

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **041440**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.10.25

(21) Номер заявки
202092761

(22) Дата подачи заявки
2019.05.15

(51) Int. Cl. **B01J 15/00** (2006.01)
B01J 19/24 (2006.01)
C01B 3/38 (2006.01)
C01B 3/40 (2006.01)
C01B 3/04 (2006.01)
C01B 3/22 (2006.01)
C01C 3/02 (2006.01)
C07C 2/84 (2006.01)
C07C 5/333 (2006.01)

(54) **ЭНДОТЕРМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ С НАГРЕВОМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ**

(31) **РА 2018 00249**

(32) **2018.05.31**

(33) **DK**

(43) **2021.04.23**

(86) **PCT/EP2019/062424**

(87) **WO 2019/228798 2019.12.05**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ХАЛЬДОР ТОПСЕЭ А/С (DK)

(72) Изобретатель:
**Мортенсен Петер Мельгаард, Кляйн
Роберт, Аасберг-Петерсен Ким (DK)**

(74) Представитель:
Беляева Е.Н. (BY)

(56) **US-B1-6746650**
WO-A1-2004091773
WO-A1-2012084609
WO-A1-2017186612
US-A-5976723
WO-A2-2007048641
US-A-4157356
WO-A1-2017036794

(57) Изобретение относится к реакторной системе для осуществления эндотермической реакции исходного газа, содержащей структурированный катализатор, предназначенный для катализа указанной эндотермической реакции исходного газа, при этом указанный структурированный катализатор включает макроскопическую структуру из электропроводящего материала, при этом на указанной макроскопической структуре расположено керамическое покрытие, при этом указанное керамическое покрытие выступает в качестве подложки каталитически активного материала; корпус высокого давления, в котором расположен указанный структурированный катализатор; теплоизоляционный слой между указанным структурированным катализатором и указанным корпусом высокого давления; по меньшей мере два проводника, электрически соединенные с указанным электропроводящим материалом и с источником питания, который расположен вне указанного корпуса высокого давления, причем указанный источник электропитания предназначен для нагрева, по меньшей мере, части указанного структурированного катализатора до температуры по меньшей мере 200°C путем пропускания электрического тока через указанный электропроводящий материал. Настоящее изобретение также относится к способу осуществления эндотермической реакции исходного газа.

041440
B1

041440
B1

Область изобретения

Варианты осуществления изобретения относятся к реакторной системе и способу парового риформинга исходного газа, содержащего углеводороды, в которых тепло для эндотермической реакции обеспечивается нагревом сопротивлением.

Уровень техники

В эндотермических реакциях зачастую существует проблема эффективности передачи теплоты в реакционную зону слоя катализатора внутри реакторной установки. Традиционная теплопередача путем конвективного или кондуктивного теплообмена и/или радиационного нагрева может осуществляться недостаточно быстро, и зачастую, во многих конфигурациях применение таких способов теплопередачи будет связано с существенными сложностями. Эту проблему можно проиллюстрировать на примере трубчатого риформера в установке парового риформинга, который практически можно рассматривать как большой теплообменник, при этом теплопередача ограничивает скорость работы риформера. Температура в наиболее близкой к центру части труб трубчатого риформера несколько ниже, чем температура снаружи труб из-за скорости теплопередачи через стенки трубы и катализатора внутри труб, а также из-за эндотермической природы реакции парового риформинга.

Один из способов подачи тепла внутри катализатора, а не снаружи реактора, в котором находится катализатор представляет собой нагрев сопротивлением. В документе DE102013226126 описан процесс аллотермического риформинга метана с физической рекуперацией энергии, в котором риформинг метана осуществляют с использованием диоксида углерода с получением синтез-газа, состоящего из монооксида углерода и водорода. Исходные газы CH_4 и CO_2 подают в реактор с неподвижным слоем, состоящий из электропроводящих и каталитических частиц, который электрически нагревают до температуры около 1000 К. В реакторе с неподвижным слоем происходит конверсия реагирующих газов и выделение тепла генерируемого синтез-газа.

Целью изобретения является создание альтернативной конфигурации реакторной системы для парового риформинга с электрическим нагревом.

Также целью изобретения является создание реакторной системы со встроенным источником тепла и катализаторами.

Кроме того, целью изобретения является способ осуществления эндотермической реакции, при котором осуществляют точное регулирование температуры эндотермической реакции для ограничения нежелательной побочной реакции, например, крекинга углеводородов в реакциях дегидрогенизации.

Преимущество изобретения состоит в том, что может быть значительно снижен общий выброс диоксида углерода и других вредных для климата веществ, в частности, если энергия, используемая в реакторной системе, поступает из возобновляемых источников энергии.

Краткое изложение сущности изобретения

Варианты осуществления изобретения, в целом, относятся к реакторной системе для осуществления эндотермической реакции исходного газа, при этом реакторная система включает:

структурированный катализатор, предназначенный для эндотермической реакции исходного газа, при этом структурированный катализатор включает макроскопическую структуру из электропроводящего материала, при этом на указанной макроскопической структуре расположено керамическое покрытие, при этом керамическое покрытие выступает в качестве подложки каталитически активного материала;

структурированный катализатор, предназначенный для катализа указанной эндотермической реакции исходного газа, при этом указанный структурированный катализатор содержит электропроводящий материал и каталитический материал;

корпус высокого давления, в котором расположен указанный структурированный катализатор;

теплоизоляционный слой между указанным структурированным катализатором и указанным корпусом высокого давления;

по меньшей мере два проводника, электрически соединенные с указанным структурированным катализатором и с источником питания, который расположен вне корпуса высокого давления, причем источник питания выполнен с возможностью нагрева, по меньшей мере, части указанного структурированного катализатора до температуры по меньшей мере 200°C путем пропускания электрического тока через электропроводящий материал;

причем указанный корпус высокого давления включает входное отверстие для введения технологического газа и выходное отверстие для выведения газообразного продукта, при этом указанное входное отверстие расположено рядом с передней частью корпуса высокого давления, а выходное отверстие расположено рядом с задней частью корпуса высокого давления, при этом по меньшей мере два проводника соединены со структурированным катализатором в точке на структурированном катализаторе, расположенной ближе к входному отверстию, чем к выходному отверстию; и

причем структурированный катализатор имеет электроизоляционные части, расположенные между проводниками, предотвращающие прохождение указанного тока через некоторую часть структурированного катализатора.

В соответствии с топологией реакторной системы сжатый исходный газ подают в нее через входное отверстие и направляют в корпус высокого давления реакторной системы. Корпус высокого давления

имеет такую внутреннюю конфигурацию теплоизоляционных слоев и инертного материала, чтобы исходный газ направлялся через структурированный катализатор, где он будет контактировать с каталитическим материалом, при этом каталитически активный материал будет способствовать реакции парового риформинга. Кроме того, нагревание структурированного катализатора обеспечивает необходимое тепло для эндотермической реакции. Газообразный продукт из нагреваемого структурированного катализатора направляют к выходному отверстию из реакторной системы.

Из-за непосредственной близости между каталитически активным материалом и электропроводящим материалом возможен эффективный нагрев каталитически активного материала за счет теплопроводности от электропроводящего материала, нагреваемого сопротивлением. Важной особенностью способа 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 будет находиться внутри корпуса высокого давления реактора. Предпочтительно, источник питания и структурированный катализатор имеют такие размеры, чтобы температура, по меньшей мере, части структурированного катализатора достигала 850-1100°C, если эндотермической реакцией является реакция парового риформинга, или 700-1200°C, если эндотермической реакцией является синтез цианистого водорода, или 500-700°C, если эндотермической реакцией является дегидрогенизация, или 200-300°C, если эндотермической реакцией является крекинг метанола, и приблизительно 500°C, если эндотермической реакцией является крекинг аммиака. Площадь поверхности электропроводящего материала, часть электропроводящего материала, покрытая керамическим покрытием, тип и структура керамического покрытия, а также количество и состав каталитического материала могут быть адаптированы для определенных рабочих условий конкретной эндотермической реакции.

В одном из вариантов осуществления электропроводящим материалом является макроскопическая структура. При использовании по тексту настоящего документа термин "макроскопическая структура" означает, что структура достаточно велика, чтобы ее можно было увидеть невооруженным глазом без увеличительных устройств. Как правило, макроскопическая структура имеет размеры в диапазоне от нескольких сантиметров до нескольких метров. Макроскопическая структура предпочтительно имеет такие размеры, чтобы они соответствовали, по меньшей мере, частично, внутренним размерам корпуса высокого давления, в котором размещен структурированный катализатор, что позволяет экономить место для теплоизоляционного слоя и проводников. Две или несколько макроскопических структур могут быть соединены, в результате чего получают 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 2 или 5 м. Такие две или несколько макроскопических структур могут именоваться "набором макроскопических структур". В этом случае размеры набора макроскопических структур предпочтительно выполнены так, чтобы они соответствовали, по меньшей мере, частично, внутреннему размеру корпуса высокого давления, в котором размещен структурированный катализатор (экономия места для теплоизоляционного слоя). Предполагается, что такой набор макроскопических структур может занимать объем от 0,1 до 10 м³ или даже больший объем. "Структурированный катализатор" может включать одну макроскопическую структуру или набор макроскопических структур, при этом на макроскопических структурах расположено керамическое покрытие, при этом указанное керамическое покрытие выступает в качестве подложки каталитически активного материала. В наборе макроскопических структур такие макроскопические структуры могут быть электрически соединены между собой. Тем не менее, в качестве альтернативы макроскопические структуры могут быть электрически не соединены между собой. Таким образом, структурированный катализатор может включать две или более макроскопических структур, расположенных рядом друг с другом. Макроскопические структуры могут быть изготовлены путем экструзии и спекания или изготовлены по технологии объемной печати. Макроскопическая структура, изготовленная по технологии объемной печати, может в дальнейшем подвергаться спеканию или не подвергаться спеканию.

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

На указанной макроскопической структуре расположено керамическое покрытие, при этом указанное керамическое покрытие выступает 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, этот 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 представляет собой керамический материал с порами в структуре, что позволяет наносить каталитически активный материал на покрытие и внутри него. Преимущественно каталитически активный материал включает каталитически активные частицы, имеющие размер в диапазоне приблизительно 5-250 нм.

Макроскопическая структура предпочтительно изготовлена путем экструзии смеси порошкообразных металлических частиц и связующего вещества до экструдированной структуры и последующего

спекания экструдированной структуры, в результате чего получают материал с высоким соотношением геометрической площади поверхности на объем. Предпочтительно структуру, полученную путем экструзии, подвергают спеканию в восстановительной атмосфере с получением макроскопической структуры. В качестве альтернативы, макроскопическую структуру изготавливают по технологии объемной печати и плавления с использованием металлической добавки, а именно с использованием процессов 3D-печати, которые не требуют последующего спекания, например, по технологии расплавления материала в заранее сформированном слое или по технологии 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 печати. В качестве другой альтернативы, макроскопическая структура может быть изготовлена в виде трехмерной металлической структуры по технологии производства на основе связующего с использованием металлической добавки и затем может подвергаться спеканию в неокислительной атмосфере при первой температуре T_1 , где $T_1 > 1000^\circ\text{C}$ для получения макроскопической структуры.

Керамическое покрытие, которое может содержать каталитически активный материал, наносят 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, возможна особенно 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. Из-за непосредственной близости между источником тепла и каталитически активным материалом 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.

При использовании 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 процессы 3D-печати, при которых под автоматизированным управлением происходит соединение материала в определенную структуру с получением трехмерного объекта, в котором отверждение структуры осуществляется, например, путем спекания, с получением макроскопической структуры. Кроме того, такие технологии производства с использованием металлической добавки включают процессы 3D-печати, которые не требуют последующего спекания, например, технологию расплавления материала в заранее сформированном слое или технологию послойной электроннолучевой 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 печати.

Для реакторной системы согласно изобретению не требуется печь, и это значительно уменьшает общий размер реактора.

В одном из вариантов осуществления электропроводящим материалом является устройство сопротивления, встроенное в каталитический материал структурированного катализатора. Такое встроенное устройство сопротивления может иметь любую подходящую форму, например, форму пластин, спиралей, стержней или другую подобную форму, где материал катализатора может окружать встроенное устройство сопротивления или может быть расположен иным образом, чтобы плотно контактировать с устройством.

В одном из вариантов осуществления на встроенном устройстве сопротивления расположено керамическое покрытие, при этом указанное керамическое покрытие выступает в качестве подложки каталитически активного материала. Таким образом, встроенное устройство сопротивления, аналогично макроскопической подложке, может быть покрыто керамическим покрытием, чтобы на нем непосредственно располагалась каталитически активная фаза, при этом устройство сопротивления остается встроенным в каталитический материал. В этом варианте осуществления каталитический материал расположен вокруг встроенного устройства сопротивления, и структурированный катализатор содержит каталитический материал в виде зерен, экструдатов или гранул катализатора. Каталитический материал может содержать подходящую комбинацию подложки катализатора и каталитически активной фазы для катализа эндотермической реакции.

Предпочтительно электропроводящий материал содержит Fe, Cr, Al или их сплав. Такой сплав может содержать дополнительные элементы, такие как Si, Mn, Y, Zr, C, Co или их комбинации. Предпочтительно каталитически активный материал представляет собой частицы, имеющие размер 5-250 нм. Предпочтительно, проводники и электропроводящий материал изготовлены из различных материалов. Про-

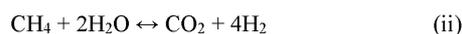
водники могут быть изготовлены, например, из железа, никеля, алюминия, меди, серебра или их сплава. Керамическое покрытие представляет собой электроизоляционный материал и, как правило, имеет толщину в диапазоне приблизительно 100 мкм, например 10-500 мкм.

Электропроводящий материал предпочтительно представляет собой связный или внутренне цельный материал, чтобы обеспечить электропроводность по всему электропроводящему материалу и, следовательно, чтобы обеспечить теплопроводность по всему структурированному катализатору, в частности, для нагрева каталитически активного материала. С помощью связного или внутренне цельного материала можно обеспечить равномерное распределение тока в электропроводящем материале и, таким образом, равномерное распределение тепла внутри структурированного катализатора. По тексту настоящего документа термин "связный" является синонимом термина "соединенный", таким образом, "связный" относится к материалу, который является внутренне цельным или обладает сцеплением. Из-за того, что структурированный катализатор представляет собой связный 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 или внедрение изолирующего материала в электропроводящий материал, электропроводящий материал по-прежнему представляет собой связный или внутренне цельный материал.

Поток газа через структурированный катализатор может иметь то же направление, что и направление пути тока через структурированный катализатор, или поток газа соосен направлению пути тока через структурированный катализатор, он может быть перпендикулярен пути тока или иметь любое другое подходящее направление по отношению к направлению пути тока.

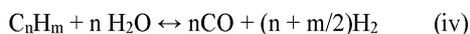
В контексте изобретения термин "исходный газ" означает газ с составом, пригодным для осуществления определенной эндотермической реакции. Если эндотермическая реакция представляет собой паровой риформинг метана, в состав газа, как правило, могут входить углеводороды, метан, водород, монооксид углерода, диоксид углерода, пар и инертные газы, такие как азот и аргон. Если эндотермическая реакция представляет собой дегидрогенизацию, исходный газ может представлять собой углеводород в виде пропана или стирола вместе с инертными компонентами и, возможно, с водородом. Если эндотермическая реакция представляет собой синтез цианида водорода или процесс синтеза органических нитрилов, в состав газа могут входить высшие углеводороды, аммиак, метан, азот, водород, кислород и/или инертные компоненты. Если эндотермическая реакция представляет собой крекинг метанола, в состав газа могут входить метанол, пар, монооксид углерода, диоксид углерода, водород и инертные компоненты. Если эндотермическая реакция представляет собой крекинг аммиака, в состав газа могут входить аммиак, водород, азот и инертные компоненты.

Кроме того, термин "паровой риформинг" означает реакцию риформинга в соответствии с одним или несколькими из следующих уравнений:



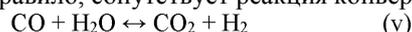
Реакции (i) и (ii) представляют собой реакции парового риформинга метана, тогда как реакция (iii) представляет собой реакцию риформинга сухого метана.

Для высших углеводородов, т.е. для C_nH_m , где $n \geq 2$, $m \geq 4$, уравнение (i) имеет следующий общий вид:



где $n \geq 2$, $m \geq 4$.

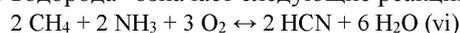
Паровому риформингу, как правило, сопутствует реакция конверсии водяного газа (v):



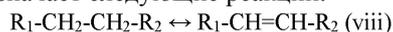
Термин "паровой риформинг метана" включает реакции (i) и (ii), термин "паровой риформинг" включает реакции (i), (ii) и (iv), в то время как термин "метанирование" включает реакцию обратную реакции (i). В большинстве случаев на выходе из реакторной системы все эти реакции (i)-(v) достигли равновесия или близки к нему.

Термин "предварительный риформинг" зачастую используется для обозначения каталитической конверсии высших углеводородов в соответствии с реакцией (iv). Предварительному риформингу, как правило, сопутствует паровой риформинг и/или метанация (в зависимости от состава газа и рабочих условий) и реакция конверсии водяного газа. Предварительный риформинг зачастую проводится в адиабатических реакторах, но может также происходить в реакторах с подогревом.

Термин "синтез цианистого водорода" означает следующие реакции:

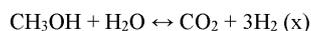


Термин "дегидрогенизация" означает следующие реакции:



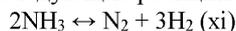
где R_1 и R_2 может представлять собой любую подходящую группу в молекуле углеводорода, такой как $-H$, $-CH_3$, $-CH_2$ или $-CN$.

Термин "крекинг метанола" означает следующие реакции:



Реакции крекинга метанола, как правило, сопутствует реакция конверсии водяного газа (v).

Термин "крекинг аммиака" означает следующие реакции:



Например, реакция парового риформинга проходит с поглощением большого количества тепла. Для достижения удовлетворительной степени конверсии метана в исходном газе необходимы высокие температуры, как правило, температуры, превышающие 800-850°C. SMR состоит из нескольких труб, заполненных зернами катализатора, внутри печи. Длина труб, как правило, составляет 10-13 м, внутренний диаметр - 80-160 мм. Горелки, размещенные в печи, обеспечивают необходимое тепло для реакций за счет сжигания топливного газа. Максимальный средний тепловой поток зачастую составляет 80000-90000 ккал/ч/м² внутренней поверхности трубы. Общее ограничение теплового потока обусловлено механическими факторами, поэтому мощность повышается за счет увеличения количества труб и размера печи. Подробная информация о реакторной системе типа SMR известна из литературы, например, из работы "Производство синтез-газа для синтеза Фишера-Тропша" (Synthesis gas production for FT synthesis); раздел 4, с. 258-352, 2004.

Термин "электропроводящий" означает материалы с удельным электрическим сопротивлением в диапазоне от 10⁻⁵ до 10⁻⁸ Ω·м при 20°C. Таким образом, электропроводящими материалами являются, например, металлы, такие как медь, серебро, алюминий, хром, железо, никель или сплавы металлов. Кроме того, термин "электроизоляционный" означает материалы с удельным электрическим сопротивлением выше 10 Ω·м при 20°C, например в диапазоне 10⁹-10²⁵ Ω·м при 20°C.

Если реакторная система включает теплоизоляционный слой между структурированным катализатором и корпусом высокого давления, между структурированным катализатором и корпусом высокого давления обеспечивается необходимая тепло- или электроизоляция. Наличие теплоизоляционного слоя между структурированным катализатором и корпусом высокого давления помогает избежать чрезмерного нагрева корпуса высокого давления и способствует снижению термопотери в окружающую среду. Температуры в структурированном катализаторе, по меньшей мере, в некоторых его частях, могут достигать приблизительно 1300°C, однако с помощью теплоизоляционного слоя между структурированным катализатором и корпусом высокого давления можно поддерживать более низкую температуру корпуса высокого давления, например, 500°C или даже 100°C, что является преимуществом, поскольку типичные материалы из конструкционной стали обычно не могут использоваться под нагрузкой при температурах выше 1000°C. Кроме того, теплоизолирующий слой между корпусом высокого давления и структурированным катализатором помогает контролировать электрический ток в системе реактора, поскольку теплоизоляционный слой также является электроизоляционным. Теплоизоляционный слой может представлять собой один или более слоев твердого материала, такого как керамика, инертный материал, кирпич или газовый барьер, или их комбинация. Таким образом, также возможно, чтобы часть теплоизоляционного слоя составлял или образовывал продувочный газ или газ внутри катализатора.

Кроме того, следует отметить, что термин "теплоизоляционный материал" означает материалы с теплопроводностью приблизительно 10 Вт(м⁻¹·К⁻¹) или ниже. Примерами теплоизоляционных материалов являются керамика, кирпич, материалы на основе оксида алюминия, материалы на основе диоксида циркония и т.п.

Любые соответствующие зазоры между структурированным катализатором, теплоизоляционным слоем, корпусом высокого давления, и/или любыми другими компонентами внутри реакторной системы предпочтительно заполнены инертным материалом, например, в виде зерен инертного материала. Такими зазорами могут быть, например, зазор между нижней стороной структурированного катализатора и дном корпуса высокого давления и зазор между сторонами структурированного катализатора и изоляционным слоем, покрывающим внутренние стороны кожуха высокого давления. Инертным материалом может быть, например, керамический материал в виде зерен или плитки. Инертный материал способствует контролю распределения газа в реакторной системе и контролю потока газа через структурированный катализатор. Кроме того, инертный материал, как правило, имеет теплоизоляционный эффект.

В одном из вариантов осуществления изобретения расчётное давление корпуса высокого давления находится в диапазоне 2-30 бар. Фактическое рабочее давление будет определяться, помимо прочего, эндотермической реакцией и размером установок. Поскольку самой горячей частью реакторной системы является электропроводящий материал, вокруг которого внутри корпуса высокого давления реакторной системы будет находиться теплоизоляционный слой, температура корпуса высокого давления будет сохраняться на значительно более низком уровне, чем максимальная рабочая температура. Это позволяет

иметь относительно низкую расчетную температуру корпуса высокого давления, например, 700 или 500°C, или предпочтительно 300 или 100°C, при максимальной рабочей температуре на структурированном катализаторе 400 или даже 900 или 1100 или даже до 1300°C. Прочность материала выше при более низкой из этих температур (соответствующей расчетной температуре корпус высокого давления, как указано выше). Это обеспечивает преимущества при проектировании химического реактора.

В одном из вариантов осуществления изобретения расчётное давление корпуса высокого давления находится в диапазоне 30-200 бар, предпочтительно в диапазоне 80-180 бар.

В одном из вариантов осуществления удельное сопротивление электропроводящего материала находится в диапазоне 10^{-5} - 10^{-7} Ω·м. Материал с удельным сопротивлением в этом диапазоне обеспечивает эффективный нагрев структурированного катализатора при подаче энергии от источника питания. Удельное сопротивление графита составляет приблизительно 10^{-5} Ω·м при 20°C, удельное сопротивление кантала составляет приблизительно 10^{-6} Ω·м при 20°C, удельное сопротивление нержавеющей стали составляет приблизительно 10^{-7} Ω·м при 20°C. Электропроводящий материал может быть изготовлен, например, из сплава FeCrAlloy с удельным сопротивлением приблизительно $1,5 \cdot 10^{-6}$ Ω·м при 20°C.

В одном из вариантов осуществления корпус высокого давления включает входное отверстие для подачи технологического газа и выходное отверстие для отвода газообразного продукта, при этом входное отверстие расположено ближе к передней части корпуса высокого давления, а выходное отверстие - к задней части корпуса высокого давления, при этом по меньшей мере два проводника соединены со структурированным катализатором в точке на структурированном катализаторе, расположенной ближе к входному отверстию, чем к выходному отверстию. Из-за этого по меньшей мере два проводника могут быть размещены в существенно более холодной части реакторной системы, поскольку газ на подаче будет иметь более низкую температуру, чем газообразный продукт, а часть электропроводящего материала, расположенная выше по ходу процесса, будет холоднее из-за поглощения тепла в ходе химической реакции, и исходный газ, подачу которого осуществляют через входное отверстие, может охлаждать по меньшей мере два проводника перед нагревом структурированным катализатором далее по пути прохождения газа через структурированный катализатор. Преимуществом является то, что температуру всех электропроводящих элементов, за исключением электропроводящего материала, поддерживают на низком уровне, чтобы защитить соединения между проводниками и структурированным катализатором. Если для проводников и других электропроводящих элементов, за исключением электропроводящего материала, поддерживают относительно низкую температуру, это позволяет использовать более широкий спектр материалов для проводников и других электропроводящих элементов, за исключением электропроводящего материала. Когда температура электропроводящих элементов увеличивается, увеличивается также их удельное сопротивление, следовательно, желательно избежать ненужного нагрева всех других частей, за исключением электропроводящих материалов внутри реакторной системы. Термин "электропроводящие элементы, за исключением электропроводящего материала" включает соответствующие электропроводящие элементы, которые предназначены для подключения источника питания к структурированному катализатору.

В еще одном варианте осуществления два проводника реакторной системы могут быть расположены на разных концах структурированного катализатора.

Следует отметить, что система по изобретению может включать любое подходящее количество источников питания и любое подходящее количество проводников, соединяющих источники питания и электропроводящие материалы структурированного катализатора.

В соответствии с одним из вариантов осуществления реакторной системы по меньшей мере два проводника проходят через корпус высокого давления посредством фитинга таким образом, что по меньшей мере два проводника электрически изолированы от корпуса высокого давления. Фитинг может быть частично изготовлен из пластика и/или керамического материала. Термин "фитинг" означает устройство, которое позволяет механически соединять две части оборудования, которые находятся в такой конфигурации под нагрузкой. С его использованием может поддерживаться давление внутри корпуса высокого давления, даже если через него проходят по меньшей мере два проводника. В качестве неограничивающих примеров фитингов можно привести электроизоляционные фитинги, диэлектрические фитинги, силовые компрессионные уплотнения, компрессионные фитинги или фланцы. Корпус высокого давления, как правило, включает боковые стенки, торцевые стенки, фланцы и, возможно, другие элементы. Термин "корпус высокого давления" может относиться к любому из этих компонентов.

В одном из вариантов осуществления изобретения корпус высокого давления дополнительно включает одно или более входных отверстий, расположенных рядом или в комбинации с по меньшей мере одним фитингом, чтобы предоставить возможность охлаждающему газу проходить через, вокруг, рядом или внутри по меньшей мере одного проводника внутри указанного корпуса высокого давления. Таким образом, обеспечивается охлаждение проводников, и температура нагрева фитинга сохраняется на низком уровне. Если охлаждающий газ не используют, проводники могут нагреваться исходным газом, подаваемым в реакторную систему, резистивным нагревом проводника из-за подачи тока и/или в результате теплопередачи от структурированного катализатора. Охлаждающий газ может, например, представ-

лять собой водород, азот, пар, диоксид углерода или их смеси. Температура охлаждающего газа на подаче в корпус высокого давления может составлять, например, приблизительно 100, или 200, или 250°C. В одном из вариантов осуществления проводники являются полыми, чтобы обеспечить возможность прохождения охлаждающего газа через проводники и охлаждения их изнутри. Поддерживая низкую температуру фитинга, например, на уровне около 100-200°C легче обеспечить герметичную конфигурацию. В одном из вариантов осуществления в качестве охлаждающего газа в корпус высокого давления подают часть исходного газа, например, один из реагентов. В еще одном варианте осуществления в качестве охлаждающего газа используют часть исходного газа или газ того же состава, что и исходный газ.

В одном из вариантов осуществления реакторная система дополнительно включает внутреннюю трубку, при этом между ней и структурированным катализатором осуществляется теплообмен, причем внутренняя трубка выполнена с возможностью отвода газообразного продукта из структурированного катализатора таким образом, что между газообразным продуктом, поступающим через внутреннюю трубку или трубы, осуществляется теплообмен с газом, поступающим над структурированным катализатором, тем не менее, внутренняя трубка электрически изолирована от структурированного катализатора. Такую конфигурацию именуют в настоящем документе байонетной реакторной системой. В этой конфигурации газообразный продукт во внутренней трубке способствует нагреванию технологического газа, поступающего через структурированный катализатор. Электрическая изоляция между внутренней трубкой и структурированным катализатором может обеспечиваться за счет газа в зазоре между внутренней трубкой и структурированным катализатором или за счет инертного материала, расположенного вокруг внутренней трубы и структурированного катализатора. Газ может проходить через структурированный катализатор в восходящем или нисходящем направлении.

В одном из вариантов осуществления изобретения соединение между структурированным катализатором и указанными по меньшей мере двумя проводниками представляет собой механическое соединение, сварное соединение, паяное соединение или их комбинацию. Структурированный катализатор может включать контактные выводы, физически и электрически соединенные со структурированным катализатором, чтобы обеспечить более эффективное электрическое соединение между электропроводящим материалом и по меньшей мере двумя проводниками. Термин "механическое соединение" означает соединение, в котором два компонента удерживаются вместе механически, например, посредством резьбового соединения или зажима, так что между компонентами может проходить ток.

В одном из вариантов осуществления изобретения электропроводящие материалы, размещенные в наборе электропроводящих материалов, могут быть электрически соединены между собой. Соединение между двумя или более электропроводящими материалами может осуществляться посредством механического соединения, зажима, пайки, сварки или любой комбинации этих методов соединения. Каждый электропроводящий материал может включать контактные выводы, чтобы обеспечить более эффективное электрическое соединение. Два или несколько электропроводящих материалов могут быть подключены к источнику питания последовательно или параллельно. Электрическое соединение между двумя или более электропроводящими материалами предпочтительно является связным и однородным вдоль поверхности соединения между двумя или более электропроводящими материалами, так что два или более электропроводящих материала действуют как единый связный или внутренне цельный материал, тем самым обеспечивается однородная электропроводность двух или нескольких электропроводящих материалов. В качестве альтернативы или дополнительно структурированный катализатор может включать набор электропроводящих материалов, которые электрически не соединены между собой. Вместо этого два или несколько электропроводящих материала размещены вместе внутри корпуса высокого давления, но электрически не соединены друг с другом. Таким образом, в этом случае структурированный катализатор включает электропроводящие материалы, подключенные к источнику питания параллельно.

Керамическое покрытие с каталитически активным материалом или без него может быть нанесено непосредственно на металлическую поверхность электропроводящего материала путем протравной грунтовки. Протравная грунтовка является известной технологией, ее описание приведено в работе e.g. Cybulski, A., and Moulijn, J. A., "Структурированные катализаторы и реакторы" (Structured catalysts and reactors), Marcel Dekker, Inc, Нью-Йорк, 1998, глава 3, в ссылочных материалах в настоящем документе. Керамическое покрытие может быть нанесено на поверхность электропроводящего материала, а затем может быть добавлен каталитически активный материал. В качестве альтернативы на макроскопическую структуру или на электропроводящий материал наносят керамическое покрытие, содержащее каталитически активный материал. Керамическое покрытие может представлять собой, например, оксид, содержащий Al, Zr, Mg, Ce и/или Ca. Покрытие может представлять собой, например, алюминат кальция или алюмомагниева шпинель. Такое керамическое покрытие может содержать дополнительные элементы, такие как La, Y, Ti, K или их комбинации.

Керамическое покрытие представляет собой электроизоляционный материал и, как правило, имеет толщину в диапазоне приблизительно 100 мкм, например 10-500 мкм.

В результате экструзии и спекания или 3D-печати получают однородную макроскопическую структуру связной формы, на которую впоследствии можно нанести керамическое покрытие.

Спекание электропроводящего материала и керамического покрытия может осуществляться в окис-

лительной атмосфере для образования химических связей между керамическим покрытием и электропроводящим материалом. Это обеспечивает особенно высокую теплопроводность между электропроводящим материалом и каталитически активным материалом, который расположен на подложке из керамического покрытия. Таким образом, структурированный катализатор оптимизирован с точки зрения передачи тепла активному каталитическому центру, и также реакторная система, в которой находится структурированный катализатор, может быть оптимизирована и ограничиваться, главным образом, скоростью химической реакции. Теплоотдача извне корпуса высокого давления к структурированному катализатору не осуществляется, как в случае известных SMR, где теплопередача происходит через стенки труб к катализатору внутри труб.

В одном из вариантов осуществления структурированный катализатор имеет электроизоляционные части, с помощью которых длина пути тока между проводниками увеличивается и становится больше длины структурированного катализатора по наибольшему измерению. Путь тока между проводниками больший, чем наибольшие измерение структурированного катализатора может быть обеспечен за счет расположения между проводниками электроизоляционных частей, когда ток не проходит через некоторую часть структурированного катализатора. Такие электроизоляционные части предназначены для увеличения пути тока и, таким образом, увеличения сопротивления в структурированном катализаторе. В качестве неограничивающих примеров изоляционных частей можно привести прорези, щели, изгибы или отверстия в электропроводящем материале. При необходимости, в прорезях в конструкции можно использовать твердый изоляционный материал, такой как керамика. В случае, когда твердый изолирующий материал представляет собой пористый керамический материал, каталитически активный материал может преимущественно вводиться в поры, например, посредством пропитки. Твердый изолирующий материал внутри прорези помогает изолировать части структурированного катализатора по сторонам прорези друг от друга. При использовании по тексту настоящего изобретения термин "наибольшее измерение структурированного катализатора" означает наибольшее внутреннее измерение геометрической формы, занимаемой структурированной катализатором. Если структурированный катализатор имеет форму коробки, наибольшим измерением будет диагональ от одного угла до самого дальнего угла, которую также именуют пространственной диагональю.

Следует отметить, что даже несмотря на то, что благодаря электроизоляционным частям, предусмотренным для увеличения пути тока, ток может проходить через структурированный катализатор с изменением направления, газ, проходящий через реакторную систему, поступает в одну часть реакторной системы и один раз проходит над структурированным катализатором перед тем, как выйти из реакторной системы. В соответствующих зазорах между структурированным катализатором и остальной частью реакторной системы предпочтительно присутствует инертный материал, чтобы внутри реакторной системы газ проходил над структурированным катализатором и каталитически активным материалом.

В одном варианте осуществления длина газового канала через структурированный катализатор меньше, чем длина пути тока от одного электрода через структурированный катализатор к следующему электроду. Соотношение длины газового канала к длине пути тока может быть меньше 0,6 или 0,3, 0,1 или даже 0,002.

В одном из вариантов осуществления структурированный катализатор имеет электроизоляционные части, с помощью которых ток направляют через структурированный катализатор по зигзагообразному пути. В настоящем документе термин "зигзагообразный путь" означают путь от одного проводника к другому, направление которого меняется под разными углами. Зигзагообразный путь - это, например, путь, который идет вверх, поворачивает, а затем идет вниз. Зигзагообразный путь может иметь множество поворотов, он может идти вверх, а затем вниз много раз при прохождении через структурированный катализатор, даже если одного поворота достаточно, чтобы сделать путь зигзагообразным.

Следует отметить, что изолирующие части, предназначенные для увеличения пути прохождения тока, не обязательно связаны с керамическим покрытием на электроизолирующем материале, хотя это керамическое покрытие также считается электроизоляционным, оно не изменяет длину пути тока между проводниками, подключенными к электропроводящему материалу.

В одном из вариантов осуществления изобретения макроскопическая структура имеет множество параллельных каналов, множество непараллельных каналов и/или множество лабиринтных каналов, 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 осуществления параллельные продольные каналы расположены под углом относительно продольной оси 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 макси-

мальной протяженностью в поперечном сечении примерно до 4 см. Толщина стенок может, например, составлять 0,2-2 мм, например приблизительно 0,5 мм, а толщина керамического покрытия, расположенного на стенках, составляет 10-500 мкм, например, 50-200 мкм, например 100 мкм. В еще одном варианте осуществления макроскопическая структура структурированного катализатора имеет поперечное гофрирование.

В целом, когда макроскопическая структура изготовлена путем экструзии или по технологии объемной печати, перепад давления от входа к выходу из реакторной системы может быть значительно снижен по сравнению с реактором, в котором материал катализатора находится в форме зеренокатыш.

В одном из вариантов осуществления изобретения реакторная система дополнительно включает слой второго каталитического материала по ходу процесса перед структурированным катализатором внутри корпуса высокого давления. В настоящем документе термин "по ходу процесса перед" означает "перед" по направлению потока исходного газа. Таким образом, в настоящем документе термин "по ходу процесса перед" означает, что исходный газ направляют через слой второго каталитического материала до подачи в структурированный катализатор. Это обеспечивает ситуацию, когда такой второй каталитический материал может использоваться для подготовки исходного потока. Слой второго каталитического материала не требует специального нагрева, однако может осуществляться не прямой нагрев слоя второго каталитического материала, если он находится в непосредственной близости от структурированного катализатора. В качестве альтернативы может осуществляться не прямой нагрев второго каталитического материала. Чтобы прояснить используемую в настоящем документе терминологию, следует отметить, что термин "структурированный катализатор" может также относиться к первому каталитическому материалу, чтобы отличать его от второго и/или третьего, и/или четвертого каталитического материала.

В одном из вариантов осуществления изобретения реакторная система дополнительно включает третий каталитический материал в виде зерен катализатора, экструдатов или гранул катализатора, которые загружены в каналы макроскопической структуры. Таким образом, в этом варианте осуществления реакторная система будет иметь каталитически активный материал в покрытии макроскопической структуры и третий каталитический материал в виде зерен катализатора, экструдатов или гранул катализатора внутри каналов макроскопической структуры. Зерна, например, могут иметь такой размер, который приблизительно соответствует размеру каналов, чтобы сформировать единую цепочку зерен, уложенных друг на друга внутри канала макроскопической структуры. В качестве альтернативы зерна, экструдаты или гранулы могут иметь размер, значительно меньшим, чем размер канала, для образования уплотненного слоя внутри каждого канала. При использовании по тексту настоящего изобретения термин "зерно" означает любую определенную структуру, имеющую максимальный внешний размер в диапазоне миллиметров или сантиметров, в то время как термины "экструдат" и "гранулят" определяют материал катализатора с максимальным внешним размером в определенном диапазоне.

В одном из вариантов осуществления изобретения внутри корпуса высокого давления после указанного структурированного катализатора размещен слой четвертого каталитического материала. Такой четвертый каталитический материал может быть в виде зерен, экструдатов или гранул катализатора.

В одном варианте осуществления первый, второй, третий и четвертый каталитические материалы представляют собой каталитические материалы, подходящие для реакции парового риформинга, реакции предварительного риформинга или реакции конверсии водяного газа, реакции дегидрогенизации, реакции крекинга метанола, реакции крекинга аммиака или реакции синтеза цианистого водорода. В конфигурации, где реакторная система включает комбинацию второго, третьего и четвертого каталитического материала, катализатор каждого каталитического материала может быть различным.

В одном из вариантов осуществления изобретения геометрическая площадь поверхности макроскопической структуры находится в диапазоне $100-3000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, например $500-1100 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

В одном из вариантов осуществления изобретения материал макроскопической структуры подобран таким образом, чтобы путем нагрева материала сопротивлением создавался тепловой поток $500-50000 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Предпочтительно нагрев сопротивлением материала обеспечивает тепловой поток в диапазоне $5-12 \text{ кВт}/\text{м}^2$, например в диапазоне $8-10 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Тепловой поток определяется как количество тепла на геометрическую площадь поверхности, подверженной воздействию газа.

В одном из вариантов осуществления изобретения реакторная система дополнительно включает систему контроля, выполненную с возможностью контроля подачи электроэнергии, чтобы температура газа, выходящего из корпуса высокого давления, была в предварительно определенном диапазоне и/или для того, чтобы степень конверсии углеводородов в исходном газе была в предварительно определенном диапазоне. Контроль подачи электроэнергии - это контроль электрической мощностью от источника питания. Контроль подачи электроэнергии может, например, осуществляться как контроль напряжения и/или тока, подаваемого от источника электрического питания, как контроль путем включения/выключения источника электрического питания или с помощью комбинации указанных способов. На структурированный катализатор может подаваться переменный или постоянный ток.

Определенный температурный диапазон газа, выходящего из корпуса высокого давления/реакторной системы, - это диапазон от 200 до 1300°C , в зависимости от протекающей эндотермической реакции.

Чтобы контролировать температуру реакции, необходимо обеспечить равновесие тепла, подводимого к реакторной системе или отводимого из реакторной системы, с теплом, потребляемым/производимым в ходе химической реакции. Подача/отвод тепла должны быть уравновешены скоростью реакции и, в частности, температурой приближения к равновесным условиям, определенной β , где β - соотношение между коэффициентом реакции и константой равновесия реакции. Если значение β приближается к 1, это означает, что реакционная смесь близка к равновесию, а значения, приближающиеся к 0, означают, что реакционная смесь далека от равновесия. В целом желательно иметь как можно более высокую скорость реакции, которая достигается при низком β , при условии, что можно в достаточной степени параллельно регулировать температуру, уравнивая добавляемую энергию.

В случае эндотермической реакции парового риформинга метана необходимо подавать добавочное тепло для продолжения реакции, поскольку в противном случае реакция будет уравновешена, значение β приблизится к 1, и реакция замедлится. Тем не менее, с другой стороны, желательно, чтобы повышение температуры соответствовало скорости реакции, поскольку воздействие высоких температур на непрореагировавшие углеводороды может привести к нагарообразованию. Можно эффективно следить за этим путем приближения к равновесным условиям. Температуру приближения к равновесным условиям реакции парового риформинга определяют вначале путем расчета коэффициента реакции (Q) для определенного газа:

$$Q = \frac{y_{CO} \cdot y_{H_2}^3}{y_{CH_4} \cdot y_{H_2O}} \cdot P^2$$

Здесь y_j - мольная доля j соединения, а P - полное значение давления в барах. Это уравнение используют для определения температуры равновесия (T_{eq}), при которой данный коэффициент реакции равен константе равновесия:

$$Q = K_{SMR}(T_{eq})$$

где K_{SMR} - термодинамическая константа равновесия реакции парового риформинга метана. Температура приближения к равновесным условиям ($\Delta T_{равн,SMR}$) реакции парового риформинга метана определяется следующим образом:

$$\Delta T_{равн,SMR} = T - T_{eq}$$

где T - средняя массовая температура газа, окружающего используемый каталитический материал, такой как структурированный катализатор.

Для обеспечения хороших характеристик катализатора парового риформинга желательно, чтобы катализатор непрерывно работал в направлении уменьшения $\Delta T_{равн,SMR}$. Исторически, крупномасштабные промышленные SMR имели температуру приближения к равновесным условиям 5-20°C на выходе.

Применение настоящего изобретения позволяет осуществлять контроль теплового потока и согласовывать его непосредственно с кинетическими характеристиками структурированного катализатора, поскольку они в некоторой степени независимы.

В одном из вариантов осуществления в указанной реакторной системе соотношение между эквивалентным диаметром площади горизонтального поперечного сечения структурированного катализатора и высотой структурированного катализатора находится в диапазоне 0,1-2,0. Эквивалентный диаметр площади поперечного сечения реакторной системы определяется как диаметр окружности с площадью эквивалентной площади поперечного сечения. Когда соотношение между эквивалентным диаметром площади и высотой структурированного катализатора составляет 0,1-2,0, корпус высокого давления, в которой находится структурированный катализатор, может быть относительно небольшой по сравнению с другими реакторными системами для эндотермических реакций, например, по сравнению с существующими SMR.

Как правило, газ проходит через реакторную систему в восходящем или нисходящем направлении, так что газ поступает через каналы в структурированном катализаторе в направлении высоты структурированного катализатора. Когда структурированный катализатор включает несколько макроскопических структур или набор макроскопических структур, отдельные макроскопические структуры внутри массива могут быть размещены рядом, друг на друге или может быть комбинированное расположение макроскопических структур. Подчеркивается, что, когда структурированный катализатор включает более одной макроскопической структуры, размеры структурированного катализатора определяются размерами нескольких макроскопических структур. Таким образом, например, если структурированный катализатор состоит из двух установленных друг на друга макроскопических структур, каждая из которых имеет высоту h , высота структурированного катализатора составляет $2h$.

Объем структурированного катализатора выбирают с учетом желательной степени конверсии и/или температуры на выходе из реакторной системы, коррелирующей со способностью к тепловыделению электропроводящего материала.

В одном из вариантов осуществления изобретения высота реакторной системы составляет 0,5-7 м, более предпочтительно 0,5-3 м. Высота реакторной системы может составлять, например, менее 5 м, предпочтительно менее 2 или даже 1 м. Размеры реакторной системы и структурированного катализато-

ра внутри реакторной системы являются взаимосвязанными. Очевидно, что из-за корпуса высокого давления и теплоизоляционного слоя реакторная система имеет несколько больший размер, чем сам структурированный катализатор. Для сравнения, SMR в промышленном масштабе обычно конструируют из катализаторных труб длиной 10 м или более, чтобы максимально увеличить площадь внешней поверхности труб. Настоящее изобретение имеет то преимущество, что конструкция реакторной системы не имеет таких ограничений.

Еще один аспект изобретения относится к способу осуществления эндотермической реакции исходного газа в описанной реакторной системе. Указанный способ включает следующие этапы:

подачу указанного исходного газа в реакторную систему путем введения указанного технологического газа в точку, расположенной рядом с передней частью корпуса высокого давления;

обеспечение эндотермической реакции исходного газа над нагретым структурированным катализатором и отвод газообразного продукта из реакторной системы, причем указанный газообразный продукт выходит в точке, расположенной рядом с задней части корпуса высокого давления; и подачу тока через проводники, соединяющие источник питания, расположенный вне указанного корпуса высокого давления, в указанный структурированный катализатор, что позволяет осуществить пропускание тока через указанный электропроводящий материал, посредством чего обеспечивается нагрев, по меньшей мере, части структурированного катализатора до температуры по меньшей мере 200°C.

Способ обеспечивает те же преимущества, что описаны для реакторной системы. Тем не менее, способ может включать дополнительные этапы, на которых будет осуществляться переработка газообразного продукта, например, очистка, повышение давления, нагревание, охлаждение и т.д., с получением конечного газообразного продукта, который будет использоваться в способе после реакторной системы по изобретению.

Следует отметить, что исходный газ может содержать отдельные исходные газы, и что этап сжатия исходного газа может включать сжатие отдельных исходных газов. Кроме того, следует отметить, что этапы способа не обязательно должны выполняться в указанном порядке, например, два этапа или несколько этапов могут выполняться одновременно, или порядок может отличаться от вышеуказанного порядка.

В одном из вариантов осуществления способ дополнительно включает этап сжатия исходного газа по ходу процесса перед корпусом высокого давления до давления по меньшей мере в диапазоне 2 бар и подачу указанного сжатого исходного газа в реакторную систему посредством введения указанного сжатого исходного газа в указанной точке, расположенной рядом с передней частью корпуса высокого давления. Выбранное рабочее давление определяется эндотермической реакцией и технологическими этапами, в которые встроены реактор.

В одном из вариантов осуществления способа по изобретению температура исходного газа, поступающего в реакторную систему, составляет 100-700°C. Тем не менее, во всех вариантах осуществления температура и давление исходного газа регулируются для обеспечения того, чтобы температура исходного газа была выше точки росы.

В одном из вариантов осуществления способа по изобретению осуществляют нагрев структурированного катализатора таким образом, что максимальная температура структурированного катализатора находится в диапазоне 200-1300°C. Используемая температура будет зависеть от эндотермической реакции. Максимальная температура структурированного катализатора зависит от материала электропроводящего материала. Таким образом, если электропроводящий материал изготовлен из сплава Fecralloy®, температура плавления которого составляет 1380-1490°C (в зависимости от фактических свойств сплава), максимальная температура должна быть несколько ниже точки плавления, например, приблизительно 1300°C, если точка плавления электропроводящего материала составляет приблизительно 1400°C, так как при приближении к точке плавления материал станет мягким и пластичным. Максимальная температура может быть дополнительно ограничена износоустойчивостью материала катализатора, покрытия и каталитически активного материала.

В одном из вариантов осуществления способ по настоящему изобретению включает этап подачи охлаждающего газа через входное отверстие в корпусе высокого давления, чтобы охлаждающий газ мог проходить через по меньшей мере один проводник и/или фитинг. Охлаждающим газом может быть предпочтительно водород, азот, пар, диоксид углерода или любой другой газ, подходящий для охлаждения области или зоны вокруг по меньшей мере одного проводника. В качестве охлаждающего газа в корпус высокого давления может подаваться часть исходного газа.

В одном из вариантов осуществления изобретения способ дополнительно включает этап подачи охлаждающего газа через входное отверстие в корпусе высокого давления, чтобы охлаждающий газ мог проходить через по меньшей мере один проводник и/или фитинг. В качестве охлаждающего газа может использоваться любой подходящий газ, например охлаждающий газ может представлять собой водород, азот, пар, диоксид углерода или их смеси.

Охлаждающий газ может поступать через проводники и охлаждать их изнутри, в этом случае проводники должны быть полыми, чтобы вмещать охлаждающий газ.

В одном из вариантов осуществления эндотермическая реакция представляет собой дегидрогениза-

цию углеводородов. Реакция протекает в соответствии с уравнением (viii). Каталитическим материалом для реакции может быть Pt/Al₂O₃ или Pt-Sn/Al₂O₃. Каталитически активный материал может представлять собой Pt. Максимальная температура реактора может составлять 500-700°C. Давление исходного газа может составлять 2-5 бар.

В одном из вариантов осуществления изобретения эндотермическая реакция представляет собой крекинг метанола. Реакция протекает в соответствии с уравнениями (v), (ix) и (x). Каталитическим материалом для реакции может быть Ni/MgAl₂O₃ или Cu/Zn/Al₂O₃. Каталитически активный материал может представлять собой Si или Ni. Максимальная температура реактора может составлять 200-300°C. Давление исходного газа может составлять 2-30 бар, предпочтительно приблизительно 25 бар.

В одном из вариантов осуществления изобретения эндотермическая реакция представляет собой паровой риформинг углеводородов. Реакция протекает в соответствии с уравнениями (i)-(v). Каталитическим материалом для реакции может быть Ni/Al₂O₃, Ni/MgAl₂O₃, Ni/CaAl₂O₃, Ru/MgAl₂O₃ или Rh/MgAl₂O₃. Каталитически активный материал может представлять собой Ni, Ru, Rh, Ir или их комбинацию. Максимальная температура реактора может составлять 850-1300°C. Давление исходного газа может составлять 15-180 бар, предпочтительно приблизительно 25 бар.

В одном из вариантов осуществления изобретения эндотермическая реакция представляет собой крекинг аммиака. Реакция протекает в соответствии с уравнением (xi). Каталитическим материалом для реакции может быть Fe, FeCo или Ru/Al₂O₃. Каталитически активный материал может представлять собой Fe или Ru. Максимальная температура реактора может составлять 400-700°C. Давление исходного газа может составлять 2-30 бар, предпочтительно приблизительно 25 бар.

В одном из вариантов осуществления изобретения эндотермическая реакция представляет собой синтез цианистого водорода или процесс синтеза органических нитрилов. Реакция протекает в соответствии с уравнением (vi) и (vii). Каталитическим материалом для реакции может быть Pt/Al₂O₃. Каталитически активный материал может представлять собой Pt, Co или SnCo. Максимальная температура реактора может составлять 700-1200°C. Давление исходного газа может составлять 2-30 бар, предпочтительно приблизительно 5 бар.

В одном из вариантов осуществления изобретения эндотермическая реакция представляет собой ароматизацию углеводородов. Предпочтительно, эндотермическая реакция представляет собой ароматизацию высших углеводородов.

Далее приводится подробное описание вариантов осуществления настоящего изобретения со ссылкой на прилагаемые чертежи. Приводится описание примеров вариантов осуществления, достаточно подробное для иллюстрации изобретения. Тем не менее, такое подробное описание не ограничивает возможные модификации вариантов осуществления; напротив, цель состоит в том, чтобы охватить все возможные модификации, эквивалентные и альтернативные варианты, которые соответствуют существу и объему настоящего изобретения, согласно определению в прилагаемой формуле изобретения.

Краткое описание фигур

На фиг. 1a представлен поперечный разрез реакторной системы по изобретению со структурированным катализатором, включающим набор макроскопических структур, в соответствии с одним вариантом осуществления изобретения;

на фиг. 1b показана реакторная система, которая также показана на фиг. 1a, при этом на фиг. 1b удалена часть корпуса высокого давления и теплоизоляционного слоя;

на фиг. 2 приведен увеличенный вид части реакторной системы;

на фиг. 3a и 3b представлен вид в поперечном разрезе реакторной системы, включающей структурированный катализатор, в соответствии с одним вариантом осуществления изобретения;

на фиг. 4 и 5 показан вариант осуществления структурированного катализатора с набором макроскопических структур, вид сверху и сбоку соответственно;

на фиг. 6 представлен вариант осуществления структурированного катализатора по изобретению;

на фиг. 7, 8 и 9 показаны варианты осуществления структурированного катализатора с соединителями;

на фиг. 10 показана необходимая максимальная температура в реакторной системе по изобретению в функциональной зависимости от давления; и

на фиг. 11 приведен график приближения к равновесным условиям ($\Delta T_{app,SMR}$) реакции парового риформинга метана для различных значений расхода газового потока через структурированный катализатор.

Подробное описание фигур

На всех фигурах номера позиций означают соответствующие элементы.

На фиг. 1 представлен вид в поперечном разрезе реакторной системы 100 в соответствии с одним вариантом осуществления изобретения. Реакторная система 100 включает структурированный катализатор 10, расположенный в виде набора макроскопических структур 5. Каждая макроскопическая структура 5 в наборе имеет керамическое покрытие, пропитанное каталитически активным материалом. Кроме того, реакторная система 100 включает проводники 40, 40', подключенные к источнику питания (не показан на фигурах) и к структурированному катализатору 10, а именно к набору макроскопических структур

тур. 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. Проводники 40' подсоединены к набору макроскопических структур 5 посредством контактных шин 41 проводников.

В одном из вариантов осуществления изобретения используют источник питания с напряжением 26 В и током 1200 А. В еще одном варианте осуществления изобретения используют источник питания с напряжением 5 В и ток 240 А. Ток подают по проводникам 40, 40' к контактным шинам 41 проводников, и ток проходит через структурированный катализатор 10 от одной контактной шины 41 проводника, например, от контактной шины проводника, которая на фиг. 1а показана слева, до другой контактной шины 41 проводника, например, контактной шины проводника, которая на фиг. 1а показана справа. Ток может быть переменным и, например, идти попеременно в обоих направлениях, или он может быть 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, нанесенный на структурированный катализатор 5, пропитано каталитически активным материалом. Проводники 40, 40' выполнены из таких материалов, как железо, алюминий, никель, медь или их сплавы.

Во время работы исходный газ подают в реакторную систему 100 сверху, как показано стрелкой 11, и выходит из реакторной системы внизу, как показано стрелкой 12.

На фиг. 1b показана реакторная система 100, которая также показана на фиг. 1а, при этом на фиг. 1b удалена часть корпуса высокого давления 20 и теплоизоляционного слоя 30, а на фиг. 2 приведен увеличенный вид части реакторной системы 100. На фиг. 1b и 2 соединения между проводниками 40' и контактными шинами 41 проводника 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 разделяют на три проводника 40'. Следует отметить, что может использоваться любое подходящее количество проводников 40', например, может использоваться меньше трех или больше трех проводников.

В реакторной системе, показанной на фиг. 1а, 1b 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 парового риформинга подают в реакторную систему 100 через входное отверстие в верхней части реакторной системы 100, показанное стрелкой 11, а газ, прошедший риформинг, покидает реакторную систему 100 через выходное отверстие в нижней части реакторной системы 100, показанное стрелкой 12. Более того, рядом с фитингами 50 или в комбинации с фитингами могут быть преимущественно расположены одно или несколько дополнительных входных отверстий (не показаны на фиг. 1а-2). Такие дополнительные входные отверстия позволяют охлаждающему газу проходить через, вокруг, рядом или внутри по меньшей мере одного проводника внутри указанного корпуса высокого давления, чтобы уменьшить нагрев фитинга. Охлаждающий газ может, например, представлять собой водород, азот, пар, диоксид углерода или их смеси. Температура охлаждающего газа на подаче в корпус высокого давления может составлять, например, приблизительно 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. Инертным материалом является, например, керамический материал. Инертный материал может иметь форму гранул. Инертный материал способствует контролю перепада давления в реакторной системе 100 и контролю потока газа через реакторную систему 100, так что поток газа поступает по поверхностям структурированного катализатора 10.

На фиг. 3а и 3б представлен схематический вид в поперечном разрезе реакторной системы 100', 100'', включающей структурированный катализатор 10' в соответствии с одним вариантом осуществления изобретения. Структурированный катализатор 10' может состоять из единой макроскопической структуры с керамическим покрытием, которая выступает в качестве подложки каталитически активного материала, или структурированный катализатор может включать две или несколько макроскопических структур. Каждая из реакторных систем 100', 100'' содержит корпус высокого давления 20 и теплоизоляционный слой 80 между структурированным катализатором 10' и корпусом высокого давления 20. Для заполнения зазора между структурированным катализатором 10' и теплоизоляционным слоем или корпусом высокого давления 20 может использоваться инертный материал 90. На фиг. 3а и 3б инертный материал 90 обозначен штриховкой; инертный материал 90 может быть в любой подходящей форме, например, в виде инертных гранул, и представлять собой, например, керамический материал. Инертный материал 90 способствует контролю перепада давления в реакторной системе и контролю потока газа через

реакторную систему. Кроме того, инертный материал, как правило, имеет теплоизоляционный эффект.

Из фиг. 3а и 3б видно, что реакторные системы 100', 100" дополнительно содержат внутреннюю трубку 15, при этом между ней и структурированным катализатором 10' осуществляется теплообмен. Внутренняя трубка 15 выполнена с возможностью отвода газообразного продукта из структурированного катализатора 10' таким образом, что между газообразным продуктом, поступающим через внутреннюю трубку или трубы, осуществляется теплообмен с газом, поступающим над структурированным катализатором; тем не менее, внутренняя трубка 15 электрически изолирована от структурированного катализатора 10' теплоизоляционным слоем 80 или инертным материалом 90 или зазором или их комбинацией. Такую конфигурацию именуют байонетной реакторной системой. В этой конфигурации газообразный продукт во внутренней трубе способствует нагреванию технологического газа, поступающего через макроскопическую структуру. В конфигурациях, показанных на фиг. 3а и 3б, исходный газ подают в реакторную систему 100', 100", как указано стрелкой 11, и поступает в структурированный катализатор 10', как показано стрелками 13. Во время прохождения исходного газа над структурированным катализатором 10' осуществляют реакцию парового риформинга исходного газа. Газ, выходящий из структурированного катализатора 10', по меньшей мере, частично прореагировал в реакции риформинга. По меньшей мере, частично реформированный газ поступает из структурированного катализатора 10' во внутреннюю трубку 15, как показано стрелками 14, и выходит из внутренней трубы, как показано стрелками 12. Даже несмотря на то, что между внутренней трубкой 15 и структурированным катализатором 10' присутствует теплоизоляционный слой 80, будет происходить некоторая теплопередача от газа внутри внутренней трубы 15 и газа внутри структурированного катализатора 10' или по ходу процесса перед структурированным катализатором 10'. В вариантах осуществления, показанных на фиг. 3а и 3б, исходный газ поступает вниз через структурированный катализатор 10', а затем вверх через внутреннюю трубку 15; однако возможна и обратная конфигурация, так что исходный газ будет поступать вверх через структурированный катализатор 10' и вниз через внутреннюю трубку 15.

На фиг. 4 и 5 показан вариант осуществления структурированного катализатора, включающего набор макроскопических структур, вид сверху и сбоку соответственно. На фиг. 4 показан структурированный катализатор 10, включающий набор макроскопических структур 5, вид сверху, а именно вид по направлению стрелки 11 на фиг. 1а и 1б. Этот набор имеет 6 рядов, а именно 1а, 1б, 1с, 1д, 1е и 1ф пяти макроскопических структур 5. Макроскопические структуры 5 в каждом ряду соединены с соседней макроскопической структурой в том же ряду, а две крайние макроскопические структуры в каждом ряду соединены с контактной шиной 41 проводника. Соседние макроскопические структуры 5 в ряду макроскопических структур соединены друг с другом посредством соединительного элемента 3.

На фиг. 5 показан структурированный катализатор 10, имеющий набор макроскопических структур 5, показанных на фиг. 4, вид сбоку. На фиг. 5 видно, что каждая макроскопическая структура 5 проходит в продольном направлении перпендикулярно поперечному сечению, показанному на фиг. 4. Каждая макроскопическая структура 5 имеет прорезь 60, прорезанную в продольном направлении относительно макроскопической структуры (см. фиг. 5). Следовательно, ток от источника питания подают в набор макроскопических структур 5 через контактную шину 41 проводника, проходит через первую макроскопическую структуру 5 вниз до нижней границы прорези 60 и затем подается вверх к соединительному элементу 3. Ток проходит по соответствующей зигзагообразной траектории вниз и вверх через каждую макроскопическую структуру 5 в каждом ряду 1а-1ф макроскопических структур 5 в наборе 10. Преимущество этой конфигурации состоит в том, что в этом случае увеличивается сопротивление по сравнению со структурированным катализатором 10.

На фиг. 6 показан вид структурированного катализатора 10' по настоящему изобретению в перспективе. Структурированный катализатор 10' содержит макроскопическую структуру, которая имеет керамическое покрытие, пропитанное каталитически активным материалом. Внутри структурированного катализатора имеются каналы 70, проходящие в продольном направлении (показанном стрелкой, обозначенной "h" на фиг. 6) макроскопической структуры 5, эти каналы ограничены стенками 75. В варианте осуществления, показанном на фиг. 6, стенки 75 образуют ряд параллельных квадратных каналов 70, если смотреть со стороны направления потока, указанного стрелкой 12. Структурированный катализатор 10' имеет практически квадратный (при взгляде сверху) периметр, определяемый кромками e1 и e2. Однако периметр также может быть круглым или иметь другую форму.

Стенки 75 структурированного катализатора 10 выполнены из экструдированного или изготовленного по технологии объемной печати материала с керамическим покрытием, например из оксида, нанесенного на макроскопическую структуру в виде покрытия. На фигурах керамическое покрытие не показано. Керамическое покрытие пропитано каталитически активным материалом. Керамическое покрытие и, следовательно, каталитически активный материал имеется на каждой стенке структурированного катализатора 10', по которому поступает поток газа во время работы реактора и взаимодействует с нагретой поверхностью структурированного катализатора и каталитически активным материалом.

Таким образом, в реакторной системе для парового риформинга углеводородный исходный газ проходит через каналы 70 и взаимодействует с нагретой поверхностью структурированного катализатора и с каталитически активным материалом, расположенным на подложке из керамического покрытия.

В структурированном катализаторе 10, показанном на фиг. 6, имеется прорезь 60. Из-за этой прорези 60 ток проходит внутри макроскопической структуры зигзагообразным путем (в данном случае вниз, а затем вверх), в результате чего путь тока увеличивается и, следовательно, увеличивается сопротивление и, следовательно, увеличивается количество теплоты, которое отдается макроскопической структуре. В прорезь 60 внутри макроскопической структуры может быть встроен изоляционный материал, чтобы обеспечить отсутствие течения тока в направлении, поперечном прорези 60.

Каналы 70 в структурированном катализаторе 10 открыты с обоих концов. При использовании структурированного катализатора в реакторной системе углеводородный исходный газ проходит через установку в направлении, показанном стрелками 11 и 12 на фиг. 1а и 1б, и нагревается за счет контакта со стенками 75 каналов 70 и за счет радиационного нагрева. Из-за тепла инициируется необходимый процесс парового риформинга. Толщина стенок 75 каналов 70 может составлять, например, 0,5 мм, а толщина керамического покрытия, нанесенного на стенки 75, может составлять, например, 0,1 мм. Несмотря на то, что стрелки 11 и 12 (см. фиг. 1а и 1б) показывают, что поток углеводородного исходного газа направлен вниз, также возможно противоположное направление потока, а именно поток может быть направлен вверх.

На фиг. 7 приведен вид структурированного катализатора 10 согласно фиг. 1а и 1б в перспективе с прикрепленными соединителями 7. Каждый соединитель 7 соединяет часть структурированного катализатора 10 с проводником 40. Оба проводника 40 подключены к источнику питания (не показан). Каждый из соединителей 7 соединен с верхней частью структурированного катализатора. Когда проводники 40 подключены к источнику питания, ток подводится к соответствующему соединителю 7 через проводник и проходит через структурированный катализатор 10. Прорезь 60 препятствует прохождению тока в поперечном направлении (горизонтальное направление на фиг. 7) по всей ее длине по высоте h структурированного катализатора 10. Следовательно, ток течет в вниз, как показано на фиг. 7 в части структурированного катализатора вдоль прорези 60, затем он проходит перпендикулярно к продольной оси структурированного катализатора под прорезью 60, как показано на фиг. 7, и, наконец, ток течет вверх, параллельно продольной оси структурированного катализатора к другому соединителю 7. Соединители 7 на фиг. 7 механически прикреплены к структурированному катализатору, в частности, с помощью механических крепёжных элементов, таких как винты и болты. Однако возможны дополнительные или альтернативные крепёжные элементы. В одном из вариантов осуществления изобретения используют источник питания с напряжением 3 В и током 400 А. Проводники 7 выполнены, например, из таких материалов, как железо, алюминий, никель, медь или их сплавы.

Как уже указывалось, структурированный катализатор 10 имеет керамическое покрытие, например, из оксида, которое выступает в качестве подложки каталитически активного материала. Тем не менее, части структурированного катализатора 10, которые соединены с соединителями 7, не должны быть покрыты оксидом. Вместо этого макроскопическая структура структурированного катализатора должна контактировать непосредственно с соединителями 7 или быть соединена с ними, чтобы обеспечить необходимый электрический контакт между макроскопической структурой и соединителем.

Когда соединители 7 и, следовательно, проводники 40 подключены к одной части структурированного катализатора 10, т.е. к верхней части, как показано на фиг. 7, газ, подающийся в реакторную систему, в которой находится структурированный катализатор 10, сможет охлаждать соединители 7 и проводники 40. Например, углеводородный газ, подающийся в такую реакторную систему, будет иметь температуру 400 или 500°C, таким образом, этот газ не даст соединителям 7 и проводникам 40 достичь температур, намного превышающих эту температуру.

На фиг. 8 показан альтернативный вариант осуществления структурированного катализатора 10' с прикрепленными соединителями 7'. Структурированный катализатор 10', показанный на фиг. 8, имеет квадратное поперечное сечение, как структурированный катализатор 10, показанный на фиг. 6 и 7, но структурированный катализатор 10' на фиг. 8 не имеет прорезей. В верхней и нижней части макроскопической структуры 10' расположен проводник 40. Проводник 40 может быть изготовлен, например, из никеля. В качестве альтернативы в качестве распределителей электрического тока могут использоваться другие подходящие металлы или сплавы, такие как FeCrAlloy. Для направления тока через структурированный катализатор 10', то есть через макроскопическую структуру, используются соединители 7', 7'' в виде электропроводящих брусков. Соединители 7', 7'' прикреплены к проводникам 40 и структурированному катализатору 10' посредством механических крепёжных элементов; однако также возможны дополнительные или альтернативные крепёжные элементы.

Соединители 7'' в нижней части структурированного катализатора 10' и соединители 7' в верхней части структурированного катализатора 10' могут быть изготовлены из различных материалов, как показано на фиг. 2. Например, соединители 7' могут быть из меди, а соединители 7'' - из никеля. Поскольку проводимость никеля ниже, чем проводимость меди, соединители 7'' больше, чем соединители 7'.

Вариант осуществления, показанный на фиг. 8, подходит для температур ниже 800°C, например 600-700°C.

На фиг. 9 показан еще один вариант осуществления структурированного катализатора 10''' с соединителями 7'''. Структурированный катализатор 10''' представляет собой, например, структурированный

катализатор, показанный на фиг. 6. Каждый из соединителей 7^{'''} имеет три отверстия в своей верхней части для подключения к проводникам (не показаны). Внутри прорези 60 структурированного катализатора 10^{'''} находится кусок электроизоляционного материала 61 (см. фиг. 6).

На фиг. 10 показана требуемая максимальная температура внутри реакторной системы по изобретению в функциональной зависимости от давления для давлений в диапазоне приблизительно 30-170 бар во время парового риформинга исходного газа, состоящего из 30,08% CH₄, 69,18% H₂O, 0,09% H₂, 0,45% CO₂, 0,03% Ar, 0,02% CO, 0,15% N₂ до достижения степени конверсии метана 88% при температуре 10°C в условиях близких к равновесию парового риформинга метана. Требуемая максимальная температура увеличивается с увеличением давления из-за принципа Ле Шателье. Это показывает, что из-за высоких температур, которые могут использоваться в настоящем изобретении, могут использоваться значительно более высокие давления, чем давления, используемые в традиционном SMR, где из-за внешнего нагрева труб не может использоваться температура более 950°C. Температура 950°C соответствует 27 бар и.д. на фиг. 10. В реакторной системе по изобретению может использоваться, например, максимальная температура 1150°C, что обеспечивает давление до 146 бар и.д. при сохранении вышеуказанной степени конверсии метана.

Общая тенденция для всех кривых на фиг. 11 заключается в том, что температура для условий близких к равновесию непрерывно уменьшается от входа в структурированный катализатор до тех пор, пока не будет достигнуто псевдоравновесие, когда подача тепла и потребление тепла примерно равны друг другу. С этого момента температура приближения к равновесным условиям остается практически постоянной или немного увеличивается из-за общего повышения температуры реакторной системы. Например, при расходе 150000 нм³/ч температура приближения к равновесным условиям опускается ниже 60°C примерно на 80% длины реакторной системы, но впоследствии увеличивается примерно до 60°C.

Примеры

Изобретение проиллюстрировано описанием различных вариантов осуществления и примерами, и хотя эти варианты осуществления и примеры описаны довольно подробно, заявитель не намерен ограничивать объем прилагаемой формулы изобретения таким подробным описанием. Специалистам очевидны дополнительные преимущества и возможные модификации. Следовательно, изобретение в общих аспектах не ограничивается приведенными конкретными деталями, типичными способами и пояснительными примерами. Соответственно, допустимы отклонения от таких деталей без искажения сущности или объема общей изобретательской концепции заявителя.

Все описанные ниже примеры относятся к компактным реакторным системам. Это возможно благодаря тому, что реакторные системы содержат компактные структурированные катализаторы с высоким тепловым потоком при электронагреве. Кроме того, следует отметить, что размеры структурированных катализаторов могут быть подобраны относительно свободно, так что структурированный катализатор может иметь почти кубическую внешнюю форму, или его ширина может быть больше, чем его высота.

Все примеры описывают рабочие условия с высоким давлением в диапазоне 28-182 бар. Такие высокие давления возможны благодаря конфигурации реакторной системы, поскольку структурированный катализатор внутри реакторной системы имеет высокий тепловой поток при электронагреве, он в некоторой степени теплоизолирован от корпуса высокого давления, и обеспечивается отсутствие перепада давления или очень низкий перепад давления в структурированном катализаторе. В реакторной системе структурированный катализатор будет иметь наибольшую температуру, в то время как корпус высокого давления будет иметь значительно меньшую температуру из-за теплоизоляционного слоя между макроскопической структурой и корпусом высокого давления. В идеале температура корпуса высокого давления не должна превышать 500°C. Когда требуется газообразный продукт с высоким давлением, например, 30 бар или выше, газообразный продукт, выходящий из реакторной системы, зачастую может использоваться напрямую, без использования компрессоров. Это возможно из-за этапа сжатия исходного газа по ходу процесса перед реакторной системой по изобретению.

Во всех примерах, приведенных ниже, в качестве примера используют паровой риформинг, когда исходный газ поступает в реакторную систему и проходит через структурированный катализатор внутри нее. Когда реакторная система имеет теплоизоляционный материал, теплоизоляционный материал, как правило, занимает большую часть пространства между структурированным катализатором и корпусом высокого давления вдоль стенок корпуса высокого давления, так что при прохождении через корпус высокого давления исходный газ вынужден течь вдоль стенок макроскопической структуры.

Все приведенные ниже примеры (за исключением сравнительного примера) относятся к реакторной системе со структурированным катализатором для парового риформинга. Структурированные катализаторы, описанные в этих примерах, включают одну или несколько макроскопических структур. В примерах ниже на одной или нескольких макроскопических структурах расположено керамическое покрытие, при этом указанное керамическое покрытие выступает в качестве подложки каталитически активного материала. Преимущественно, практически на всей поверхности макроскопической структуры имеется керамическое покрытие, выступающее в качестве подложки каталитически активного материала; однако в точках соединений, например, в точке соединения двух соседних макроскопических структур или в точке соединения макроскопической структуры и проводника, макроскопическая структура может не

иметь керамического покрытия, чтобы упростить соединение между проводником и макроскопической структурой.

Пример 1.

В табл. 1 ниже приведен пример расчёта параметров способа по изобретению. В реакторную систему по изобретению подают углеводородный исходный поток, содержащий, помимо прочего, углеводородный газ, водород и пар. Исходный поток, поступающий в реакторную систему, находится под давлением $28 \text{ кг/см}^2\text{-г}$ и имеет температуру 500°C . Внутри реакторной системы размещают структурированный катализатор в виде набора девяти макроскопических структур с квадратным поперечным сечением, и каждая макроскопическая структура имеет размер $0,53 \times 0,53 \times 2,3 \text{ м}$. Каждая макроскопическая структура дополнительно имеет 17778 каналов с квадратным сечением и с длиной стороны или кромки $0,32 \text{ см}$. Каждая макроскопическая структура имеет прорезы, параллельные ее продольному направлению, так что образуются 5 групп по 5 каналов. Каждая группа каналов изолирована от соседней, за исключением концевых частей, так что ток идет через структурированный катализатор по зигзагообразному пути. На каждую макроскопическую структуру в реакторной системе по изобретению воздействует ток 200 А и напряжение приблизительно $5,5 \text{ кВт}$ для нагрева структурированного катализатора и, следовательно, газа, проходящего через структурированный катализатор, что соответствует подаваемой мощности 9899 кВт .

Общий внутренний диаметр реакторной системы в этой конфигурации может составлять $3,2 \text{ м}$, а общая внутренняя высота - $5,5 \text{ м}$, если реакторная система имеет цилиндрическую форму со сферическими головками. В этой конкретной конфигурации макроскопические структуры расположены в квадрате с длиной диагонали $2,3 \text{ м}$. Во всех описанных здесь примерах, за исключением сравнительного примера, вокруг структурированного катализатора расположен инертный материал, закрывающий зазор между изоляционным материалом, прилегающим к корпусу высокого давления. Изоляционный материал в примере 1 имеет цилиндрическую форму с внутренним диаметром $2,5 \text{ м}$ и толщиной $0,35 \text{ м}$.

Во время прохождения исходного газа через реакторную систему исходный газ нагревают теплом структурированного катализатора, и осуществляют реакцию парового риформинга с получением газообразного продукта с выходной температурой 963°C .

Таблица 1

Размер структурированного катализатора:		
Длина кромки [м]	0,53	
Высота [м]	2,3	
Количество макроскопических структур	9	
Общий объём [л]	5888	
	Исходный газ	Газообразный продукт
T [$^\circ\text{C}$]	500	963
Давление [кг/см ² изб.]	27,97	27,47
CO ₂ [нм ³ /ч]	168	727
N ₂ [нм ³ /ч]	26	26
CH ₄ [нм ³ /ч]	2630	164
H ₂ [нм ³ /ч]	590	8545
CO [нм ³ /ч]	1	1907
H ₂ O [нм ³ /ч]	8046	5022
Общий поток (нм ³ /ч)	11461	16391
$\Delta T_{\text{равн,SMR}}$ [$^\circ\text{C}$]		10
Мощность [кВт]	9899	
Тепловой поток [кВт/м ²]	2,2	

Пример 2.

В табл. 2 ниже приведен пример расчёта параметров способа по изобретению. В реакторную систему по изобретению подают углеводородный исходный поток, содержащий, помимо прочего, углеводородный газ, водород и пар. Исходный поток, поступающий в реакторную систему, находится под давлением $28 \text{ кг/см}^2\text{-г}$ и имеет температуру 500°C . Внутри реакторной системы размещают структурированный катализатор в виде одной макроскопической структуры с квадратным поперечным сечением с размером $0,4 \times 0,4 \times 0,35 \text{ м}$. Структурированный катализатор дополнительно имеет 10000 каналов с квадратным сечением и с длиной стороны или кромки $0,32 \text{ см}$. Структурированный катализатор имеет прорезы, параллельные его продольному направлению, так что образуются 5 групп по 5 каналов. Каждая группа каналов изолирована от соседней, за исключением концевых частей, так что ток идет через структурированный катализатор по зигзагообразному пути. На структурированный катализатор в реакторной системе по изобретению воздействует ток 200 А и напряжение приблизительно 500 В для нагрева структурированного катализатора и, следовательно, газа, проходящего над структурированным катализатором, что соответствует подаваемой мощности 99 кВт .

Общий внутренний диаметр реакторной системы в этой конфигурации может составлять 1,2 м, а общая внутренняя высота - 1,5 м, если реакторная система имеет цилиндрическую форму со сферическими головками. В этой конкретной конфигурации диагональ структурированного катализатора имеет длину 0,6 м. Вокруг структурированных катализаторов расположен инертный материал, закрывающий зазор между изоляционным материалом с внутренним диаметром 0,6 м и толщиной 0,3 м.

Во время прохождения исходного газа через реакторную систему исходный газ нагревают теплом структурированного катализатора, и осуществляют реакцию парового риформинга с получением газообразного продукта с выходной температурой 963°C.

Таблица 2

Размер структурированного катализатора:		
Длина кромки [м]	0,4	
Высота [м]	0,35	
Количество макроскопических структур	1	
Общий объём [л]	55,4	
	Исходный газ	Газообразный продукт
T [°C]	500	963
Давление [кг/см ² изб.]	27,97	27,47
CO ₂ [нм ³ /ч]	1,7	7,3
N ₂ [нм ³ /ч]	0,3	0,3
CH ₄ [нм ³ /ч]	26,3	1,6
H ₂ [нм ³ /ч]	5,9	85,4
CO [нм ³ /ч]	0	19,1
H ₂ O [нм ³ /ч]	80,5	50,2
Общий поток (нм ³ /ч)	114,7	163,9
ΔT _{равн,SMR} [°C]		10
Мощность [кВт]	99	
Тепловой поток [кВт/м ²]	2,2	

Пример 3.

В табл. 3 ниже приведен пример расчёта параметров способа по изобретению. В реакторную систему по изобретению подают углеводородный исходный поток, содержащий, помимо прочего, углеводородный газ, водород и пар. Исходный поток, поступающий в реакторную систему, находится под давлением 97 бар, т.е. 97 кг/см²·г и имеет температуру 500°C.

Внутри реакторной системы размещают структурированный катализатор с набором из девяти макроскопических структур с квадратным поперечным сечением, и каждая макроскопическая структура имеет размер 0,53×0,53×2,3 м. Каждая макроскопическая структура дополнительно имеет 17778 каналов с квадратным сечением и с длиной стороны или кромки 0,32 см. Каждая макроскопическая структура имеет прорезы, параллельные ее продольному направлению, так что образуются 5 групп по 5 каналов. Каждая группа каналов изолирована от соседней, за исключением концевых частей, так что ток идет через структурированный катализатор по зигзагообразному пути. На каждую макроскопическую структуру в реакторной системе по изобретению воздействует ток 200 А и напряжение приблизительно 5,5 кВт для нагрева структурированного катализатора и, следовательно, газа, проходящего над структурированным катализатором, что соответствует подаваемой мощности 9899 кВт.

Общий внутренний диаметр реакторной системы в этой конфигурации может составлять 3,2 м, а общая внутренняя высота - 5,5 м, если реакторная система имеет цилиндрическую форму со сферическими головками. В этой конкретной конфигурации структурированные катализаторы расположены в квадрате с длиной диагонали 2,3 м. Вокруг структурированных катализаторов расположен инертный материал, закрывающий зазор между изоляционным материалом с внутренним диаметром 2,5 м и толщиной 0,35 м.

Во время прохождения исходного газа через реакторную систему исходный газ нагревают теплом структурированного катализатора, и осуществляют реакцию парового риформинга с получением газообразного продукта с выходной температурой 1115°C. Из табл. 3 видно, что общие значения расхода исходного газа и газообразного продукта в примере 3 ниже по сравнению с примером 1.

Поскольку газообразный продукт, покидающий реакторную систему, имеет давление 97 бар, нет необходимости в использовании компрессоров после реакторной системы по ходу процесса, если требуется газообразный продукт с высоким давлением. Это значительно уменьшает общую стоимость установки с реакторной системой по изобретению.

Таблица 3

Размер структурированного катализатора:		
Длина кромки [м]	0,53	
Высота [м]	2,3	
Количество макроскопических структур	9	
Общий объём [л]	5888	
	Исходный газ	Газообразный продукт
T [°C]	500	1115
Давление [кг/см ² изб.]	96,97	96,47
CO ₂ [нм ³ /ч]	111	510
N ₂ [нм ³ /ч]	23	23
CH ₄ [нм ³ /ч]	2337	143
H ₂ [нм ³ /ч]	372	7354
CO [нм ³ /ч]	1	1796
H ₂ O [нм ³ /ч]	7111	4518
Общий поток (нм ³ /ч)	9955	14344
ΔT _{равн,SMR} [°C]		10
Мощность [кВт]	9899	
Тепловой поток [кВт/м ²]	2,2	

Пример 4.

В табл. 3 ниже приведен пример расчёта параметров способа по изобретению. В реакторную систему по изобретению подают углеводородный исходный поток, содержащий, помимо прочего, углеводородный газ, водород и пар. Исходный поток, поступающий в реакторную систему, находится под давлением 28 бар, т.е. 28 кг/см²·г и имеет температуру 500°С.

Внутри реакторной системы размещают структурированный катализатор с набором из 25 макроскопических структур с квадратным поперечным сечением, и каждая макроскопическая структура имеет размер 0,24×0,24×1,8 м. Каждая макроскопическая структура дополнительно имеет 4702 каналов с квадратным сечением и с длиной стороны или кромки 0,33 см. Каждая макроскопическая структура имеет прорези, параллельные ее продольному направлению, так что образуются 10 групп по 10 каналов. Каждая группа каналов изолирована от соседней, за исключением концевых частей, так что ток идет через структурированный катализатор по зигзагообразному пути. На каждую макроскопическую структуру в реакторной системе по изобретению воздействует ток 500 А и напряжение приблизительно 792 кВт для нагрева структурированного катализатора и, следовательно, газа, проходящего над структурированным катализатором, что соответствует подаваемой мощности 9899 кВт.

Общий внутренний диаметр реакторной системы в этой конфигурации может составлять 2,3 м, а общая внутренняя высота - 4,1 м, если реакторная система имеет цилиндрическую форму со сферическими головками. В этой конкретной конфигурации структурированные катализаторы расположены в квадрате с длиной диагонали 1,7 м. Вокруг структурированных катализаторов расположен инертный материал, закрывающий зазор между изоляционным материалом с внутренним диаметром 1,8 м и толщиной 0,25 м.

Во время прохождения исходного газа через реакторную систему исходный газ нагревают теплом структурированного катализатора, и осуществляют реакцию парового риформинга с получением газообразного продукта с выходной температурой 963°С. Из табл. 4 видно, что структурированный катализатор согласно примеру 4 имеет немного меньший размер, чем структурированный катализатор согласно примерам 1 и 3 из-за более высокой силы тока. Общие значения расхода исходного газа и газообразного продукта соответствуют значениям примера 1.

Таблица 4

Размер структурированного катализатора:		
Длина кромки [м]	0,24	
Высота [м]	1,8	
Количество макрокопических структур	25	
Общий объём [л]	2562	
	Исходный газ	Газообразный продукт
T [°C]	500	963
Давление [кг/см ² изб.]	27,97	27,47
CO ₂ [нм ³ /ч]	168	727
N ₂ [нм ³ /ч]	26	26
CH ₄ [нм ³ /ч]	2630	164
H ₂ [нм ³ /ч]	590	8545
CO [нм ³ /ч]	1	1907
H ₂ O [нм ³ /ч]	8046	5022
Общий поток (нм ³ /ч)	11461	16391
ΔT _{равн,SMR} [°C]		10
Мощность [кВт]	9899	
Тепловой поток [кВт/м ²]	3,6	

Пример 5.

В табл. 4 ниже приведен пример расчёта параметров способа по изобретению. В реакторную систему по изобретению подают углеводородный исходный поток, содержащий, помимо прочего, углеводородный газ, водород и пар. Исходный поток, поступающий в реакторную систему, находится под давлением 182 бар и имеет температуру 500°C.

Внутри реакторной системы размещают структурированный катализатор с набором из девяти макрокопических структур с квадратным поперечным сечением, и каждая макрокопическая структура имеет размер 0,53×0,53×2,3 м. Каждая макрокопическая структура дополнительно имеет 17778 каналов с квадратным сечением и с длиной стороны или кромки 0,32 см. Каждая макрокопическая структура имеет прорезы, параллельные ее продольному направлению, так что образуются 5 групп по 5 каналов. Каждая группа каналов изолирована от соседней, за исключением концевых частей, так что ток идет через структурированный катализатор по зигзагообразному пути. На каждую макрокопическую структуру в реакторной системе по изобретению воздействует ток 200 А и напряжение приблизительно 5,5 кВт для нагрева структурированного катализатора и, следовательно, газа, проходящего над структурированным катализатором, что соответствует подаваемой мощности 9899 кВт.

Общий внутренний диаметр реакторной системы в этой конфигурации может составлять 3,2 м, а общая внутренняя высота - 5,5 м, если реакторная система имеет цилиндрическую форму со сферическими головками. В этой конкретной конфигурации структурированные катализаторы расположены в квадрате с длиной диагонали 2,3 м. Вокруг структурированных катализаторов расположен инертный материал, закрывающий зазор между изоляционным материалом с внутренним диаметром 2,5 м и толщиной 0,35 м.

Во время прохождения исходного газа через реакторную систему исходный газ нагревают теплом структурированного катализатора, и осуществляют реакцию парового риформинга с получением газообразного продукта с выходной температурой 1236°C. Общие значения расхода исходного газа и газообразного продукта ниже по сравнению с примерами 1 и 4.

Поскольку газообразный продукт, покидающий реакторную систему, уже находится под давлением 181 бар, он может подаваться, например, в установку по производству аммиака без дальнейшего сжатия. Таким образом, между реакторной системой и контуром синтеза аммиака не требуется использование компрессоров. Это значительно уменьшает общую стоимость установки с реакторной системой по изобретению и контура синтеза аммиака.

Таблица 5

Размер структурированного катализатора:		
Длина кромки [м]	0,53	
Высота [м]	2,3	
Количество макроскопических структур	9	
Общий объем [л]	5888	
	Исходный газ	Газообразный продукт
T [°C]	500	1236
Давление [кг/см ² изб.]	181,97	181
CO ₂ [нм ³ /ч]	86	395
N ₂ [нм ³ /ч]	21	21
CH ₄ [нм ³ /ч]	2116	96
H ₂ [нм ³ /ч]	278	6648
CO [нм ³ /ч]	0	1711
H ₂ O [нм ³ /ч]	6425	4096
Общий поток (нм ³ /ч)	8926	12967
$\Delta T_{\text{равн, SMR}}$ [°C]		10
Мощность [кВт]	9899	
Тепловой поток [кВт/м ²]	2,2	

Пример 6.

Пример 6 относится к реакторной системе, содержащей структурированный катализатор в виде макроскопической структуры с 78540 каналами с общей длиной стенки каждого канала в поперечном сечении 0,00628 м и длиной стенки 2 м, таким образом, общая площадь поверхности катализатора составляет 987 м². Для реакторной системы с таким структурированным катализатором было выполнено моделирование с изменяющимся расходом газа над структурированным катализатором, при этом во всех расчетах использовался газ со следующим составом: 8,8 % H₂, 56,8% H₂O, 0,2% N₂, 0,1% CO, 2,3% CO₂, и 31,8% CH₄. В каждом моделировании использовалась кинетическая модель для парового риформинга и конверсии водяного газа, и для регулирования температуры газообразного продукта, выходящего из реакторной системы, в которой находится структурированный катализатор, было выполнено изменение поверхностного потока (Q) энергии от электрически нагреваемого структурированного катализатора до 920°C. Использовалась кинетическая модель аналогичная подходу, использовавшемуся в работе Xu and Froment, (J. Xu and G. F. Froment, Methane steam reforming, methanation and water-gas shift: I. intrinsic kinetics. American Institution of Chemical Engineers Journal, 35:88-96, 1989.). На фиг. 11 показана температура приближения к равновесным условиям по длине реакторной системы при различных значениях общего расхода. На фигуре показано, что при низких расходах исходного газа (10000 нм³/ч) температура приближения к равновесным условиям на выходе из реакторной системы составляет менее 5°C, из-за этого степень конверсии углеводородов составляет 77%, в то время как при высоких расходах (150000 нм³/ч) температура приближения к равновесным условиям составляет более 60°C, что соответствует степени конверсии углеводорода лишь 64%, поэтому использование углеводородов осуществляется менее эффективно. Таким образом, из-за точного контроля теплового потока в настоящем изобретении обеспечивается контроль температуры приближения к равновесным условиям по всей длине реакторной системы. Общая тенденция для всех кривых на фиг. 11 заключается в том, что температуру для условий близких к равновесию непрерывно уменьшают до тех пор, пока не будет достигнуто псевдоравновесие, когда подача тепла и потребление тепла примерно равны друг другу. С этого момента температура приближения к равновесным условиям остается практически постоянной или немного увеличивается из-за общего повышения температуры реакторной системы.

Пример 7.

В табл. 6 ниже приведен пример расчёта параметров способа по изобретению. В реакторную систему по изобретению подают углеводородный исходный поток, содержащий, помимо прочего, углеводородный газ и водород. Исходный поток, поступающий в реакторную систему, находится под давлением 3,2 бар, т.е. 3,2 кг/см²·г и имеет температуру 500°C.

Внутри реакторной системы размещают структурированный катализатор с набором из 25 макроскопических структур с квадратным поперечным сечением, и каждая макроскопическая структура имеет размер 0,24×0,24×1,8 м. Каждая макроскопическая структура дополнительно имеет 4702 каналов с квадратным сечением и с длиной стороны или кромки 0,33 см. Каждая макроскопическая структура имеет прорезы, параллельные ее продольному направлению, так что образуются 10 групп по 10 каналов. Каждая группа каналов изолирована от соседней, за исключением концевых частей, так что ток идет через

структурированный катализатор по зигзагообразному пути. На каждую макроскопическую структуру в реакторной системе по изобретению воздействует ток 500 А и напряжение приблизительно 787 кВт для нагрева структурированного катализатора и, следовательно, газа, проходящего над структурированным катализатором, что соответствует подаваемой мощности 9858 кВт.

Общий внутренний диаметр реакторной системы в этой конфигурации составляет 2,3 м, а общая внутренняя высота - 4,1 м, если реакторная система имеет цилиндрическую форму со сферическими головками. В этой конкретной конфигурации структурированный катализатор расположен в квадрате с длиной диагонали 1,7 м. Вокруг структурированного катализатора расположен инертный материал, закрывающий зазор между изоляционным материалом с внутренним диаметром 1,8 м и толщиной 0,25 м.

Во время прохождения исходного газа через реакторную систему исходный газ нагревают теплом структурированного катализатора, и осуществляют реакцию дегидрогенизации пропана и термический крекинг с получением газообразного продукта с выходной температурой 600°C.

Таблица 6

Размер структурированного катализатора:		
Длина кромки [м]	0,24	
Высота [м]	1,8	
Количество макроскопических структур	25	
Общий объём [л]	2562	
	Исходный газ	Газообразный продукт
Т [°C]	500	600
Давление [кг/см ² изб.]	3,24	2,73
C ₃ H ₈ [нм ³ /ч]	18918	14747
N ₂ [нм ³ /ч]	0,0	0,0
H ₂ [нм ³ /ч]	9450	12739
C ₃ H ₆ [нм ³ /ч]	0	3721
CH ₄ [нм ³ /ч]	43	487
C ₂ H ₆ [нм ³ /ч]	1338	1767
C ₂ H ₄ [нм ³ /ч]	19	33
Общий поток (нм ³ /ч)	29770	33495,8
ΔT _{app,PDH} [°C]		
Мощность [кВт]	9858	
Тепловой поток [кВт/м ²]	3,59	

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Реакторная система для осуществления эндотермической реакции исходного газа, включающая структурированный катализатор, предназначенный для катализа указанной эндотермической реакции указанного исходного газа, при этом указанный структурированный катализатор содержит макроскопическую структуру из электропроводящего материала, при этом на указанной макроскопической структуре расположено керамическое покрытие, при этом указанное керамическое покрытие выступает в качестве подложки каталитически активного материала;

корпус высокого давления, в котором расположен указанный структурированный катализатор;

теплоизоляционный слой между указанным структурированным катализатором и указанным корпусом высокого давления; и

по меньшей мере два проводника, электрически соединенные с указанным структурированным катализатором и с источником питания, который расположен вне указанного корпуса высокого давления, причем указанный источник электропитания выполнен с возможностью нагрева, по меньшей мере, части указанного структурированного катализатора до температуры по меньшей мере 200°C путем пропуска электрического тока через указанный электропроводящий материал;

причем указанный корпус высокого давления включает входное отверстие для введения технологического газа и выходное отверстие для выведения газообразного продукта, при этом указанное входное отверстие расположено рядом с передней частью корпуса высокого давления, а выходное отверстие расположено рядом с задней частью корпуса высокого давления, при этом по меньшей мере два проводника соединены со структурированным катализатором в точке на структурированном катализаторе, расположенной ближе к входному отверстию, чем к выходному отверстию;

и причем структурированный катализатор имеет электроизоляционные части, расположенные между проводниками, предотвращающие прохождение указанного тока через некоторую часть структурированного катализатора.

2. Реакторная система по п.1, отличающаяся тем, что расчётное давление корпуса высокого давле-

ния находится в диапазоне 2-30 бар.

3. Реакторная система по п.1, отличающаяся тем, что расчётное давление корпуса высокого давления находится в диапазоне 30-200 бар.

4. Реакторная система по любому из пп.1-3, отличающаяся тем, что удельное сопротивление электропроводящего материала находится в диапазоне 10^{-5} - 10^{-7} Ω·м.

5. Реакторная система по любому из пп.1-4, отличающаяся тем, что указанные по меньшей мере два проводника проходят через корпус высокого давления в фитинге таким образом, что по меньшей мере два проводника электрически изолированы от корпуса высокого давления.

6. Реакторная система по п.5, отличающаяся тем, что указанный корпус высокого давления дополнительно включает одно или более входных отверстий, расположенных рядом или в комбинации с по меньшей мере одним фитингом, чтобы обеспечить прохождение охлаждающего газа через, вокруг, рядом или внутри по меньшей мере одного проводника внутри указанного корпуса высокого давления.

7. Реакторная система по любому из пп.1-6, отличающаяся тем, что дополнительно содержит внутреннюю трубу, между которой и структурированным катализатором осуществляется теплообмен, но которая электрически изолирована от структурированного катализатора, причем указанная внутренняя труба выполнена с возможностью отвода газообразного продукта из структурированного катализатора таким образом, что между газообразным продуктом, поступающим через внутреннюю трубу, осуществляется теплообмен с газом, поступающим через структурированный катализатор.

8. Реакторная система по любому из пп.1-7, отличающаяся тем, что соединение между структурированным катализатором и указанными по меньшей мере двумя проводниками представляет собой механическое соединение, сварное соединение, паяное соединение или их комбинацию.

9. Реакторная система по любому из пп.1-8, отличающаяся тем, что электропроводящий материал содержит макроскопическую структуру, которая изготовлена по технологии объёмной печати или путем экструзии и спекания, при этом на указанной макроскопической структуре расположено керамическое покрытие, при этом указанное керамическое покрытие выступает в качестве подложки каталитически активного материала.

10. Реакторная система по любому из пп.1-9, отличающаяся тем, что структурированный катализатор содержит набор макроскопических структур, электрически соединенных друг с другом.

11. Реакторная система по любому из пп.9 или 10, отличающаяся тем, что указанная макроскопическая структура имеет множество параллельных каналов, множество непараллельных каналов и/или множество лабиринтных каналов.

12. Реакторная система по любому из пп.1-11, отличающаяся тем, что дополнительно содержит слой второго каталитического материала по ходу процесса перед указанным структурированным катализатором внутри указанного корпуса высокого давления.

13. Реакторная система по п.11 или 12, отличающаяся тем, что дополнительно содержит третий каталитический материал в виде зерен катализатора, экструдатов или гранул катализатора, которые загружены в каналы указанной макроскопической структуры.

14. Реакторная система по любому из пп.1-13, отличающаяся тем, что дополнительно включает систему контроля, выполненную с возможностью контроля подачи электроэнергии, чтобы обеспечить нахождение температуры газа, выходящего из корпуса высокого давления, в предварительно определенном диапазоне и/или чтобы обеспечить нахождение степени конверсии исходного газа в предварительно определенном диапазоне.

15. Реакторная система по любому из пп.1-14, отличающаяся тем, что в указанной реакторной системе соотношение между эквивалентным диаметром площади горизонтального поперечного сечения структурированного катализатора и высотой структурированного катализатора находится в диапазоне 0,1-2,0.

16. Реакторная система по любому из пп.1-15, отличающаяся тем, что высота реакторной системы составляет 0,5-7 м, более предпочтительно 0,5-3 м.

17. Способ осуществления эндотермической реакции исходного газа в реакторной системе по любому из пп.1-16, включающий следующие этапы:

подачу указанного исходного газа в реакторную систему путем введения указанного технологического газа в точку, расположенной рядом с передней частью корпуса высокого давления;

обеспечение эндотермической реакции исходного газа над структурированным катализатором и отвод газообразного продукта из реакторной системы, причем указанный газообразный продукт выходит в точку, расположенной рядом с задней части корпуса высокого давления; и подачу тока через проводники, соединяющие источник питания, расположенный вне указанного корпуса высокого давления, в указанный структурированный катализатор, что позволяет осуществить пропускание тока через указанный электропроводящий материал, посредством чего обеспечивается нагрев, по меньшей мере, части структурированного катализатора до температуры по меньшей мере 200°C.

18. Способ по п.17, дополнительно включающий сжатие указанного исходного газа до давления по меньшей мере 2 бар и подачу указанного сжатого исходного газа в реакторную систему посредством введения указанного сжатого исходного газа в указанной точке, расположенной рядом с передней частью

корпуса высокого давления.

19. Способ по п.18, дополнительно включающий этап сжатия исходного газа по ходу процесса перед подачей в корпус высокого давления до давления в диапазоне 2-30 бар.

20. Способ по п.18, дополнительно включающий этап сжатия исходного газа по ходу процесса перед подачей в корпус высокого давления до давления в диапазоне 30-200 бар, предпочтительно до давления в диапазоне 80-180 бар.

21. Способ по любому из пп.17-20, отличающийся тем, что температура исходного газа на подаче в реакторную систему находится в диапазоне 100-700°C.

22. Способ по любому из пп.17-21, отличающийся тем, что осуществляют нагрев структурированного катализатора таким образом, что максимальная температура структурированного катализатора находится в диапазоне 200-1300°C.

23. Способ по любому из пп.17-22, дополнительно включающий этап подачи охлаждающего газа через входное отверстие в корпусе высокого давления, для обеспечения прохождения охлаждающего газа через по меньшей мере один проводник.

24. Способ по любому из пп.17-23, отличающийся тем, что эндотермическая реакция представляет собой дегидрирование углеводородов.

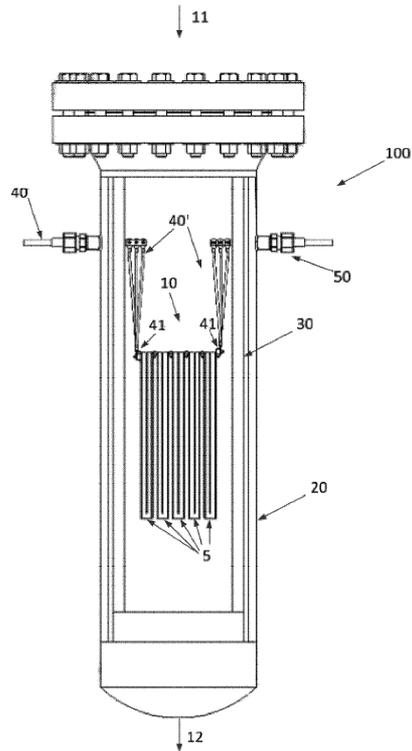
25. Способ по любому из пп.17-23, отличающийся тем, что эндотермическая реакция представляет собой крекинг метанола.

26. Способ по любому из пп.17-23, отличающийся тем, что эндотермическая реакция представляет собой паровой риформинг углеводородов.

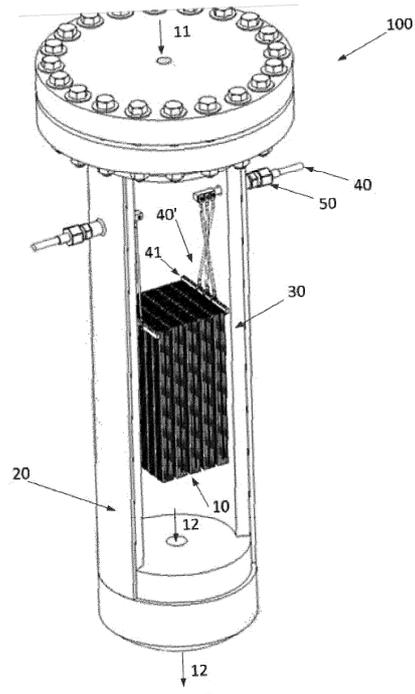
27. Способ по любому из пп.17-23, отличающийся тем, что эндотермическая реакция представляет собой крекинг аммиака.

28. Способ по любому из пп.17-23, отличающийся тем, что эндотермическая реакция представляет собой синтез цианистого водорода или процесс синтеза органических нитрилов.

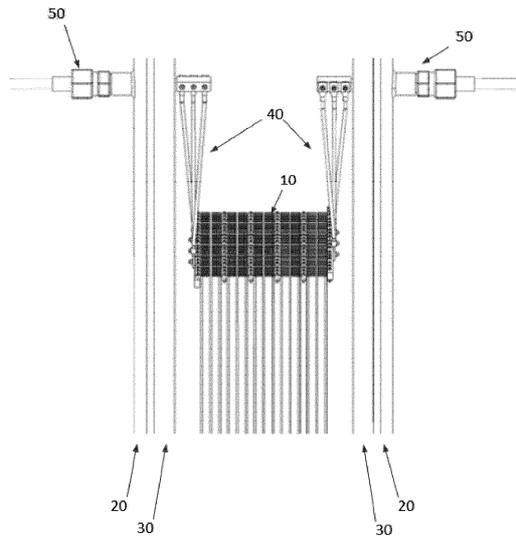
29. Способ по любому из пп.17-23, отличающийся тем, что эндотермическая реакция представляет собой ароматизацию углеводородов.



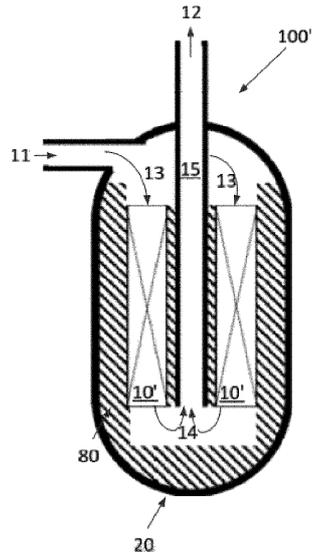
Фиг. 1а



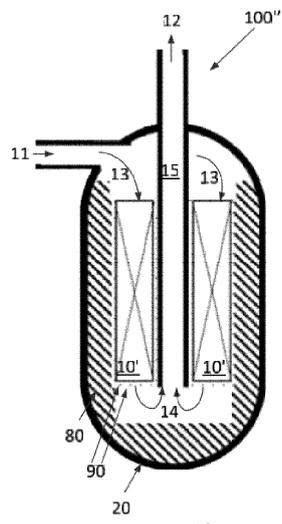
Фиг. 1b



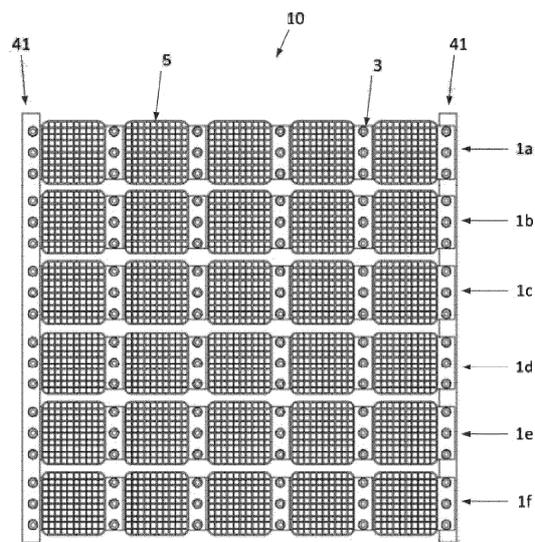
Фиг. 2



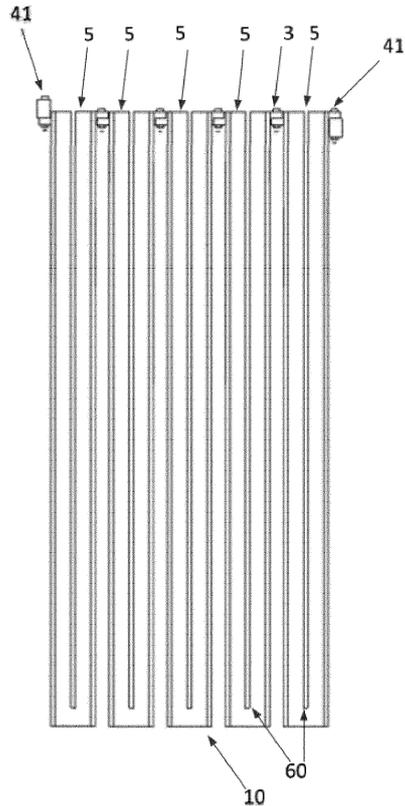
Фиг. 3а



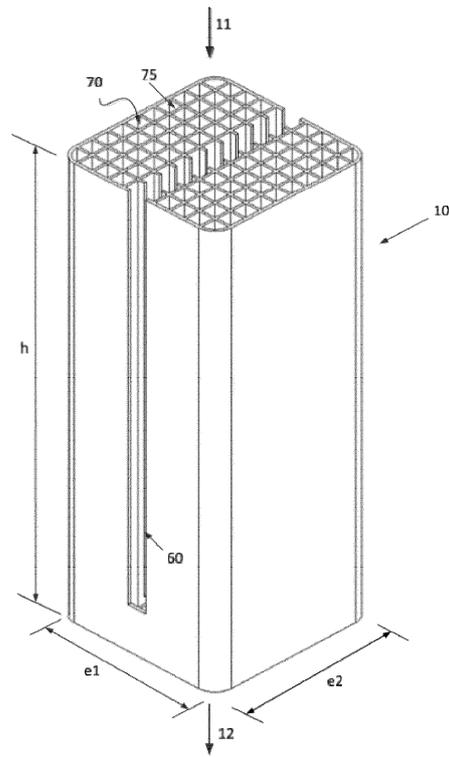
Фиг. 3б



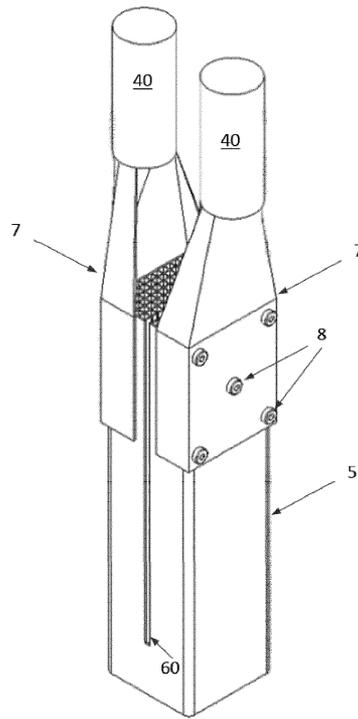
Фиг. 4



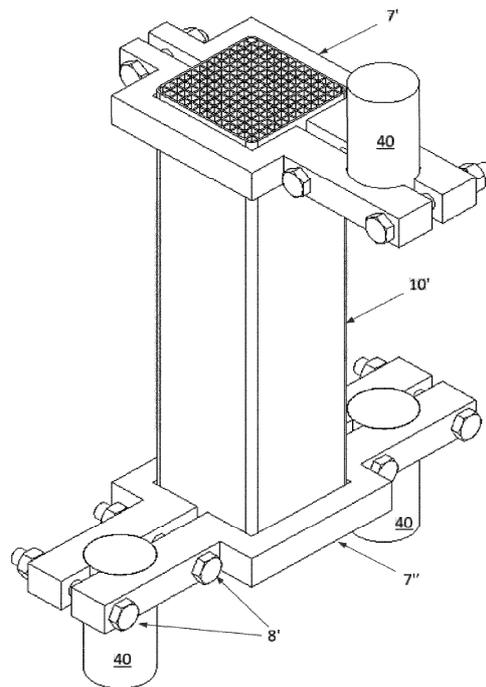
Фиг. 5



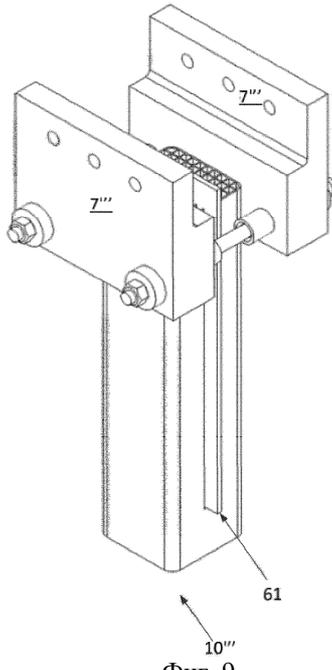
Фиг. 6



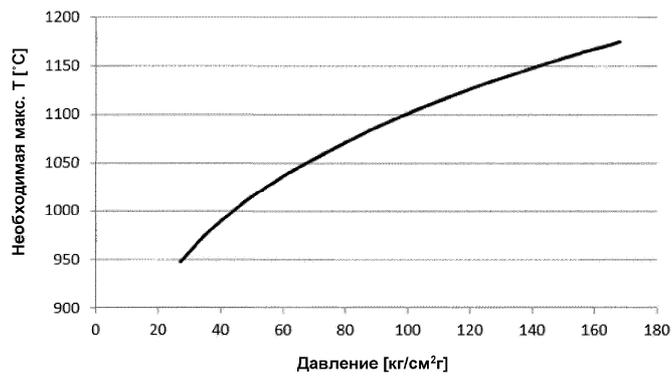
Фиг. 7



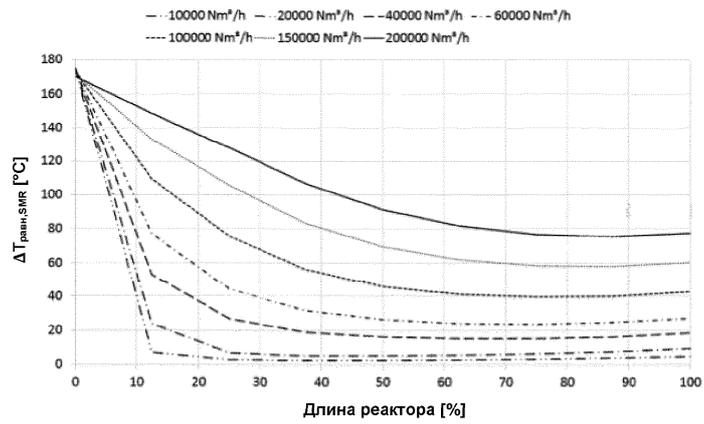
Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11

