящих от противоположных краев, а также множество круглых сквозных отверстий, при этом прорези 60 составляют 4-75% площади сечения внутренней стенки.

На фиг. 30б представлены четыре внутренние стенки 61, как показано на фиг. 30а, где внутренние стенки 61 прикреплены к кольцевой стенке 63. Множество внутренних стенок 61 образует множество существенно параллельных каналов 62 для прохождения потока от передней части 14 к задней части 15. Каналы 62 потока расположены во внутреннем пространстве, образованном кольцевой стенкой 63. Из внутренних стенок 61, по меньшей мере, 3 имеют разную площадь сечения.

Предусмотрены следующие пункты с соответствующей нумерацией:

Пункт 1. Структурированный катализатор для катализа эндотермической реакции исходного газа с целью его преобразования в газообразный продукт, при этом указанный структурированный катализатор содержит по меньшей мере одну макроскопическую структуру, расположенную в продольном направлении от передней части к задней части, причем указанная передняя часть образует входное отверстие в указанную макроскопическую структуру для указанного исходного газа, а указанная задняя часть образует выходное отверстие для указанного газообразного продукта, причем указанная макроскопическая структура образует каналы потока, обеспечивая течение исходного газа из указанной передней части в указанную заднюю часть, причем сетчатая структура образована металлическим материалом, который является электропроводящим и по меньшей мере частично служит подложкой для керамического покрытия, при этом керамическое покрытие служит подложкой для каталитически активного материала, причем сетчатая структура в сечении, поперечном продольному направлению, представляет собой фракцию сечения макроскопической структуры, при этом фракция находится в диапазоне 4-75%, при этом сетчатая структура по меньшей мере в трех различных поперечных сечениях в продольном направлении представляет собой различные фракции.

Пункт 2. Структурированный катализатор по п.1, отличающийся тем, макроскопическая структура дополнительно содержит кольцевую стенку, образующую внутреннее пространство, при этом кольцевая стенка образована металлическим материалом, который является электропроводящим, и причем сетчатая структура расположена во внутреннем пространстве.

Пункт 3. Структурированный катализатор по п.1, отличающийся тем, макроскопическая структура дополнительно содержит кольцевую стенку, образующую внутреннее пространство, при этом кольцевая стенка образована материалом, который не является электропроводящим, и причем сетчатая структура расположена во внутреннем пространстве.

Пункт 4. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что сечение сетчатой структуры составляет по меньшей мере 4, предпочтительно 5, более предпочтительно 6, более предпочтительно 7, более предпочтительно 8, более предпочтительно 9, более предпочтительно 10, более предпочтительно 11 и наиболее предпочтительно 12 фракций в продольном направлении.

Пункт 5. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что сечение сетчатой структуры является непрерывно непостоянным на совокупном расстоянии по меньшей мере 10%, предпочтительно 20%, более предпочтительно 30%, более предпочтительно 40%, более предпочтительно 50%, более предпочтительно 60%, более предпочтительно 70%, более предпочтительно 80% и наиболее предпочтительно 90% длины макроскопической структуры в продольном направлении.

Пункт 6. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что сечение сетчатой структуры является непрерывно непостоянным на совокупном расстоянии по меньшей мере 10%, предпочтительно 20%, более предпочтительно 30%, более предпочтительно 40%, более предпочтительно 50%, более предпочтительно 60%, более предпочтительно 70%, более предпочтительно 80% и наиболее предпочтительно 90% длины макроскопической структуры в направлении, поперечном продольному.

Пункт 7. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что сетчатая структура содержит множество прорезей.

Пункт 8. Катализатор по п.7, отличающийся тем, что прорези могут быть заполнены вырезанным материалом, имеющим более низкую проводимость по сравнению с металлическим материалом.

Пункт 9. Катализатор по п.7 или 8, отличающийся тем, что вырезанный материал представляет собой твердый материал.

Пункт 10. Структурированный катализатор по п.9, твердый материал обладает термомеханическими свойствами, которые по сути аналогичны термомеханическим свойствам металлического материала, образующего сетчатую структуру.

Пункт 11. Катализатор по п.7, отличающийся тем, что первая подгруппа прорезей заполнена воздухом, и причем вторая подгруппа прорезей заполнена твердым материалом.

Пункт 12. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что по меньшей мере часть сетчатой структуры образует множество параллельных каналов потока.

Пункт 13. Структурированный катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что изменение фракции составляет менее чем 500% на мм в продольном направлении, предпочтительно менее чем 100%/мм, и еще более предпочтительно менее чем 50%/мм.

Пункт 14. Структурированный катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что макроскопическую(-ие) структуру(-ы) получают с использованием 3D-печати.

Пункт 15. Структурированный катализатор по любому из пп.1-3, отличающийся тем, что макроскопическую(-ие) структуру(-ы) получают путем гибки, резки и/или сварки листового металла.

Пункт 16. Структурированный катализатор по любому из пп.2-15, отличающийся тем, что кольцевая стенка не содержит отверстий, поперечных продольному направлению.

Пункт 17. Структурированный катализатор по любому из предшествующих пунктов, содержащий две или более макроскопических структур, причем по меньшей мере две макроскопические структуры электрически соединены.

Пункт 18. Структурированный катализатор по любому из предшествующих пунктов, две соседние макроскопические структуры могут быть изготовлены с помощью 3D-печати как одно целое, что позволяет обеспечить электрическое соединение между двумя макроскопическими структурами на минимальном удалении от передней или задней части указанных структур.

Пункт 19. Структурированный катализатор по любому из пп.17-18, отличающийся тем, что вторая макроскопическая структура расположена по меньшей мере частично по окружности вокруг первой макроскопической структуры.

Пункт 20. Структурированный катализатор по п.19, отличающийся тем, что первая и вторая макроскопические структуры электрически соединены в задней части.

Пункт 21. Структурированный катализатор по любому из пп.19-20, отличающийся тем, что внешняя поверхность первой макроскопической структуры совпадает по форме с внутренней поверхностью второй макроскопической структуры.

Пункт 22. Структурированный катализатор по п.21, отличающийся тем, что внешняя поверхность первой макроскопической структуры в сечении, поперечном продольному направлению, является преимущественно круглой.

Пункт 23. Структурированный катализатор по любому из пп.19-22, отличающийся тем, что первая и вторая макроскопические структуры расположены преимущественно соосно.

Пункт 24. Структурированный катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что по меньшей мере одна макроскопическая структура содержит элементы для распределения потока, и причем такие элементы направления потока печатаются на 3D-принтере и являются неотъемлемой частью макроскопической структуры.

Пункт 25. Структурированный катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что по меньшей мере одна макроскопическая структура содержит соединительную секцию, которая позволяет непосредственно закрепить электрическое соединение, при этом указанная соединительная секция печатается на 3D-принтере и является частью макроскопической структуры.

Пункт 26. Структурированный катализатор по любому из предшествующих пунктов, содержащий

по меньшей мере две макроскопические структуры, отличающиеся тем, что макроскопические структуры содержат параллельные внешние секции, обеспечивая, таким образом, геометрическое соединение в продольном направлении или в направлении, поперечном продольному.

Пункт 27. Структурированный катализатор по п.26, отличающийся тем, что две макроскопические структуры скреплены путем сварки, пайки или механического прессования.

Пункт 28. Структурированный катализатор по любому из пп.7-27, отличающийся тем, что, например, хотя бы одна из прорезей имеет форму из фигур следующей группы: шар, диск, эллипсоид, капля, спираль и многогранник, такой как параллелепипед, пирамида, ромб.

Пункт 29. Структурированный катализатор по любому из пп.7-28, отличающийся тем, что по меньшей мере две прорези имеют различную форму и/или очертание.

Пункт 30. Структурированный катализатор по любому из пп.2-29, содержащий по меньшей мере две макроскопические структуры, отличающийся тем, что толщина кольцевой стенки на участке, обеспечивающем электрическое соединение со второй макроскопической структурой, на 25%, предпочтительно на 50%, еще более предпочтительно на 100%, и еще более предпочтительно на 200% выше средней толщины кольцевой стенки.

Пункт 31. Структурированный катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что металлический материал представляет собой сплав, в состав которого входит одно или более веществ из группы, включающей в себя Fe, Cr, Al, Co, Ni, Zr, Cu, Ti, Mn и Si.

Пункт 32. Структурированный катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что катализатор содержит одну или более матриц, каждая из которых содержит первую и вторую макроскопические структуры, отличающийся тем, что:

а) первая и вторая макроскопические структуры содержат трехмерную сетчатую структуру;

б) матрица содержит по меньшей мере первый и второй проводники, электрически соединенные с указанной первой и второй макроскопическими структурами, соответственно, и с источником электропитания, причем указанный источник электропитания рассчитан на нагрев по меньшей мере части указанных первой и второй макроскопических структур до температуры по меньшей мере 500°C путем пропускания электрического тока через указанную макроскопическую структуру, и причем проводники соединены в соответствующих положениях в составе макроскопической структуры ближе к указанной передней части, чем к указанной задней части,

с) указанные первая и вторая макроскопические структуры электрически соединены перемычкой из электропроводящего материала, и

д) матрица выполнена с возможностью направления электрического тока от первого проводника через первую макроскопическую структуру к указанной задней части, после чего через перемычку и затем через вторую макроскопическую структуру ко второму проводнику.

Пункт 33. Структурированный катализатор по п.32, отличающийся тем, что второй проводник не напрямую электрически соединен со второй макроскопической структурой.

Пункт 34. Структурированный катализатор по п.33, отличающийся тем, что матрица дополнительно содержит (i) одну или более расположенных вблизи друг от друга дополнительных промежуточных макроскопических структур и (ii) одну концевую макроскопическую структуру, при этом каждая дополнительная промежуточная макроскопическая структура соединена по меньшей мере с двумя расположенными вблизи макроскопическими структурами при помощи перемычки из электропроводящего материала, при этом концевая макроскопическая структура соединена по меньшей мере с одной смежной макроскопической структурой, а второй проводник соединен с концевой макроскопической структурой на концевой макроскопической структуре в положении, которое находится ближе к указанной передней части, чем к указанной задней части.

Пункт 35. Структурированный катализатор по любому из пп.32-34, отличающийся тем, что по меньшей мере для двух соседних макроскопических структур характерно различное изменение фракции в продольном направлении.

Пункт 36. Реакторная система для осуществления эндотермической реакции исходного газа, при этом указанная реакторная система содержит:

а) структурированный катализатор в соответствии с пп.1-35;

б) корпус высокого давления, в котором находится указанный структурированный катализатор, при этом указанный корпус высокого давления содержит входное отверстие для подачи исходного газа и выходное отверстие для отвода газообразного продукта, причем указанное входное отверстие расположено таким образом, что указанный исходный газ поступает в переднюю часть указанного структурированного катализатора, а газообразный продукт выходит из задней части указанного катализатора; и

с) теплоизоляционный слой между указанным структурированным катализатором и указанным корпусом высокого давления.

Пункт 37. Применение структурированного катализатора по любому из пп.1-35 или реактора по п.36, отличающееся тем, что эндотермическая реакция выбрана из группы, включающей паровой риформинг метана, образование цианистого водорода, крекинг метанола, крекинг аммиака, обратную конверсию водяного газа и дегидрирование.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Катализатор для катализа эндотермической реакции исходного газа с целью его преобразования в газообразный продукт, при этом указанный катализатор представляет собой структурированный катализатор, содержащий по меньшей мере одну макроскопическую структуру, распространяющуюся в продольном направлении с первого конца до второго конца, причем указанный первый конец образует входное отверстие в указанную макроскопическую структуру для указанного исходного газа, а указанный второй конец образует выходное отверстие для указанного газообразного продукта, при этом указанная макроскопическая структура содержит трехмерную сетчатую структуру, причем сетчатая структура выполнена с возможностью протекания через каналы исходного газа от указанного входного отверстия до указанного выходного отверстия, причем сетчатая структура образована металлическим материалом, который является электропроводящим и по меньшей мере частично служит подложкой для керамического покрытия, при этом керамическое покрытие служит подложкой для каталитически активного материала, причем сетчатая структура в поперечном сечении поперек продольного направления представляет собой часть поперечного сечения макроскопической структуры, при этом указанная часть находится в диапазоне от 4-75% поперечного сечения макроскопической структуры, и причем сетчатая структура по меньшей мере по трем различным поперечным сечениям в продольном направлении представляет собой различные части.

2. Катализатор по п.1, отличающийся тем, что макроскопическая структура дополнительно содержит кольцевую стенку, образующую внутреннее пространство, при этом кольцевая стенка образована металлическим материалом, который является электропроводящим, и причем сетчатая структура расположена во внутреннем пространстве.

3. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что поперечное сечение сетчатой структуры составляет по меньшей мере 4, предпочтительно 5, более предпочтительно 6, более предпочтительно 7, более предпочтительно 8, более предпочтительно 9, более предпочтительно 10, более предпочтительно 11 и наиболее предпочтительно 12 частей в продольном направлении.

4. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что поперечное сечение сетчатой структуры является непрерывно непостоянным на совокупном расстоянии по меньшей мере 10%, предпочтительно 20%, более предпочтительно 30%, более предпочтительно 40%, более предпочтительно 50%, более предпочтительно 60%, более предпочтительно 70%, более предпочтительно 80% и наиболее предпочтительно 90% длины макроскопической структуры в продольном направлении.

5. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что сетчатая структура содержит множество прорезей.

6. Катализатор по п.5, отличающийся тем, что прорези заполнены вырезанным материалом, имеющим более низкую проводимость по сравнению с металлическим материалом.

7. Катализатор по п.5 или 6, отличающийся тем, что вырезанный материал представляет собой твердый материал.

8. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что по меньшей мере часть сетчатой структуры образует множество параллельных каналов.

9. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что изменение части составляет менее чем 500% на мм в продольном направлении, предпочтительно менее чем 100%/мм и еще более предпочтительно менее чем на 50%/мм.

10. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что макроскопическую(-ие) структуру(-ы) получают с использованием 3D-печати.

11. Катализатор по любому из пп.1-9, отличающийся тем, что макроскопическую(-ие) структуру(-ы) получают путем гибки, резки и/или сварки листового металла.

12. Катализатор по любому из пп.2-11, отличающийся тем, что кольцевая стенка не содержит отверстий, поперечных продольному направлению.

13. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, содержащий две или более макроскопических структур, причем по меньшей мере две макроскопические структуры электрически соединены.

14. Катализатор по п.13, отличающийся тем, что вторая макроскопическая структура расположена по меньшей мере частично по окружности вокруг первой макроскопической структуры.

15. Катализатор по п.14, отличающийся тем, что первая и вторая макроскопические структуры электрически соединены в задней части.

16. Катализатор по любому из пп.14-15, отличающийся тем, что первая и вторая макроскопические структуры расположены преимущественно соосно.

17. Катализатор по любому из пп.5-16, отличающийся тем, что по меньшей мере две прорези имеют различную форму и/или очертание.

18. Катализатор по любому из предшествующих пунктов, отличающийся тем, что катализатор содержит одну или более матриц, каждая из которых содержит первую и вторую макроскопические структуры, причем:

а) первая и вторая макроскопические структуры содержат трехмерную сетчатую структуру;

б) матрица содержит, по меньшей мере, первый и второй проводники, электрически соединенные с указанной первой и второй макроскопическими структурами, соответственно, и с источником электропитания, причем указанный источник электропитания выполнен с возможностью нагрева по меньшей мере части указанных первой и второй макроскопических структур до температуры по меньшей мере 500°C путем пропускания электрического тока через указанную макроскопическую структуру, и причем проводники соединены в соответствующих положениях в составе макроскопической структуры ближе к указанному первому концу, чем к указанному второму концу,

с) указанные первая и вторая макроскопические структуры электрически соединены перемычкой из электропроводящего материала, и

д) матрица выполнена с возможностью направления электрического тока от первого проводника через первую макроскопическую структуру к указанной задней части, после чего через перемычку и затем через вторую макроскопическую структуру ко второму проводнику.

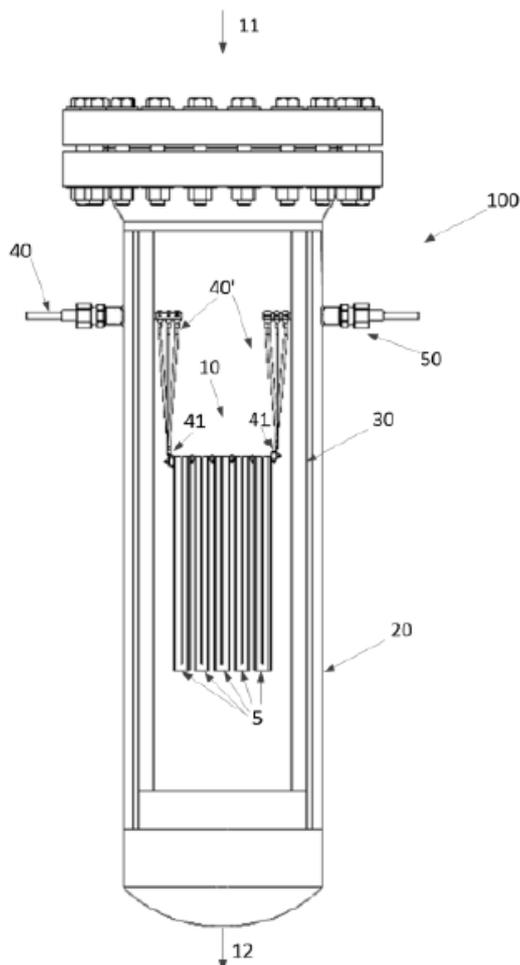
19. Реакторная система для осуществления эндотермической реакции исходного газа, при этом указанная реакторная система содержит:

а) катализатор по любому из пп.1-18;

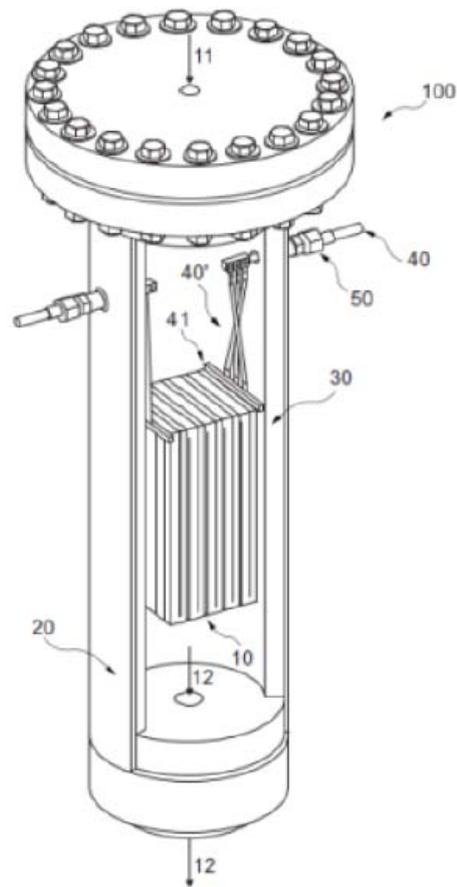
б) корпус высокого давления, в котором находится указанный катализатор, при этом указанный корпус высокого давления содержит входное отверстие для подачи исходного газа и выходное отверстие для отвода газообразного продукта, причем указанное входное отверстие расположено таким образом, что указанный исходный газ поступает в первый конец указанного катализатора, а газообразный продукт выходит из второго конца указанного катализатора; и

с) теплоизоляционный слой между указанным катализатором и указанным корпусом высокого давления.

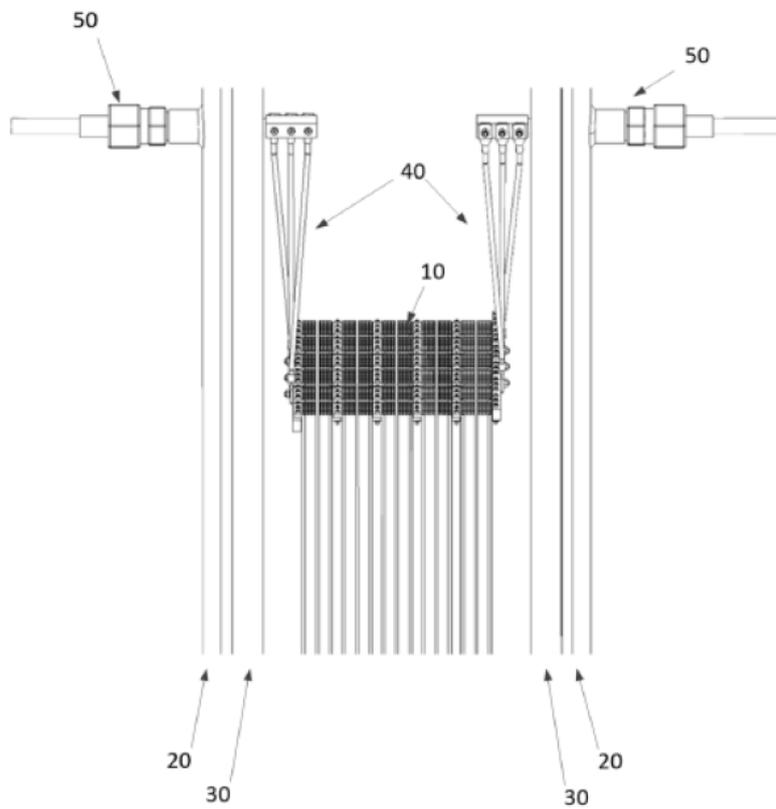
20. Применение катализатора по любому из пп.1-18 или реактора по п.19, отличающееся тем, что эндотермическая реакция выбрана из группы, включающей паровой риформинг метана, образование цианистого водорода, крекинг метанола, крекинг аммиака, обратную конверсию водяного газа и дегидрирование.



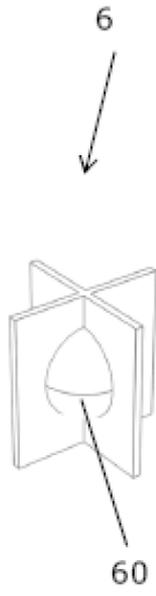
Фиг. 1а



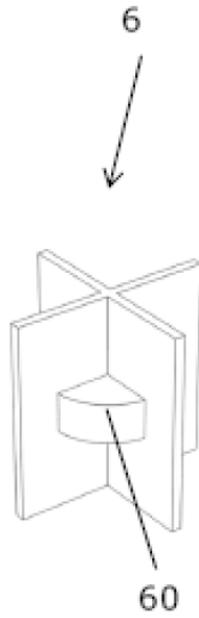
Фиг. 1b



Фиг. 2

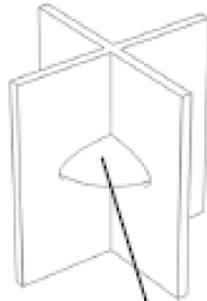


Фиг. 3а



Фиг. 3б

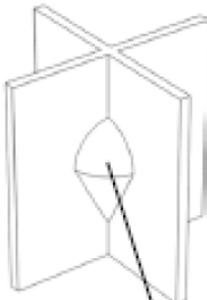
6



60

Фиг. 3с

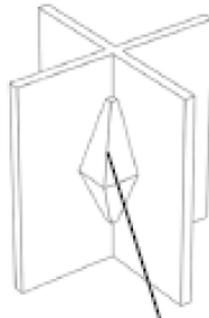
6



60

Фиг. 3d

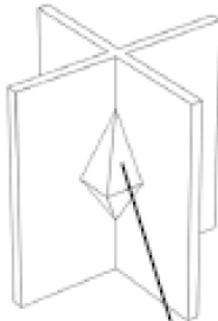
6



60

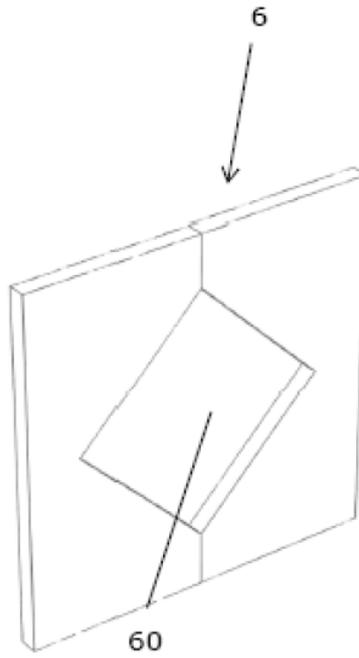
Фиг. 3e

6

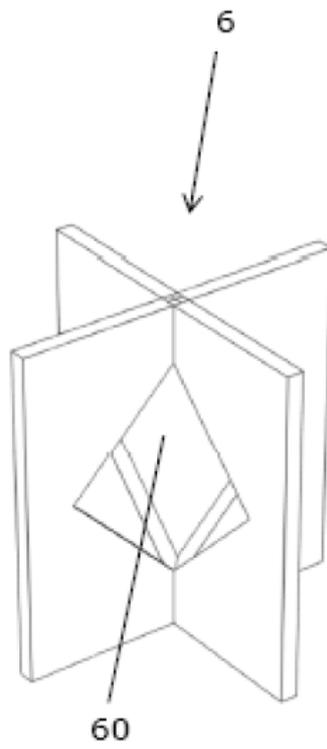


60

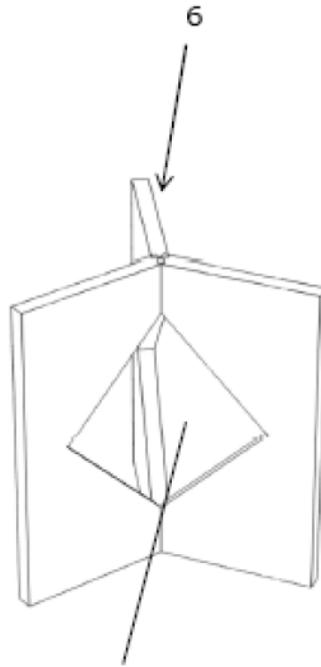
Фиг. 3f



Фиг. 4а

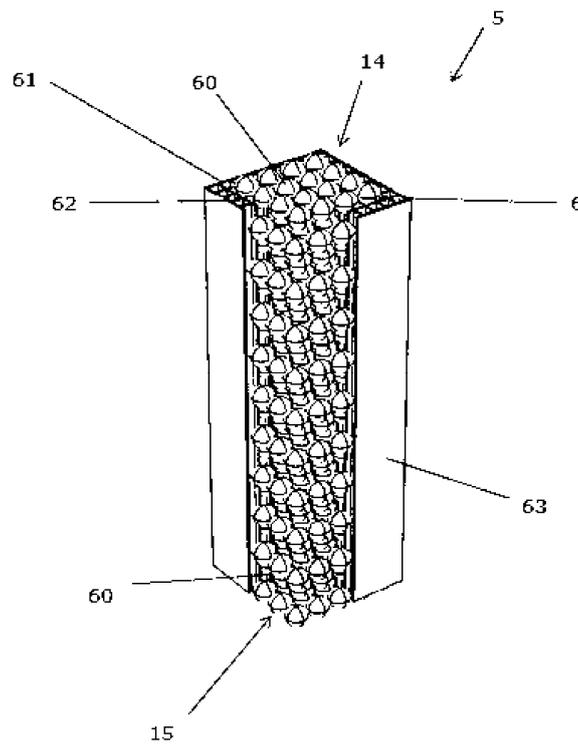


Фиг. 4б

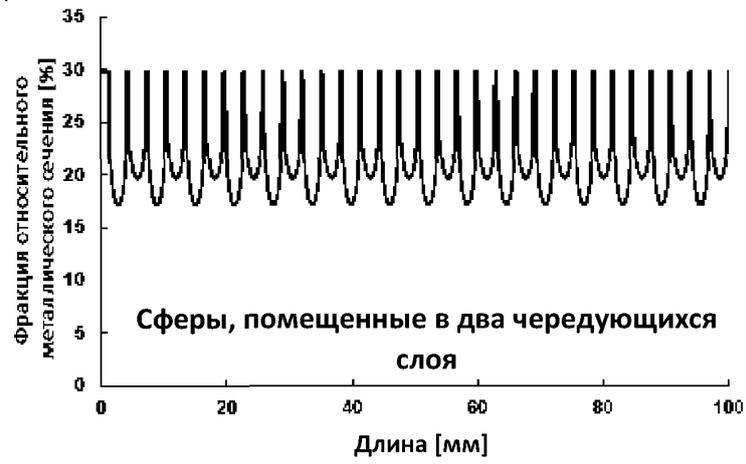


60

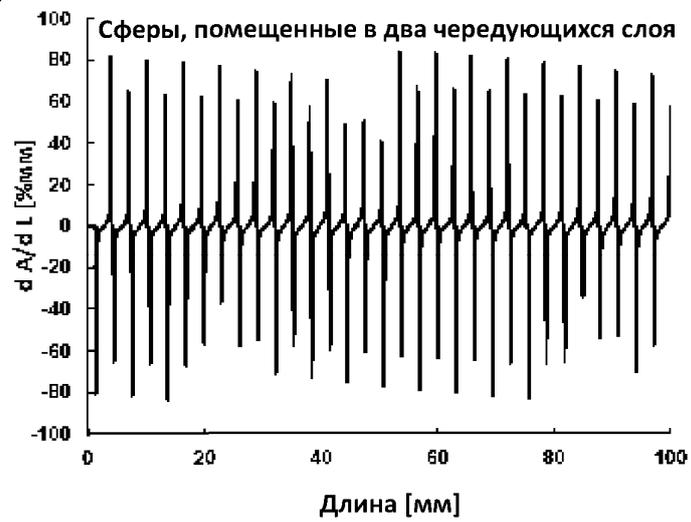
Фиг. 4с



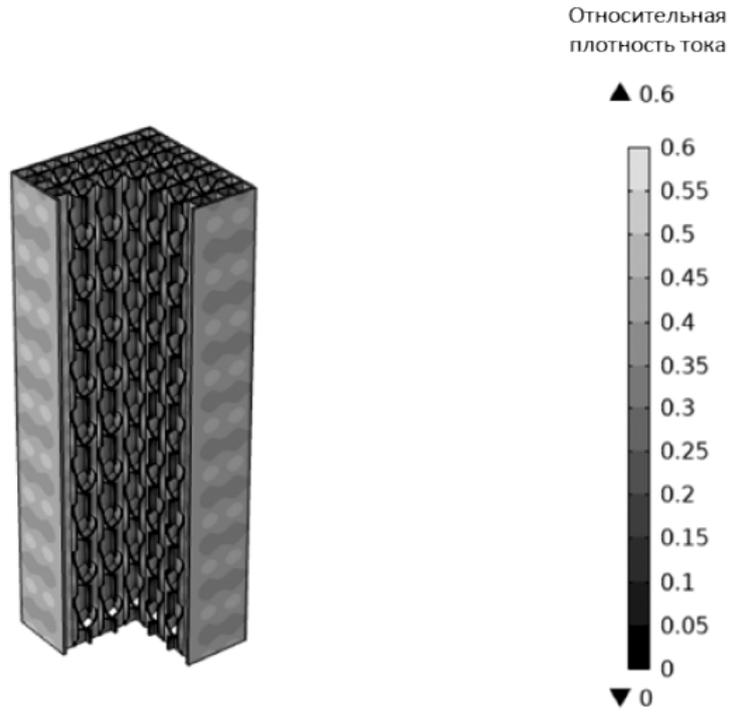
Фиг. 5



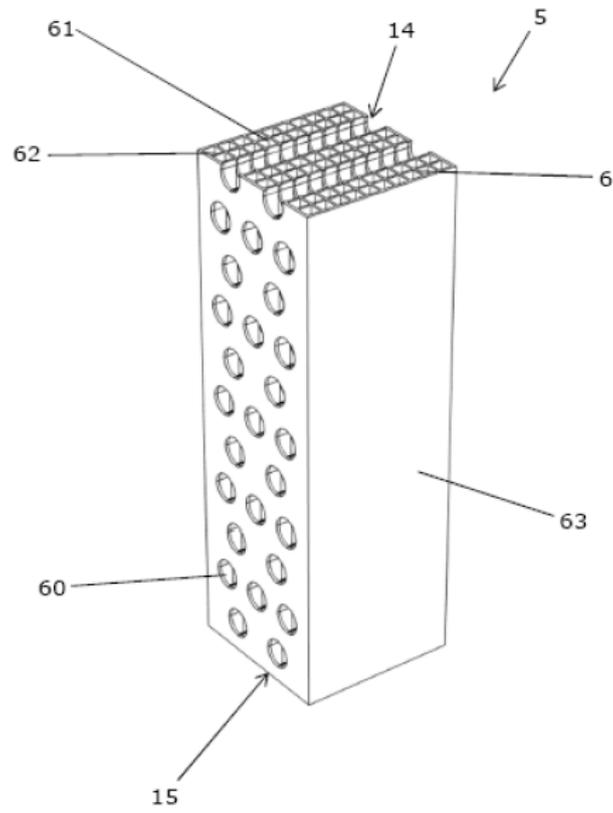
Фиг. 6а



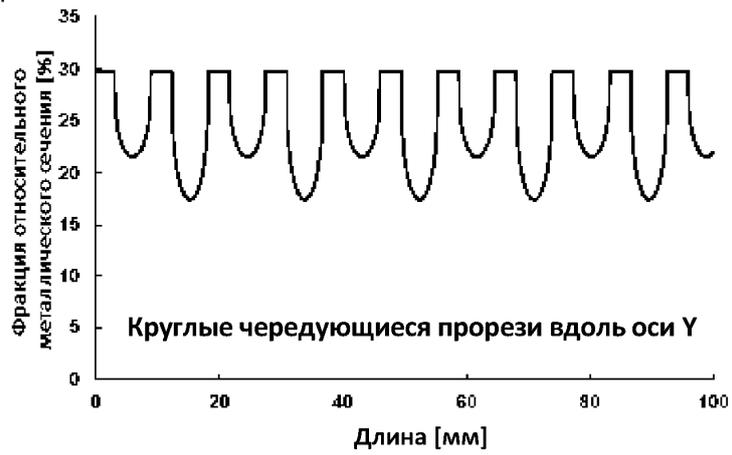
Фиг. 6б



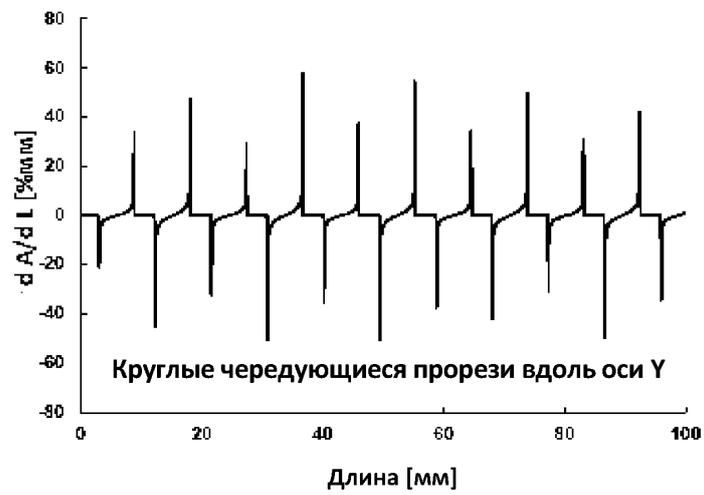
Фиг. 6с



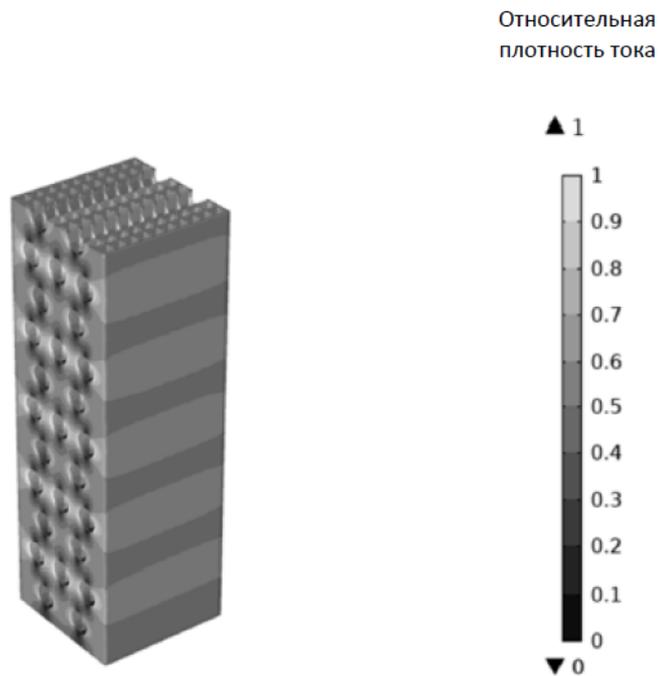
Фиг. 7



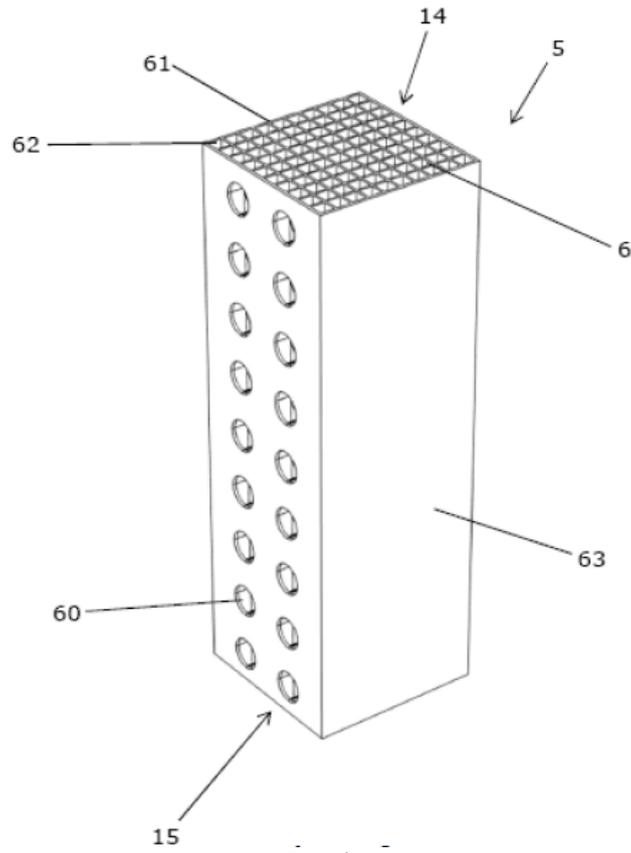
Фиг. 8а



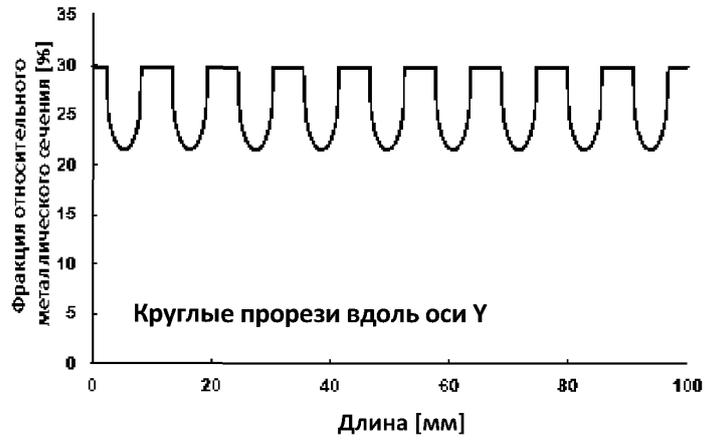
Фиг. 8b



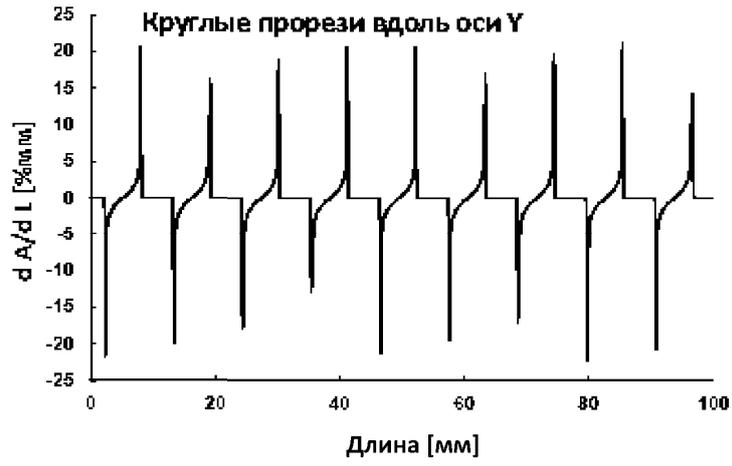
Фиг. 8с



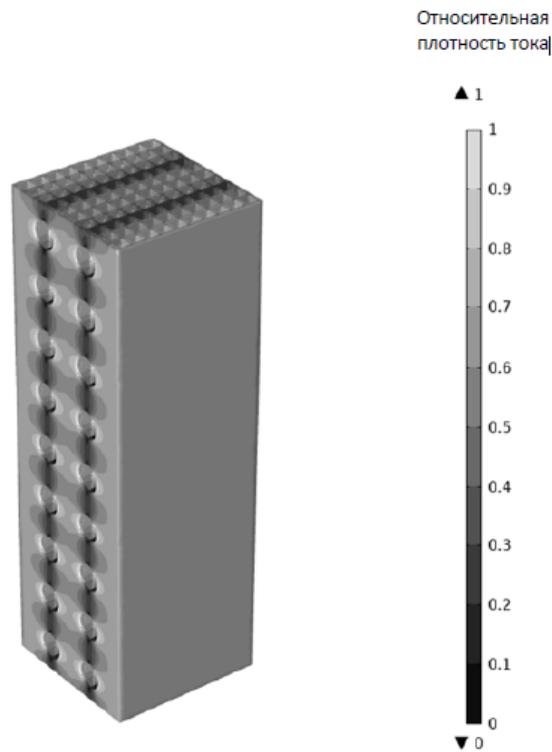
Фиг. 9



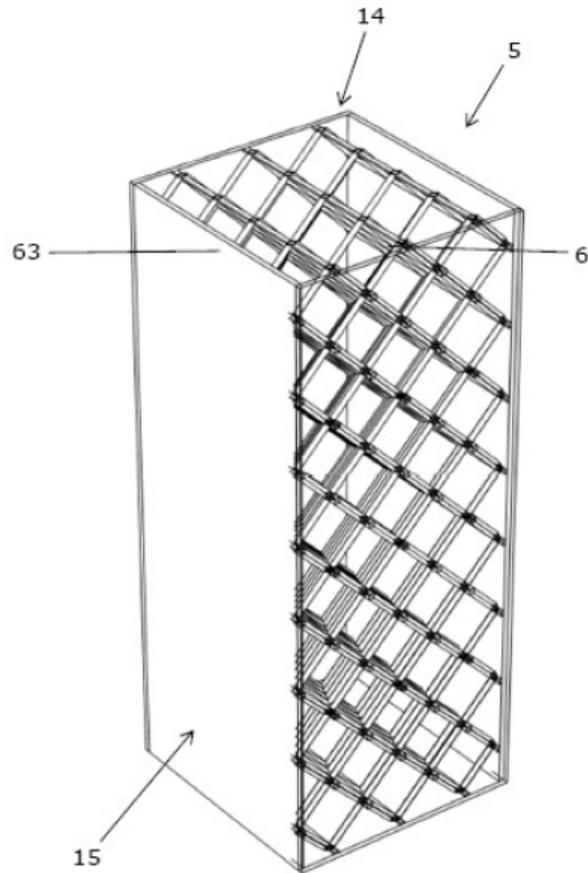
Фиг. 10а



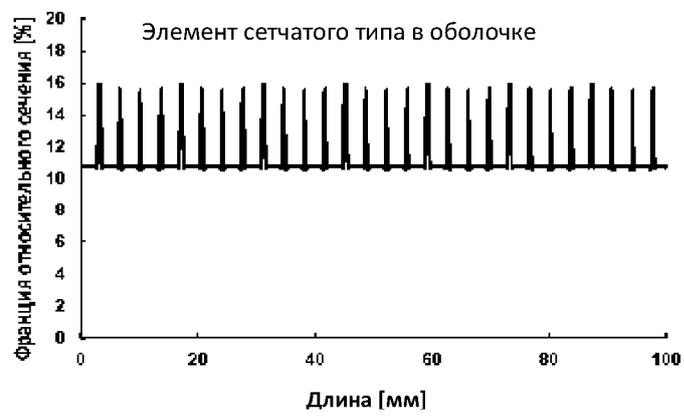
Фиг. 10б



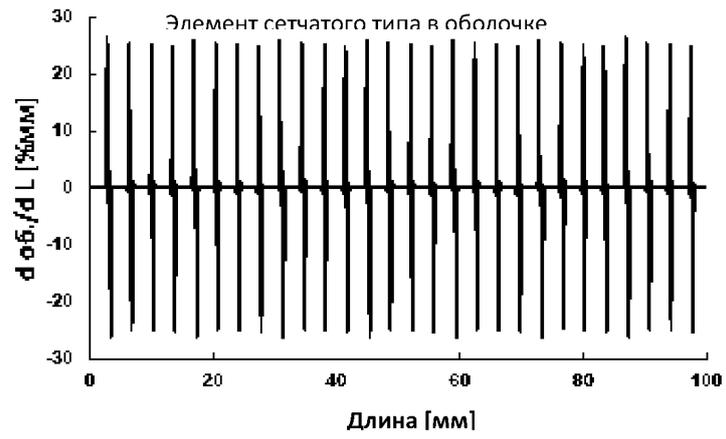
Фиг. 10с



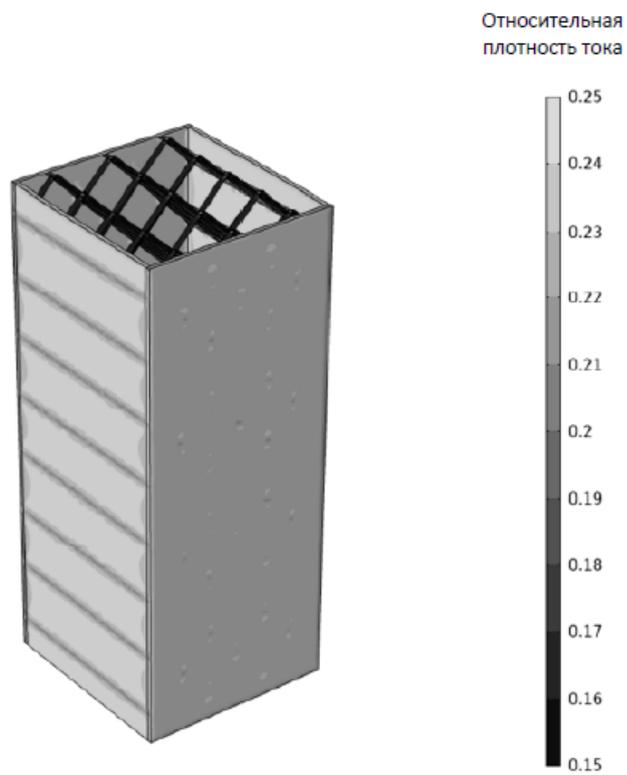
Фиг. 11



Фиг. 12а

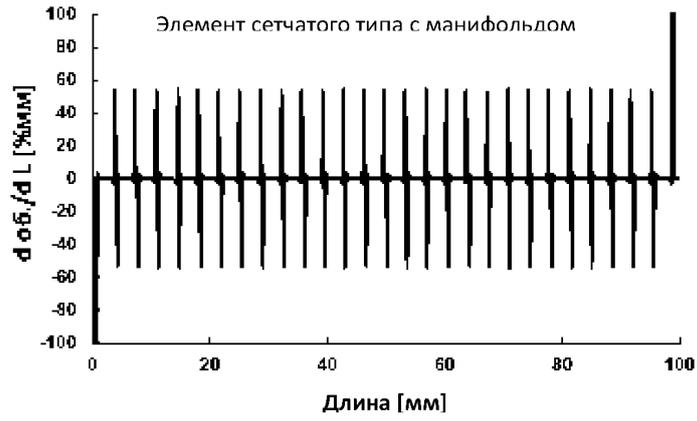


Фиг. 12б

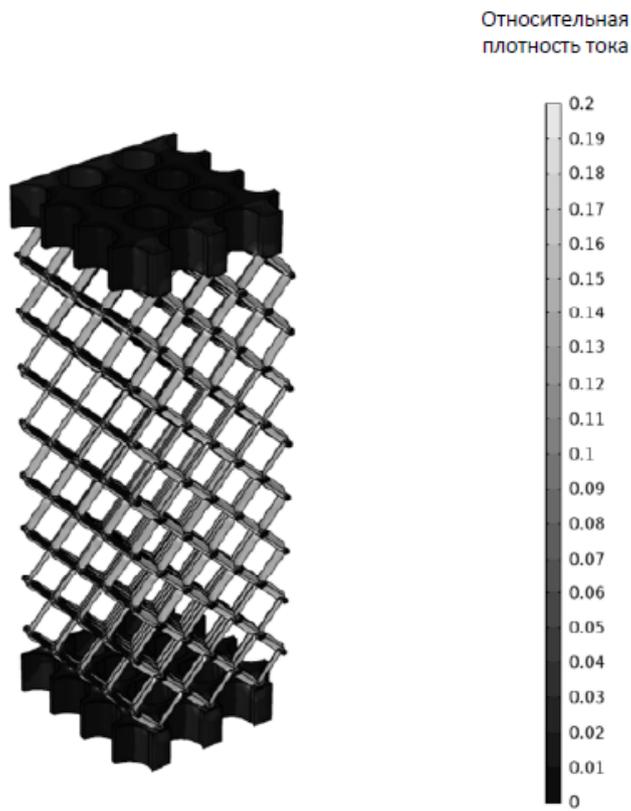


Фиг. 12с





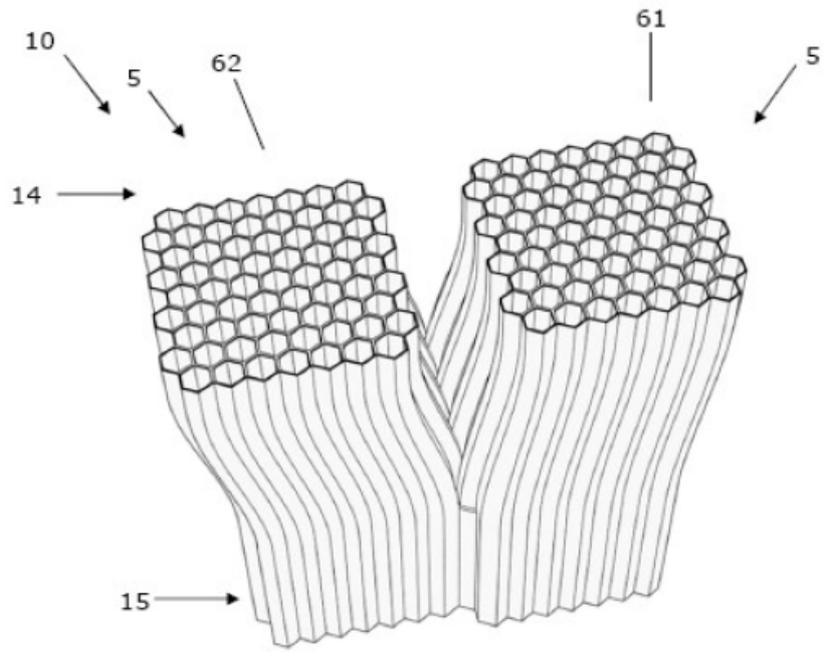
Фиг. 14б



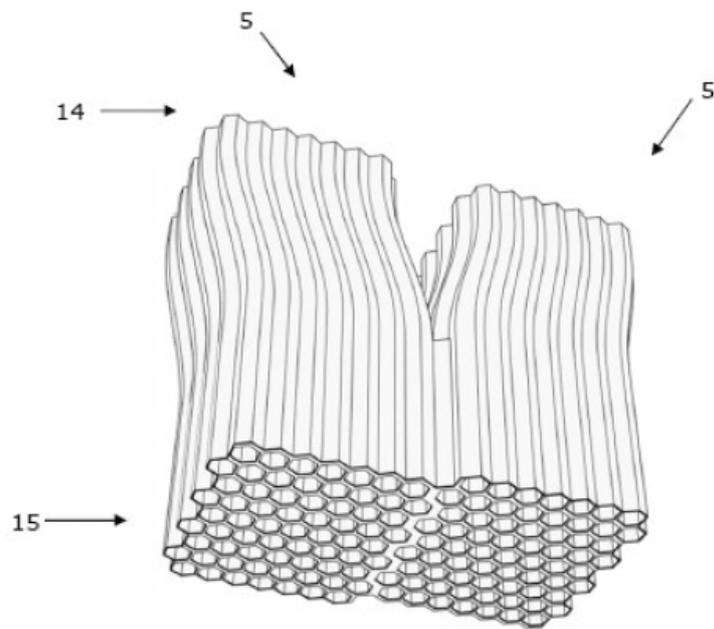
Фиг. 14с



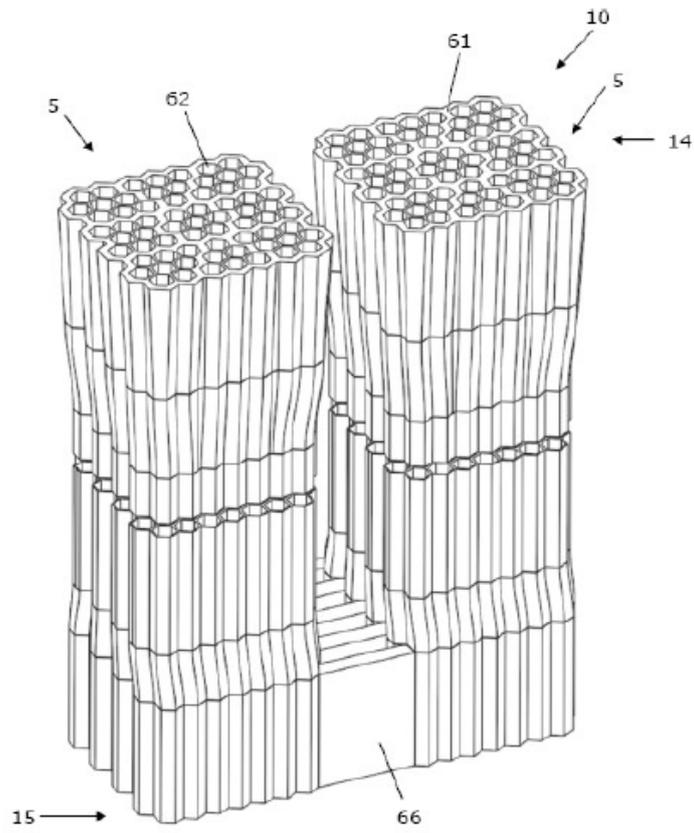
Фиг. 15



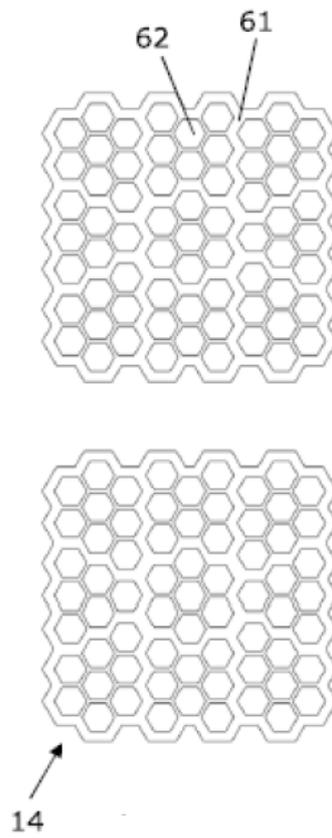
Фиг. 16а



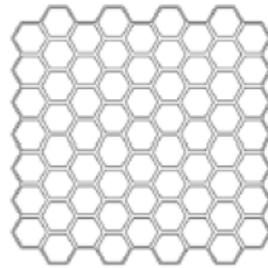
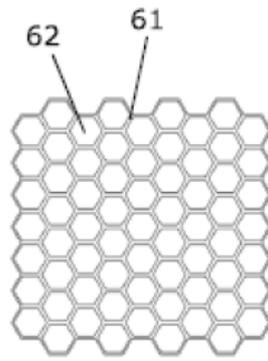
Фиг. 16б



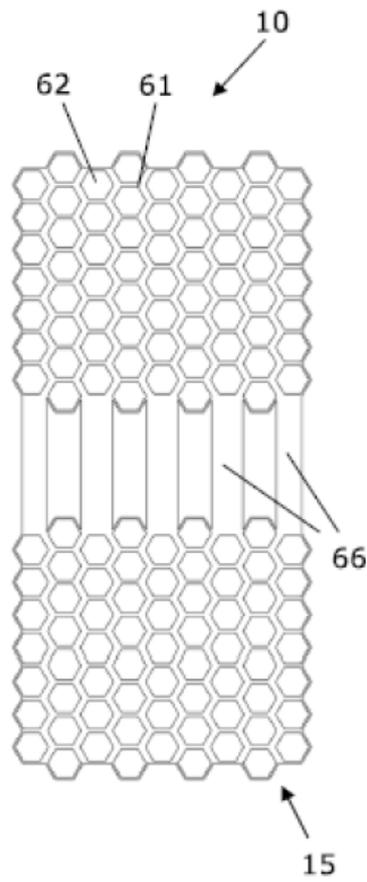
Фиг. 17



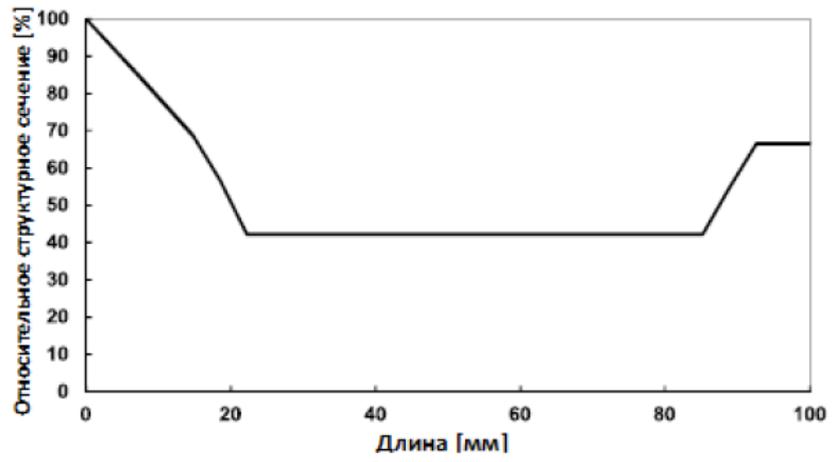
Фиг. 18а



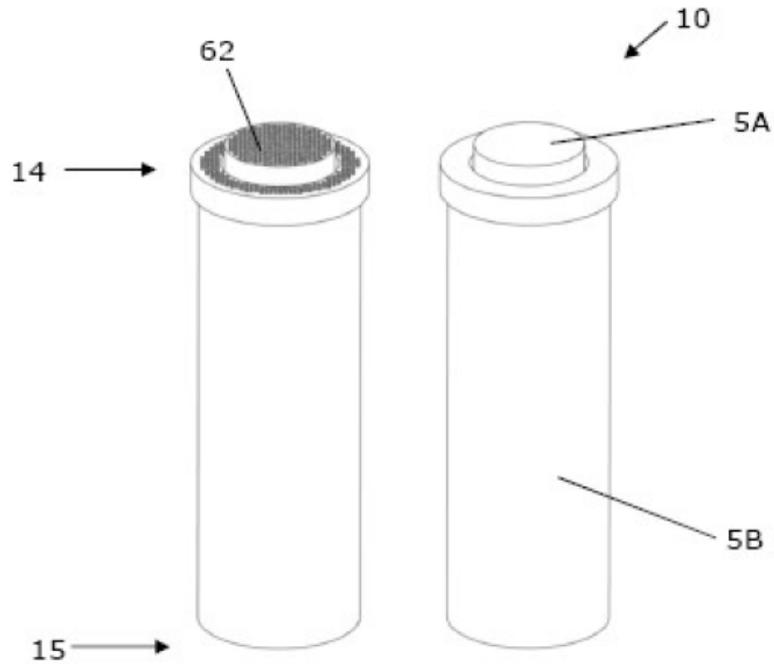
Фиг. 18b



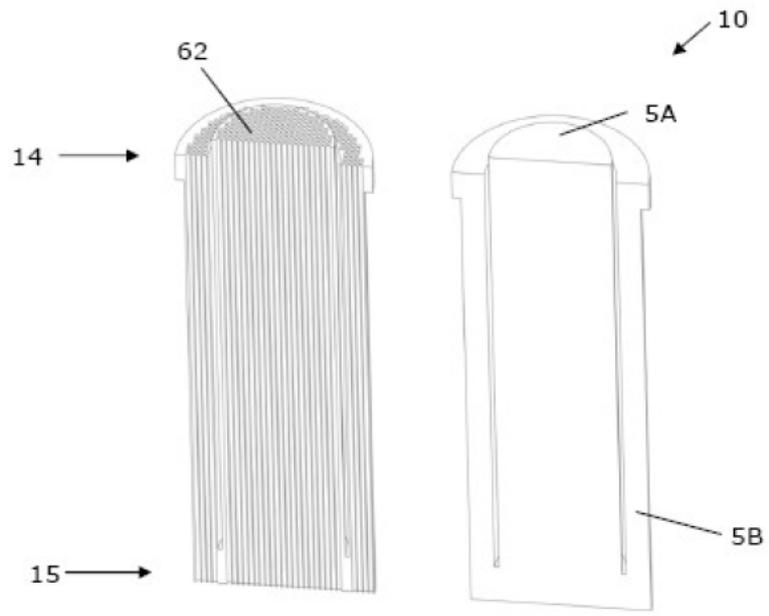
Фиг. 18c



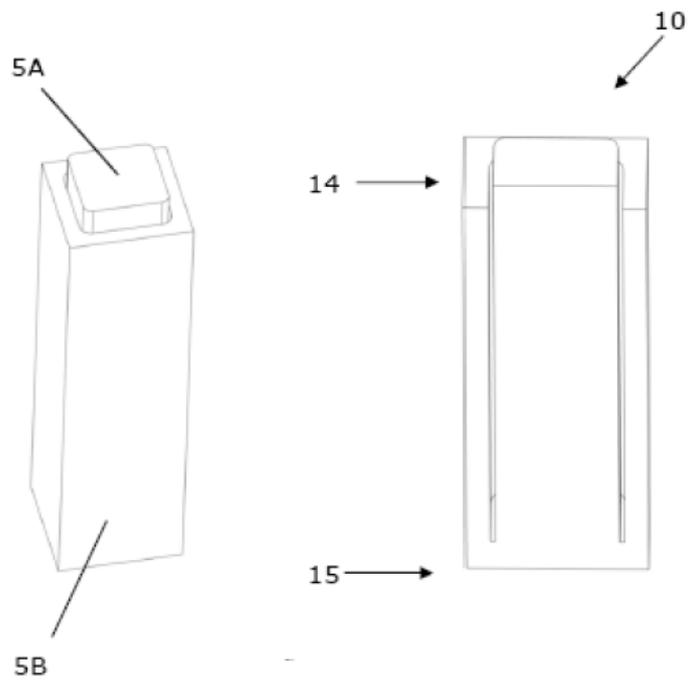
Фиг. 18d



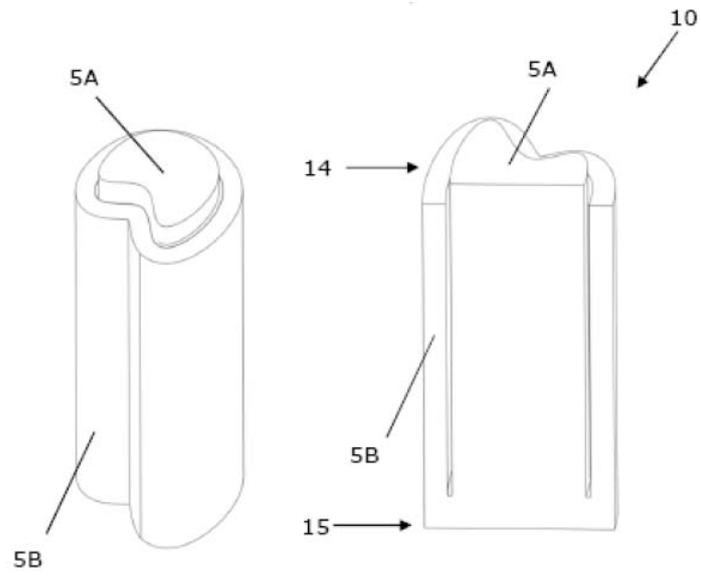
Фиг. 19а



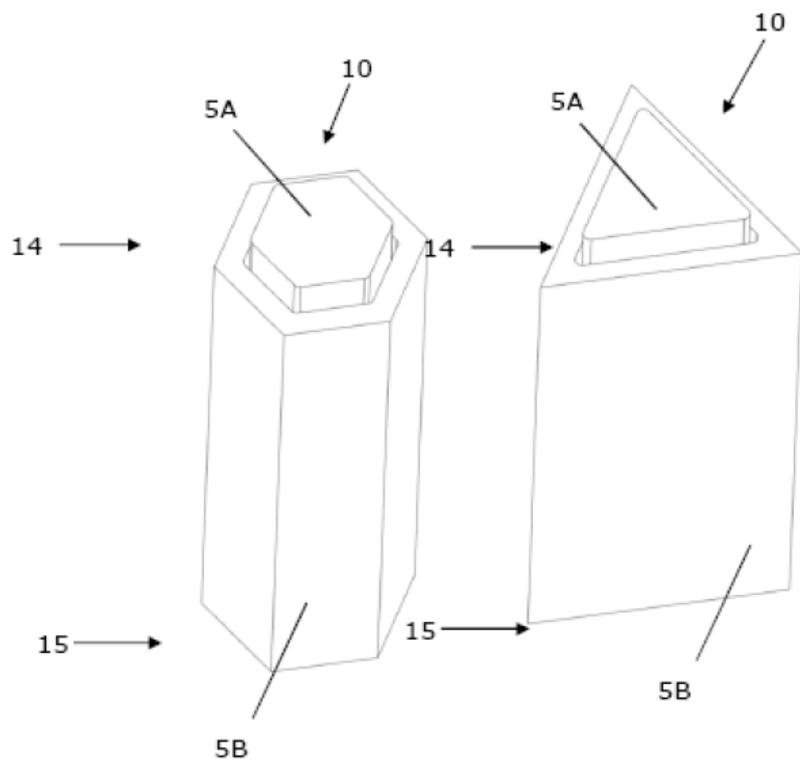
Фиг. 19b



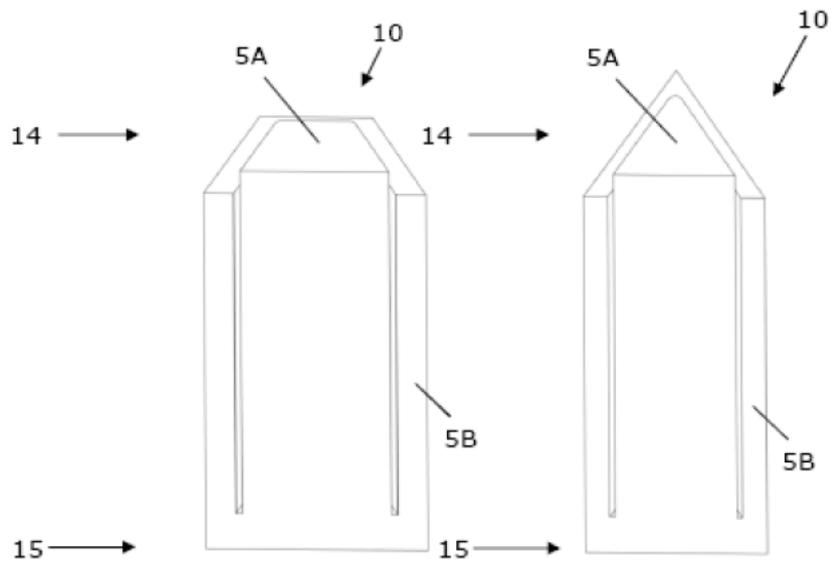
Фиг. 20



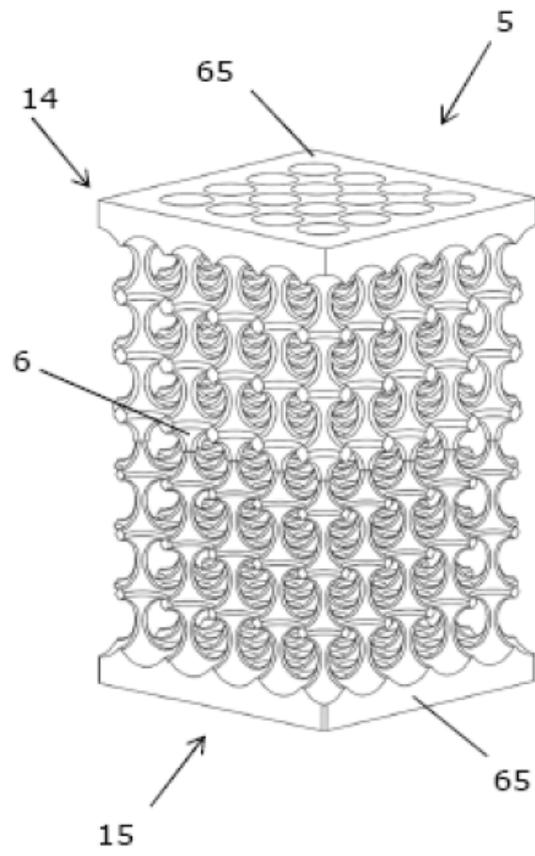
Фиг. 21



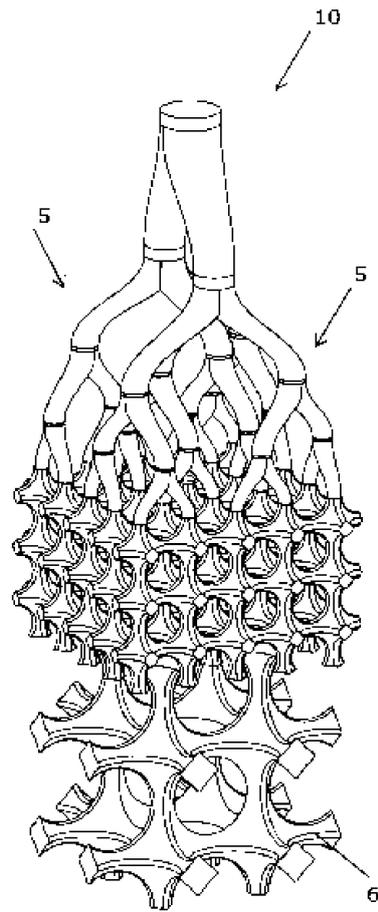
Фиг. 22а



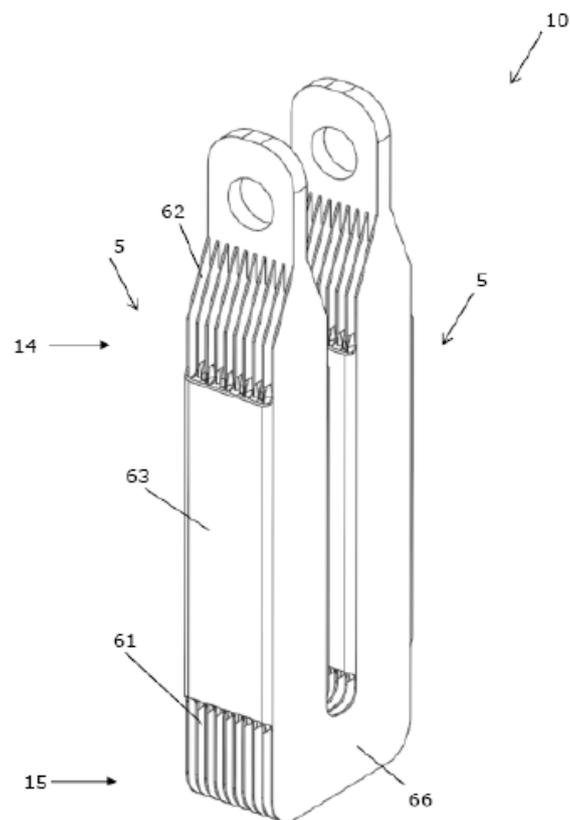
Фиг. 22б



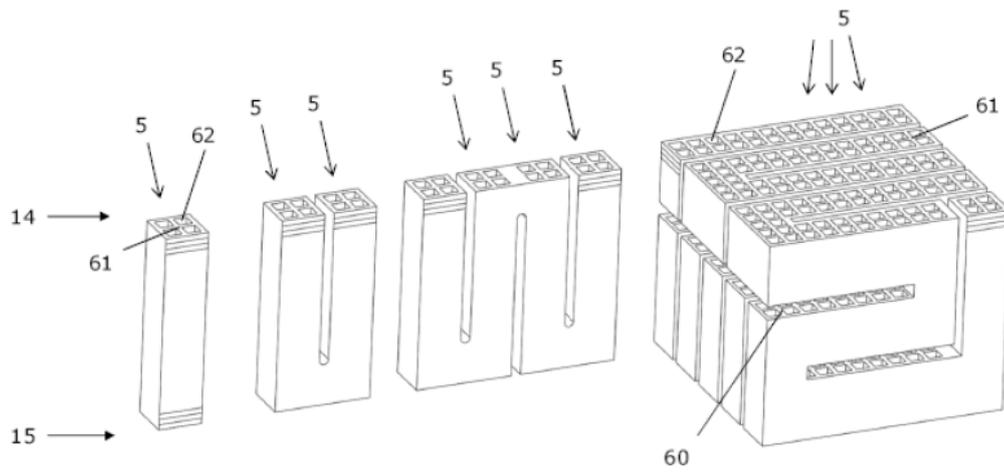
Фиг. 23а



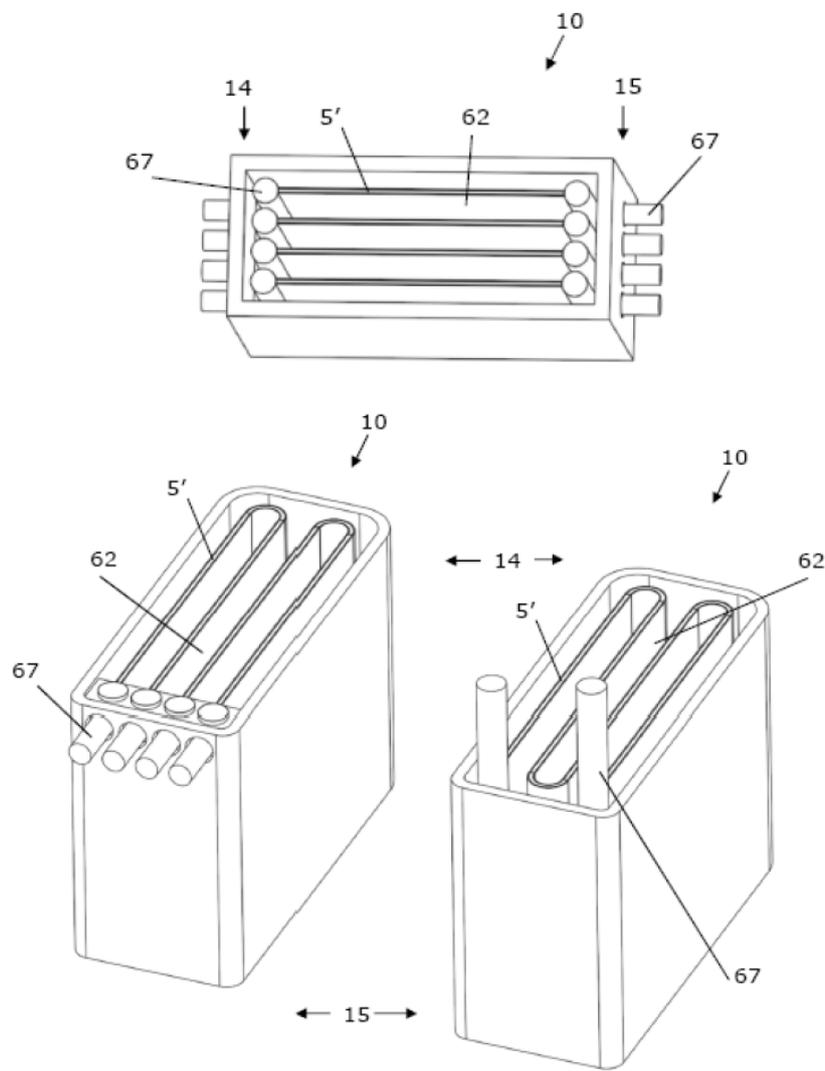
Фиг. 23b



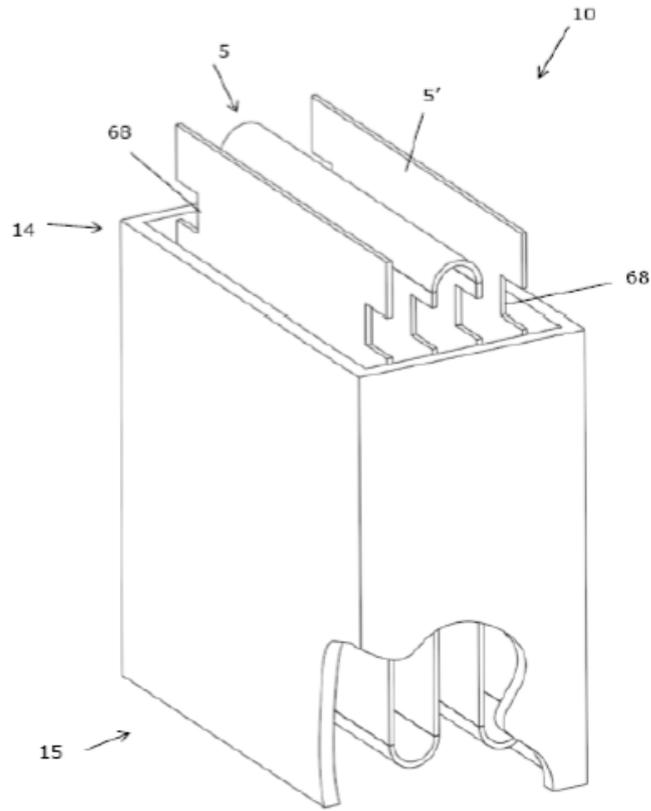
Фиг. 24



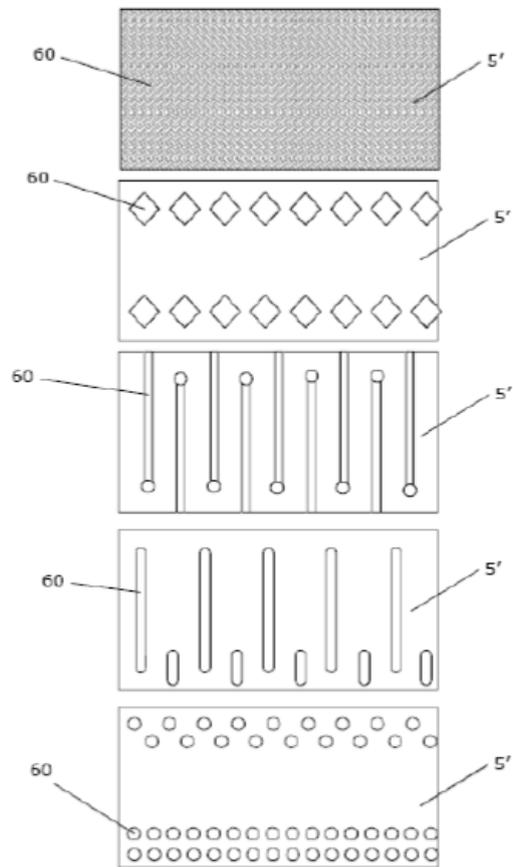
Фиг. 25



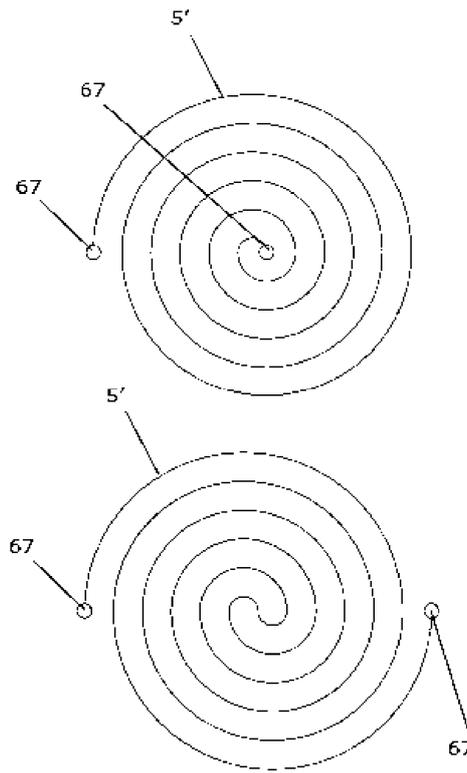
Фиг. 26



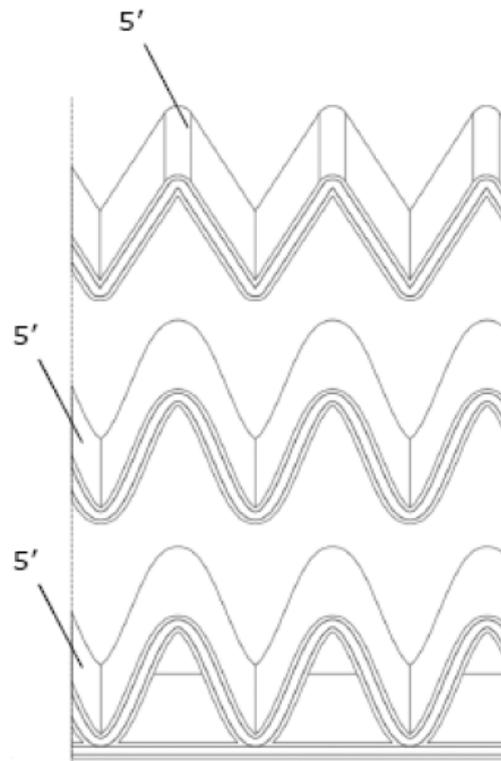
Фиг. 27



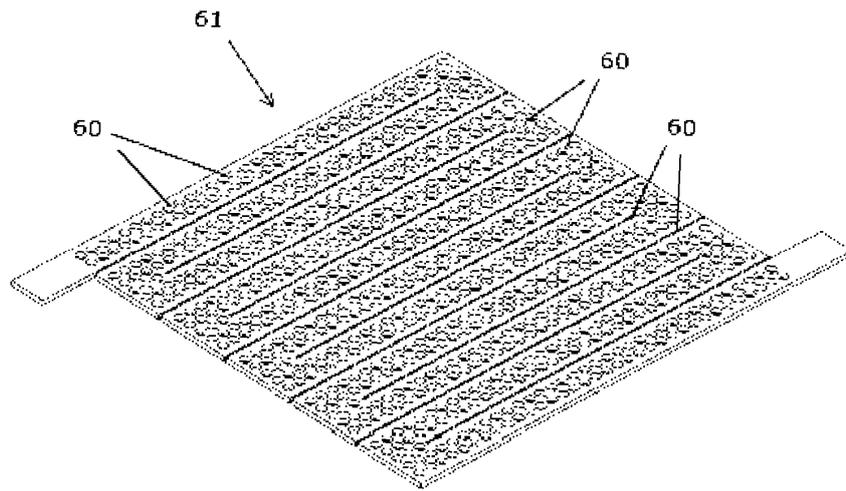
Фиг. 28



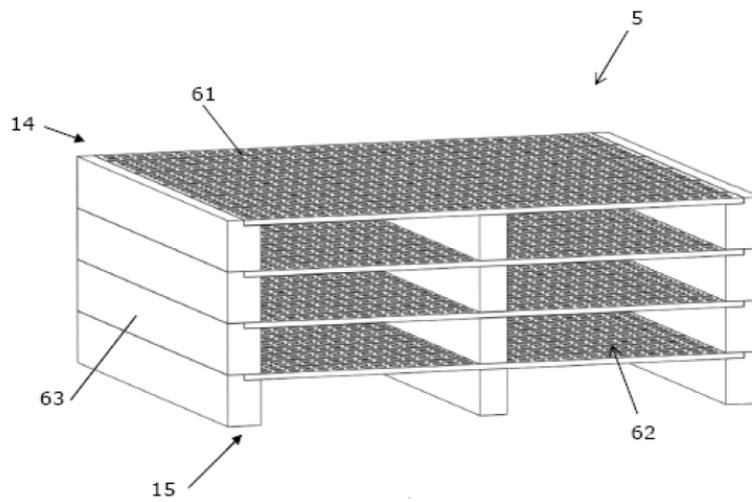
Фиг. 29а



Фиг. 29б



Фиг. 30а



Фиг. 30б

