

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **040275**

(13) **B1**

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

**(45)** Дата публикации и выдачи патента  
**2022.05.16**

**(21)** Номер заявки  
**202092175**

**(22)** Дата подачи заявки  
**2014.11.04**

**(51)** Int. Cl. **C07C 2/80** (2006.01)  
**C01B 3/38** (2006.01)  
**C07C 2/76** (2006.01)  
**H01M 8/06** (2006.01)  
**H01M 8/04** (2006.01)  
**H01M 8/12** (2006.01)

---

**(54) РЕАКТОР НА ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И СПОСОБ ПРЯМОЙ КОНВЕРСИИ  
УГЛЕВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА В ПРОДУКТ ВЫСШИХ УГЛЕВОДОРОДОВ**

---

**(31)** 13193626.2

**(32)** 2013.11.20

**(33)** EP

**(43)** 2021.01.31

**(62)** 201691003; 2014.11.04

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

**(72)** Изобретатель:  
**Модарреси Хассан (DK)**

**(74)** Представитель:  
**Беляева Е.Н. (BY)**

**(56)** US-A1-2011303550  
WO-A1-2013048705

STAMBOULI A. B. ET AL.: "Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy", RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS, ELSEVIERS SCIENCE, NEW YORK, NY, US, vol. 6, no. 5, 1 October 2002 (2002-10-01), pages 433-455, XP004379399, ISSN: 1364-0321, DOI: 10.1016/S1364-0321(02)00014-X, figures 3,4,6-8, page 442, paragraph 6, page 441, paragraph 3  
US-A-2080930

---

**(57)** Реактор на топливных элементах, предпочтительно реактор на твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ), для осуществления прямой конверсии углеводородсодержащего газа в продукт высших углеводородов ограничен стенками, в котором реагирующие вещества втекают в анодные секции, и воздух подают в катодные секции, а кислород переносится с одной стороны стенок к другой стороне стенок для интенсификации или замедления химической реакции. Способ прямой конверсии углеводородсодержащего газа в продукт высших углеводородов осуществляют в анодной секции реактора, в которой полученный водород, ограничивающий конверсию до равновесия, вступает в реакцию в реакционной смеси с ионами кислорода, переносимыми из катодной секции для получения пара, таким образом удаляя из реакции ограничивающий равновесие водород.

---

**B1**

**040275**

**040275**

**B1**

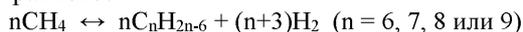
Настоящее изобретение относится к новому реактору на топливных элементах и новому способу прямой конверсии углеводородсодержащего газа в продукт высших углеводородов, при этом указанный способ происходит в анодной секции реактора.

В предпочтительном варианте осуществления изобретения изобретение относится к новому способу прямой конверсии природного газа в ароматические соединения, в частности, моноциклические ароматические соединения.

Продукты высших углеводородов, в частности ароматические углеводороды, такие как бензол, толуол, этилбензол, стирол, ксилены и нафтаден являются важными промежуточными продуктами в химической промышленности, и спрос на данные продукты продолжает расти. В целом, они являются продуктом каталитического риформинга лигроина, который в свою очередь получают из минерального топлива. Недавние исследования показали, что мировые запасы минерального топлива более ограничены по сравнению с запасами природного газа. Таким образом, получение ароматических углеводородов на основе реагентов, которые могут быть получены из углеводородсодержащего газа, такого как природный газ, является альтернативой, которая в настоящее время также представляет собой интерес с экономической точки зрения. Основным компонентом природного газа, как правило, является метан.

Способ, представленный на блок-схеме на фиг. 1, анализируется рядом исследовательских институтов и исследовательских центров. В рамках указанного способа природный газ или метан превращают в ароматические соединения, в частности бензол, внутри традиционного реактора. Подачу тепла осуществляют в зону реакции. Выходящий поток, состоящий из продукта(ов) и непрореагировавших исходных веществ, отделяют в блоке сепарации, где происходит конденсация конденсируемых продуктов, таких как бензол, а неконденсируемые соединения рециркулируют назад в реактор после частичного или полного удаления из них углеводорода.

Альтернативой описанному выше способу является удаление водорода в реакционной смеси из реактора, как показано на фиг. 2. Для селективной и непрерывной сепарации углерода из реактора используют высокотемпературную мембрану. Это позволяет получить больший объем ароматических соединений за счет смещения реакции равновесия



вправо. В обоих способах катализатор, который представлен либо W, либо Ru~Mo по HZSM5, используют для конверсии метана в бензол. Водород является побочным продуктом указанной реакции равновесия, при которой конверсия метана ограничена термодинамическими факторами.

Известен целый ряд способов конверсии метана в ароматические углеводороды. Таким образом, в US 7968759 описан способ получения ароматических соединений из метана, при котором сырье, содержащее метан, подают в одну или несколько зон реакции, содержащих материал катализатора, и при этом созданы условия протекания реакции, которые позволяют эффективно превратить по меньшей мере часть метана в ароматические углеводороды. Работа зоны (зон) реакции организована на основе обратного температурного профиля.

В US 4642403 раскрыт способ получения ароматических углеводородов, при этом указанный способ включает контактирование углеводородного сырья, содержащего по меньшей мере 10 мас.% C2-углеводородов, предпочтительно по меньшей мере 50 мас.% C2-углеводородов, с композицией катализатора на этапе испарения при температуре от 500 до 750°C. В состав указанной композиции катализатора входит (i) алюмосиликат, легированный галлием в качестве соединения галлия и/или в качестве ионов галлия с молярным отношением диоксида кремния к оксиду алюминия по меньшей мере 5:1, и (ii) металл группы VIII, выбранный из родия и платины. Алюмосиликат, легированный галлием, предпочтительно является цеолитом типа MFI или MEL.

US 4350835 свидетельствует о том, что на основе галлий-активированного цеолита может быть проведена конверсия этана в ароматические соединения. Более конкретно, предусмотрен каталитический способ для конверсии содержащего этан газообразного сырья в жидкие ароматические соединения путем контактирования указанного газообразного сырья при отсутствии добавленного воздуха или кислорода, при условиях конверсии, когда в кристаллический катализатор цеолита включено незначительное количество галлия, таким образом, этан в составе сырья превращается в ароматические соединения, и происходит восстановление бензола, толуола и ксилена. Кристаллический цеолит выбирают из группы ZSM-5, ZSM-11, ZSM-12, ZSM-35, и ZSM-38, и цеолит предпочтительно в кислотной форме.

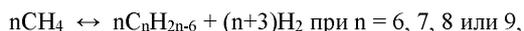
В соответствии с US 6552243 молекулярное сито из легированного молибденом кристаллического алюмосиликата, для которого характерна микропористая молекулярная кристаллическая структура и отношение диоксида кремния к оксиду алюминия около 50:1 применимо для ароматизации потока углеводородного сырья. Кристаллический алюмосиликат предпочтительно имеет кислотность внешней поверхности, которая выборочно пассивируется аморфным слоем оксида кремния. Способ ароматизации метана представляет собой одно- и многоэтапный процесс, при котором поток сырья, содержащий, по меньшей мере, метан, вступает в контакт с композицией катализатора, содержащей предпочтительно молекулярное сито, при условиях конверсии углеводородов, к которым относится температура 600-800°C, абсолютное давление менее 5 атм, а также среднечасовая скорость подачи сырья (СЧСПС)  $0,1^{-10} \text{ ч}^{-1}$ , при этом кислотность внешней поверхности кристаллического алюмосиликата предпочтительно селективно пассивиру-

ется аморфным слоем оксида кремния. Ароматические углеводороды  $C_6+$  предпочтительно получают в результате способа на этапе промежуточной сепарации.

И, наконец, в US 2011/0303550 описан способ конверсии алифатических углеводородов, содержащих от 1 до 4 атомов углерода, в ароматические углеводороды, включающий следующие этапы: а) конверсию реактивной части потока, которая содержит по меньшей мере один алифатический углеводород, содержащий от 1 до 4 атомов углерода, в присутствии катализатора при неокислительных условиях, в поток продукта, содержащий ароматические углеводороды и азот, а также б) удаление электрохимическим способом по меньшей мере части потока продукта за счет применения газонепроницаемой сборки мембранных электродов, которая содержит по меньшей мере одну выборочно протонпроводящую мембрану, а также с каждой стороны мембраны по меньшей мере один электродный катализатор. По меньшей мере часть водорода окисляется до протонов на анодном катализаторе на ретенатной стороне мембраны, и протоны после прохождения через мембрану на фильтратной стороне над катодным катализатором частично восстанавливаются до водорода при подаче напряжения, а также частично реагируют с кислородом, в результате чего образуется вода и вырабатывается электроэнергия, и кислородом, полученным из кислородосодержащего потока, который вступает в контакт с фильтратной стороной мембраны.

Одним из возможных вариантов проведения реакции для получения ароматических соединений из алифатических соединений является неокислительная дегидроароматизация (ДГАМ). Данную реакцию проводят при неокислительных условиях, в частности, без участия кислорода. При ДГАМ дегидрогенизация и циклизация алифатических углеводородов позволяет получить соответствующие ароматические соединения, и при этом происходит выброс водорода. Таким образом, 1 моль бензола и 9 моль водорода получают из 6 моль метана.

Настоящее изобретение основано на данном маршруте реакции. Если говорить более точно, то конверсия метана в бензол и/или другие ароматические соединения происходит в соответствии с реакцией равновесия



где водород реагирует в реакционной смеси с ионами кислорода, которые переносятся из катодной секции для получения пара.

В рамках настоящего изобретения и указанного выше US 2011/0303550 рассматривается способ получения из метана или легких углеводородных газов высших углеводородов за счет преодоления барьера термодинамического равновесия и повышения степени конверсии. Это делается за счет удаления побочного продукта водорода. Тем не менее, существуют принципиальные различия между настоящим изобретением и US 2011/0303550. Последнее предусматривает удаление водорода из реакционной камеры за счет окисления атомов водорода до протонов и вывода их из реактора через протонную ( $H^+$ ) мембрану. При осуществлении способа по настоящему изобретению водород окисляется внутри реакционной камеры за счет реакции с ионами кислорода, которые поступают в реакционную камеру через мембрану для ионов кислорода.

В рамках изобретения US 2011/0303550 на мембрану подают электрический ток для переноса ионов  $H^+$  из реакционной камеры, в то время как в рамках способа по настоящему изобретению электрический ток генерируется мембраной.

Кроме того, в рамках US 2011/0303550 водород реагирует с кислородом в катодной секции, которая вынесена из реакционной камеры, в то время как в рамках способа по настоящему изобретению внутри реакционной камеры в результате реакции кислорода и водорода на анодной поверхности образуется вода. В результате указанных различий общее отношение содержаний водорода и углерода в ходе реакции, предусмотренной US 2011/0303550, уменьшается, в то время как в рамках способа, предусмотренного настоящим изобретением, отношение содержания водорода и углерода остается постоянным.

Более конкретно, настоящее изобретение относится к ректорам на топливных элементах для осуществления прямой конверсии углеводородсодержащего газа в продукт высших углеводородов, при этом указанный ректор на топливных элементах ограничен стенками, и реагирующие вещества втекают в анодные секции, воздух подают в катодные секции, а кислород переносится с одной стороны стенок к другой для интенсификации или замедления химической реакции. Кроме того, оно относится к способу прямой конверсии углеводородсодержащего газа в продукт высших углеводородов в анодной секции реактора на топливных элементах, где полученный водород, ограничивающий конверсию до равновесия, либо удаляется, либо вступает в реакцию в реакционной смеси с ионами кислорода, переносимыми из катодной секции для получения потока, таким образом удаляя из реакции ограничивающий равновесие водород.

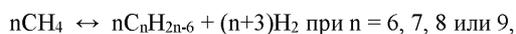
Предпочтительно реактор на топливных элементах должен представлять собой реактор на твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ).

В качестве углеводородсодержащего газа может выступать любой газ, который содержит метан, такой как природный газ, биогаз, синтетический природный газ или сланцевый газ. Предпочтительно, чтобы это был природный газ. Продукт высших углеводородов является либо газообразным, либо жидким продуктом.

Метансодержащий газ предпочтительно очищают от примесей, таких как сера, азот и любые углеводородные компоненты. Очищенный газ может проходить дальнейшую очистку с целью удаления или конверсии углеводородных компонентов за исключением метана, с тем, чтобы получить исходный газ с высоким содержанием метана для реактора на твердооксидных топливных элементах.

Установка для очистки углеводородов предпочтительно представляет собой реактор предварительного риформинга, работающий в оптимальных условиях для конверсии высших углеводородов, т.е. C<sub>2</sub>+ паром в водород и оксиды углерода.

Газ с высоким содержанием метана превращается в ароматические соединения в соответствии с реакцией равновесия



где водород реагирует в реакционной смеси с ионами кислорода, которые переносятся из катодной секции для получения пара.

Предпочтительно непрореагировавший исходный газ в реакторе на топливных элементах сепарируют и рециркулируют назад в реактор.

Катализатор конверсии может быть нанесен в виде покрытия на анодную поверхность, загружен в анодную секцию, либо могут быть использованы оба варианта.

Фракция газа из потока, выходящего из реактора на топливных элементах, которая содержит водород, может быть использована для очистки и обработки неочищенного углеводородного исходного газа.

Равновесная конверсия метана (CH<sub>4</sub>) в зависимости от соотношения моль.% - температура графически представлена на фиг. 3. На графике видно, что конверсия ограничена максимальным показателем на уровне около 20% в пределах реализуемого диапазона рабочих температур ниже 1073 К (800°C).

Как ни странно оказалось, что конверсия метана в бензол может превысить термодинамический предел равновесия за счет использования плоского или трубчатого реактора на топливных элементах, в котором получаемый водород используют для выработки пара и электричества; см. фиг. 4.

Реактор на ТОТЭ, который является предпочтительным для данной цели, представляет собой особый вид ТОТЭ, для которого необходимость анодной активности отсутствует. По этой причине от использования активного анодного слоя можно отказаться, оставив лишь катодный электролит и, возможно, слой основы анода.

Более конкретно, реактор для осуществления способа по настоящему изобретению представляет собой реактор на топливных элементах, который ограничен стенками топливных элементов, где реагирующие вещества втекают в анодные секции, воздух подают в катодные секции, а кислород переносится с одной стороны стенок к другой для интенсификации или замедления химической реакции. Указанная химическая реакция предпочтительно представляет собой гетерогенно-каталитическую газофазную реакцию.

В реакторе по настоящему изобретению стенки топливных элементов представляют собой стенки твердооксидных топливных элементов любого типа, работающие при повышенных температурах, при этом при осуществлении каталитической химической реакции на анодной части элемента полученные ионы кислорода переносятся с катодной стороны (воздушная сторона) и реагируют с водородом на анодной стороне (топливная сторона).

Кислород с катодной стороны ионизируют и пропускают через электролит. На анодной стороне, где происходит конверсия метана в бензол (образовавшийся в качестве побочного продукта), метан реагирует с кислородом, в результате чего образуется пар. Электроны, высвобождаемые с анодной поверхности, переносятся на катодную поверхность по закрытому контуру.

При использовании реакторов на ТОТЭ для целей настоящего изобретения реакционная камера может быть выполнена двумя возможными способами:

(1) Когда ТОТЭ используют в качестве катализатора, катализатор для конверсии метана в ароматические углеводороды осаждается на анодной поверхности. Реакция проходит на анодной поверхности при непрерывном расходе водорода.

(2) В случае если ТОТЭ используют в качестве стенки реактора, катализатор конверсии метана в ароматические углеводороды в форме гранул или монолита подают в реактор со стенками из ТОТЭ. Выделяемый водород превращается в пар на стенках реактора.

Также возможно использование комбинации конфигурации (1) и (2).

Схематически процесс по изобретению представлен на блок-схеме фиг. 5. Реактор на ТОТЭ позволяет получить ароматические углеводороды и пар. Водород используют для получения электрического тока. Воздух с температурой 700-800°C подают в катодную секцию стенки ТОТЭ. Блок сепарации может, например, выступать в качестве блока конденсации. Разделение воды и ароматических углеводородов происходит в осадочной камере. Непрореагировавший газообразный метан и водород сжимают и рециркулируют назад во входное отверстие реактора.

На фиг. 6а схематически представлена одна из возможных структур реактора на ТОТЭ. Для удобства показан двухканальный реактор. Природный газ проходит через канал 1. Указанные каналы заполняют соответствующим катализатором для конверсии метана в ароматические углеводороды. Реакционные каналы ограничены анодными поверхностями ТОТЭ (4) и металлическими соединениями (3). Между

двумя поверхностями расположена переплетенная система металлических компонентов, которая позволяет току протекать по каналам.

В каналы (2) подают воздух. Каналы ограничены анодными поверхностями ТОТЭ (4) и металлическими соединениями (3). Здесь также может быть предусмотрена соответствующая система соединений для движения тока. В качестве альтернативы, гофрированные пластины могут быть использованы в качестве металлических соединений.

На фиг. 6b показан вид сверху возможной компоновки одного модуля реактора на ТОТЭ. Один модуль реактора ограничен двумя ТОТЭ, каждый из которых состоит из катодного слоя (1), слоя (2) электролита и анодного слоя (3). Гранулы (4) катализатора загружают в анодную секцию (6). Воздух пропускают через катодную секцию (7). Две секции разделены токопроводящим соединением (5).

Ток собирается с обоих концов реактора.

Способ по настоящему изобретению дает ряд преимуществ по сравнению с уже известными способами. К таким преимуществам относятся

выработка пара в реакторе потенциально позволит снизить или подавить осаждение углерода;

достижение высокой степени конверсии обеспечивается за счет смещения реакции к получению ароматических углеводородов;

обеспечивается высокая скорость удаления водорода по сравнению с высокотемпературными мембранами;

возможность использования простого/дешевого блока сепарации;

тепло, выделяемое в результате реакции водорода/кислорода, и тепло от омических потерь подают для проведения реакции эндотермического синтеза ароматических углеводородов;

вырабатывается электричество.

Настоящее изобретение поясняется далее следующими примерами.

Пример 1.

Как показано на фиг. 7, природный газ (ПГ) обессеривают на установке А ГДС ПГ (гидродесульфуризации) и подают на установку В предварительного риформинга, которая работает при относительно малых температурах, вместе с паром с установки С по производству пара для обеспечения риформинга высших углеводородов. Природный газ, прошедший предварительный риформинг, не содержит высших углеводородов и почти не содержит монооксид углерода.

Выходящий поток из реактора предварительного риформинга охлаждают в установке D сепарации CO<sub>2</sub>/воды до температуры конденсации воды. В этой установке из сухого газа также удаляют углекислый газ. Часть водорода из газа, прошедшего риформинг, отделяют в мембранной установке E и рециркулируют назад в установку А ГДС ПГ. Сухой газ с высоким содержанием метана из мембранной установки смешивают с рециркулирующим газом из реактора F на ТОТЭ, нагревают до температуры реакции за счет теплообменника K и подают в реактор на ТОТЭ, а горячий воздух нагнетают в катодные каналы реактора на ТОТЭ. Газообразный продукт из анодных каналов охлаждают за счет использования исходного газа реактора и подают на установку G фазовой сепарации, где происходит сепарация органической, водной и газообразной фаз. Небольшая фракция газообразной фазы проходит очистку с целью предотвращения накопления инертных газов в контуре синтеза, а остальной объем газа очищают и рециркулируют назад в реактор на ТОТЭ. Органическую фазу направляют в установку дистилляции для дальнейшей очистки конечного продукта. Водную фазу направляют на установку H очистки сточных вод.

ПГ подают на установку при давлении 30 бар и.д..

Эксплуатацию установки А ГДС ПГ осуществляют при следующих рабочих условиях: температура 350°C; давление 30 бар и.д.; отношение водорода к исходному газу 0,04 (моль/моль); композиция ПГ (моль.%): 90% метан, 4% этан, 2% пропан; 4% инертные газы; необходимый объем тепла 0,79 МВ.

Эксплуатацию установки В предварительного риформинга осуществляют при следующих рабочих условиях: температура 350°C; давление 29 бар и.д.; отношение пар-углеродный материал (пар/углерод) 0,6 (моль/моль); расход пара 5,1 тонн в сутки; отвод тепла 2,48 МВ, если принять, что температура перегретого пара на входе составляет 350°C. Реактор является адиабатическим.

Эксплуатацию установки D сепарации CO<sub>2</sub>/воды осуществляют при следующих рабочих условиях: температура 40°C; давление 27 бар и.д.; температура конденсации воды 60°C (может быть использован воздушный охладитель); вынос диоксида углерода более 99%; концентрация диоксида углерода на входе 1,8 моль.%.

Эксплуатацию мембранной установки E, которая не является обязательной, осуществляют при следующих рабочих условиях: температура 40°C; давление 25 бар и.д.; молярный объем восстановленного водорода 84%; молярный проскок метана 9%; мощность компрессора для рециркулирующего газообразного водорода 44 кВт.

Реактор F на ТОТЭ обладает следующими техническими характеристиками: Габариты модуля (ячейки) 1×2×0,05 м; количество ячеек 1080; катализатор W на HZSM-5 с размером частицы 1 мм; объем катализатора 10,8 м<sup>3</sup>; мощность воздуходувки 786 кВт; чистая выдаваемая электрическая мощность 3,3 МВ (5% омических потерь и потерь конвертера постоянного и переменного тока); перепад давления 0,9 бар.

Эксплуатацию реактора осуществляют при следующих рабочих условиях: температура 800°C (средняя); давление 0,2 бар и.д. на катодной стороне (воздух) и 1,1 бар и.д. на анодной стороне (технологический газ); использование воздуха 5,5%; плотность тока 2000 А/м<sup>2</sup>; общая объемная скорость подачи газа в час 1000 ч<sup>-1</sup>; соотношение рециркулирующего технологического газа 9,6; мощность компрессора для рециркулирующего газа 1612 кВт; скорость потока воздуха 10377 Нм<sup>3</sup>/ч.

Степень конверсии метана составляет 5,75% по сравнению с 0,57% при использовании разрыхленного слоя при аналогичных технологических условиях. Расход водорода составляет 2379 нм<sup>3</sup>/ч, что соответствует скорости получения воды на уровне 1912 кг/ч. Горячий воздух из теплообменника М имеет температуру 95°C и может использоваться для коммунального отопления. Объем вырабатываемого тепла достигает 72,45 МВ без учета омических потерь.

Эксплуатацию установки фазовой сепарации осуществляют при следующих рабочих условиях: температура 40°C; атмосферное давление; обязательный отвод тепла 1,86 МВ.

Значения баланса материалов для данной технологической конфигурации, описанной в настоящем примере, приведены в таблице.

#### Пример 2.

Альтернатива технологической схеме, которая представлена на фиг. 7 и описана в примере 1, показана на фиг. 8. Отличие альтернативной конфигурации от описанной выше заключается в том, что отсутствует мембранная установка. В рамках данного варианта водород, необходимый для установки ГДС (гидродесульфуризации) ПГ, получают из выходящего потока реактора на ТОТЭ.

#### Пример 3.

Альтернатива технологической схеме, описанной в примере 2 и представленной на фиг. 8, представляет собой конфигурацию без установки удаления воды и диоксида углерода. В рамках данной конфигурации исходный газ ТОТЭ подают непосредственно с установки предварительного риформинга при температуре на выходе из реактора предварительного риформинга.

Значения баланса материалов для примера 1 (значения потока показаны на фиг. 7)

№ потока	Синт. Подпиточный													
	1	2	8	5	7	10	17	13	15	20	9	11	23	26
Название	ПГ	М/с	Рец. Н <sub>2</sub>	Синт. газ	Синт. газ без СО <sub>2</sub>	Подпиточный газ, насыщенный СН <sub>4</sub>	Рец. газ	Исходный газ	Выходящий газ	Продукт	Продувка Н <sub>2</sub>	Продувочный газ	Подача воздуха	Воздух на выходе
Моль.%														
N <sub>2</sub>	4.0	0.0	2.7	2.3	3.6	3.7	5.5	5.3	5.2	0.0	2.7	5.5	79.0	79.9
O <sub>2</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.0	20.1
H <sub>2</sub>	0.0	0.0	30.7	3.0	4.6	0.8	31.6	29.4	30.1	0.0	30.7	31.6	0.0	0.0
CH <sub>4</sub>	90.0	0.0	66.6	59.5	91.8	95.5	62.9	65.3	60.0	0.0	66.6	62.9	0.0	0.0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CO <sub>2</sub>	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
H <sub>2</sub> O	0.0	100.0	0.0	34.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T (°C)	21	350	90	60	60	40	100	800	113	40	40	40	25	95
P (бар и.д.)	30.0	30.0	30.0	27.5	25.5	3.5	1.3	1.1	0.1	0.1	5.0	0.1	0.0	0.1
Поток (кмоль/ч)	172	118	26	324	210	183	2376	2559	2623	16	0.7	125	4686	4633
МВ (кг/кмоль)	17.64	18.01	12.09	16.91	15.83	16.37	12.28	12.57	12.91	78.13	11.43	12.27	28.85	28.81
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	23.45	11.05	12.42		15.50	2.85	0.914	0.30		856.23	2.79	0.52	1.18	1.05

### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ прямой конверсии углеводородсодержащего газа в продукт высших углеводородов в анодной секции реактора топливного элемента, причем реактор топливного элемента ограничен стенками и представляет собой твердооксидный топливный элемент (ТОТЭ), причем реагирующие вещества вводят в анодные секции, и воздух подают в катодные секции, причем для интенсификации или замедления химической реакции водород, полученный в указанном реакторе и ограничивающий конверсию до равновесия, подвергают реакции *in situ* с ионами кислорода, перенесенными из катодной секции с получением пара, таким образом, удаляя из реакции ограничивающий равновесие водород,

причем углеводородсодержащий газ представляет собой любой метансодержащий газ, такой как природный газ, биогаз, синтетический природный газ или сланцевый газ, и

причем продуктами высших углеводородов являются ароматические соединения,

причем водород удаляют для использования в выработке электричества в реакторе топливного элемента с протонообменной мембраной или подвергают реакции *in situ* с ионами кислорода, перенесенными из катодной секции, с получением пара в реакторе твердооксидного топливного элемента (ТОТЭ).

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что продукт высших углеводородов представляет собой газообразный или жидкий продукт.

3. Способ по п.1 или 2, отличающийся тем, что катализатор конверсии наносят в виде покрытия на

поверхность анода или загружают в анодную секцию, либо используют комбинацию обоих вариантов.

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что метансодержащий газ предварительно очищают от примесей, представляющих собой любые неуглеводородные компоненты, в частности серу, азот.

5. Способ по п.4, отличающийся тем, что очищенный газ предварительно обрабатывают в установке обработки углеводородов для удаления или конверсии любых углеводородных компонентов, за исключением метана, чтобы получить исходный газ с высоким содержанием метана для реактора твердооксидного топливного элемента.

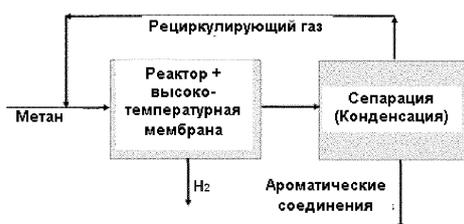
6. Способ по п.5, отличающийся тем, что установка для обработки углеводородов представляет собой реактор предварительного риформинга, работающий в оптимальных условиях для конверсии высших углеводородов, т.е. C2+, паром в водород и оксиды углерода.

7. Способ по п.6, отличающийся тем, что непрореагировавший исходный газ в реакторе топливного элемента сепарируют и рециркулируют назад в реактор.

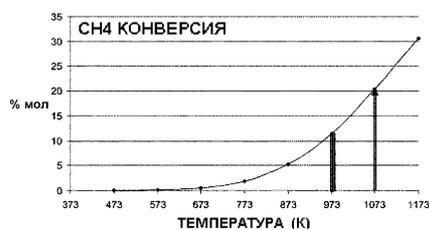
8. Способ по п.7, отличающийся тем, что фракцию газа из потока, выходящего из реактора топливного элемента, которая содержит водород, используют для очистки и обработки неочищенного углеводородного исходного газа.



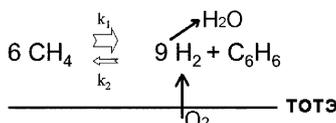
Фиг. 1



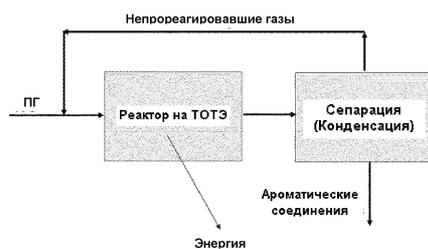
Фиг. 2



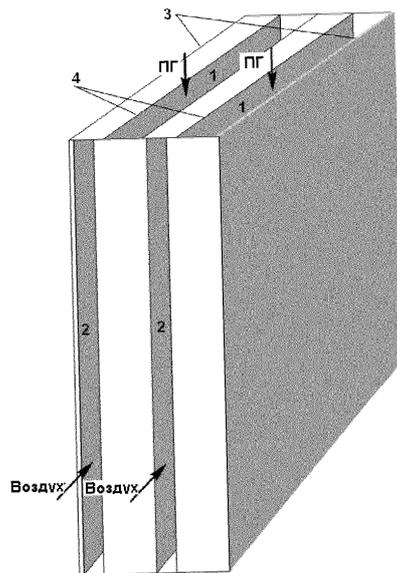
Фиг. 3



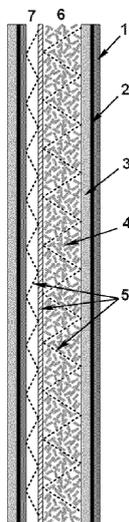
Фиг. 4



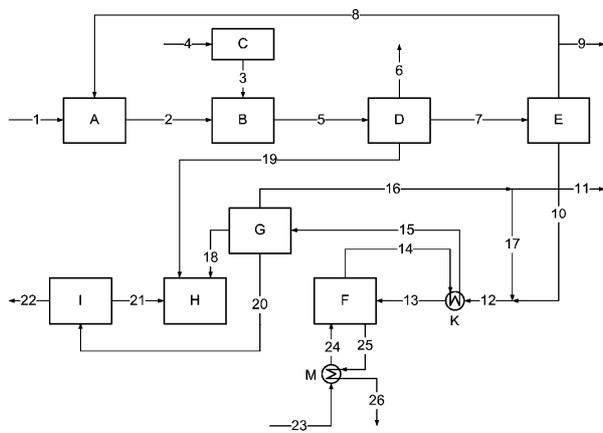
Фиг. 5



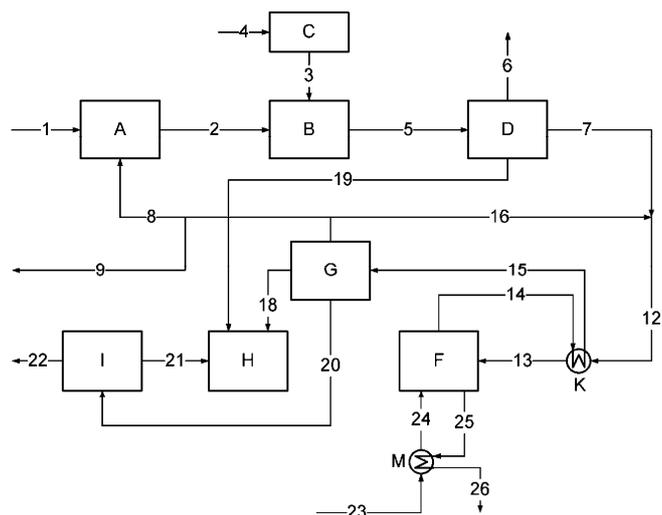
Фиг. 6а



Фиг. 6б



Фиг. 7



Фиг. 8