

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202292625 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2023.03.06

(51) Int. Cl. C10G 2/00 (2006.01)  
C01B 3/34 (2006.01)  
C01B 3/48 (2006.01)  
C25B 1/04 (2021.01)

(22) Дата подачи заявки  
2021.05.03

(54) СПОСОБ ПРЕВРАЩЕНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И ЭНЕРГИИ В ТОПЛИВО И ХИМИЧЕСКИЕ РЕАГЕНТЫ

(31) 63/101,556

(72) Изобретатель:

(32) 2020.05.04

Шюцле Роберт, Шюцле Деннис, Райт  
Гарольд, Хэнбери Орион, Колдуэлл  
Мэттью, Родригес Рамер (US)

(33) US

(86) PCT/US2021/010019

(87) WO 2021/225641 2021.11.11

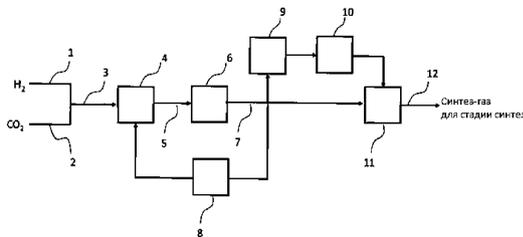
(74) Представитель:

(71) Заявитель:

ИНФИНИУМ ТЕКНОЛОДЖИ, ЛЛС  
(US)

Нилова М.И. (RU)

(57) Изобретение описывает способы, системы и катализаторы для превращения диоксида углерода, воды и электроэнергии в высококачественные низкоуглеродные или безуглеродные виды топлива и химических реагентов. В одном из аспектов согласно настоящему изобретению предложен комплексный способ превращения потока сырья, содержащего диоксид углерода, в поток продуктов, содержащий углеводороды длиной от 5 до 24 атомов углерода.



202292625

A1

A1

202292625

# СПОСОБ ПРЕВРАЩЕНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И ЭНЕРГИИ В ТОПЛИВО И ХИМИЧЕСКИЕ РЕАГЕНТЫ

## ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

Настоящее изобретение описывает каталитический способ превращения диоксида углерода, воды и электроэнергии, в идеальном варианте возобновляемой или низкоуглеродной электроэнергии, в высококачественные низкоуглеродные или безуглеродные виды топлива и химических реагентов. Эффективность способа превращения повышают за счет включения нескольких инновационных способов, которые не были описаны в существующем уровне техники. Первым усовершенствованием является способ автотермического риформинга (ATR), при котором остаточный газ (и, потенциально, другое углеводородное сырье) со стадии получения топлива/химических реагентов и кислород из способа электролиза превращается в дополнительный синтез-газ. Второе усовершенствование заключается в применении тепловой энергии способа автотермического риформинга для работы катализатора (гидрирования CO<sub>2</sub>) типа RWGS (Reverse Water-Gas Shift – обратная конверсия водяного газа). Третьим усовершенствованием является отделение и превращение CO<sub>2</sub> из способа автотермического риформинга в дополнительный синтез-газ с применением катализатора гидрирования CO<sub>2</sub>. Четвертое усовершенствование заключается в применении уникального катализатора, реактора и способа обратной конверсии водяного газа (RWGS) для превращения CO<sub>2</sub> и водорода в синтез-газ и предпочтительного выполнения данной операции обратной конверсии водяного газа при давлении, близком к давлению способа получения топлива/химических реагентов, при котором синтез-газ превращают в топливо или химические реагенты. Наиболее предпочтительно данные виды топлива или химических реагентов представляют собой жидкие парафиновые или олефиновые углеводороды, большинство из которых находится в диапазоне C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub>.

## УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

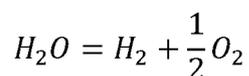
Диоксид углерода получают посредством многих промышленных и биологических способов. Диоксид углерода обычно выбрасывается в атмосферу. Однако, поскольку диоксид углерода был определен как газ, в значительной степени вызывающий парниковый эффект, необходимо сократить выбросы диоксида углерода в результате данных способов. Хотя в ограниченном ряде случаев этот диоксид углерода можно применять для повышения добычи нефти и газа из скважин, большая часть этого захваченного диоксида углерода

будет выброшена в атмосферу. Предпочтительным способом обращения с диоксидом углерода является эффективное улавливание, применение диоксида углерода и превращение его в полезные продукты, такие как топливо (например, дизельное топливо, бензин, компоненты смешения бензинов, бензиновые смеси, топливо для реактивных  
5 двигателей, керосин и т.д.) и химические реагенты (например, растворители, олефины, спирты, ароматические соединения, смазочные материалы, парафины, аммиак, метанол и другие), которые могут заменить виды топлива и химических реагентов, получаемые из ископаемых источников, таких как нефть и природный газ, и, следовательно, снизить общие  
10 чистые выбросы диоксида углерода в атмосферу. Это то, что подразумевается под низкоуглеродными, сверхнизкоуглеродными или безуглеродными видами топлива и химических реагентов.

Диоксид углерода можно получить из нескольких источников. Промышленные производственные предприятия, получающие аммиак для удобрений, производят большое количество диоксида углерода. Заводы по производству этанола, которые перерабатывают  
15 кукурузу или пшеницу в этанол, производят большое количество диоксида углерода. Электростанции, вырабатывающие электроэнергию из различных ресурсов (например, природного газа, угля и других ресурсов), производят большое количество диоксида углерода. Химические заводы, такие как заводы по производству нейлона, заводы по производству этилена и другие химические заводы, производят большое количество  
20 диоксида углерода. Некоторые газоперерабатывающие заводы производят  $\text{CO}_2$  как часть способа очистки природного газа в соответствии со спецификациями трубопровода. Улавливание  $\text{CO}_2$  для утилизации как описано в настоящем документе часто включает отделение диоксида углерода от потока дымовых газов или другого потока, в котором диоксид углерода не является основным компонентом. Некоторые источники  $\text{CO}_2$  уже  
25 являются относительно чистыми и могут быть применены только с незначительной обработкой (которая может включать сжатие газа) в способах, описанных в настоящем документе. Для некоторых способов может потребоваться алкиламин или другой способ, который можно применять для удаления диоксида углерода из потока дымовых газов. Алкиламины, применяемые в способе, включают моноэтаноламин, диэтаноламин,  
30 метилдиэтаноламин, диизопропиламин, аминоэтоксиэтанол или их комбинации. Материалы с металлоорганической каркасной структурой (MOF материалы) также применяют для отделения диоксида углерода от разбавленного потока с применением хемосорбции или физической сорбции для улавливания диоксида углерода из потока. Другие способы получения концентрированного диоксида углерода включают горение с

химическим циклом, при котором циркулирующий оксид металла улавливает диоксид углерода, образующийся в процессе горения. Диоксид углерода также можно улавливать из атмосферы при так называемом прямом захвате диоксида углерода из воздуха (DAC).

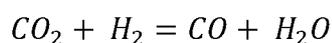
5 Возобновляемые источники водорода ( $H_2$ ) могут быть получены из воды путем электролиза.



Для расщепления воды на водород и кислород в данной реакции применяют электроэнергию. Электролизеры состоят из анода и катода, разделенных электролитом. Различные электролизеры функционируют немного по-разному, главным образом из-за  
10 разного типа применяемого материала электролита.

Однако каждый технологический способ электролиза имеет теоретическую минимальную потребляемую электроэнергию 39,4 кВт\*ч/кг  $H_2$  (ННВ водорода), если воду подают в систему при давлении и температуре окружающей среды, и всю потребляемую энергию предоставляют в виде электроэнергии. Требуемая потребляемая электроэнергия может  
15 быть снижена ниже 39,4 кВт\*ч/кг  $H_2$ , если в систему подают необходимую тепловую энергию. Помимо электролиза, важные текущие исследования посвящены изучению способов расщепления воды на водород и кислород с применением энергии света и фотокатализатора. (Acar et al, *Int. J. Energy Res.* 2016; 40:1449–1473).

Одной из реакций, которую рассматривали для утилизации диоксида углерода, является  
20 реакция обратной конверсии водяного газа (RWGS).



При данной реакции происходит превращение диоксида углерода и водорода в монооксид углерода и воду. При комнатной температуре данная реакция является эндотермической, и для ее протекания необходимы тепло и повышенная температура, а для значительного  
25 превращения диоксида углерода необходим хороший катализатор. Для реакции обратной конверсии водяного газа был описан ряд катализаторов. Исследуемый ранее первичный катализатор представлял собой Cu, Pt или Rh, диспергированные на носителях из оксидов металлов. (Daza & Kuhn, *RSC Adv.* 2016, 6, 49675-49691).

Благодаря CO (монооксиду углерода) в результате обратной конверсии водяного газа и  
30 водороду в результате электролиза воды существует потенциал для получения полезных

продуктов посредством каталитического гидрирования монооксида углерода до углеводородов. Смеси  $H_2$  и  $CO$  называют синтетическим газом или синтез-газом. Синтез-газ можно применять в качестве сырья для получения широкого спектра химических продуктов, включая жидкое топливо, спирты, уксусную кислоту, диметиловый эфир, метанол, аммиак и многие другие химические продукты.

Каталитическое гидрирование монооксида углерода с получением легких газов, жидкостей и парафинов, от метана до тяжелых углеводородов ( $C_{100}$  и выше) в дополнение к кислород-содержащим углеводородам, обычно относится к синтезу Фишера-Тропша (или Ф-Т). Традиционные низкотемпературные ( $< 250$  °C) процессы Ф-Т в основном приводят к получению высокомолекулярного парафина Ф-Т (или мас.%) ( $C_{25}$  и выше) в результате каталитического превращения. Данные парафины Ф-Т затем подвергают гидрокрекингу и/или дальнейшей переработке для получения дизельного топлива, лигроина и других фракций. В ходе способа гидрокрекинга также образуются легкие углеводороды, которые могут потребовать дополнительной очистки для получения жизнеспособных продуктов. Катализаторы, которые обычно применяют для синтеза Ф-Т, представляют собой катализаторы на основе кобальта (Co) либо на основе железа (Fe), которые также активны при реакции конверсии водяного газа (WGS), которая приводит к превращению исходного монооксида углерода в диоксид углерода. Смотрите более подробную информацию о существующем уровне техники в области синтеза Фишера-Тропша (S.S. Ail, S. Dasappa / Renewable and Sustainable Energy Reviews 58 (2016) 267–286).

На сегодняшний день не разработаны эффективные и экономичные способы, системы и катализаторы для превращения диоксида углерода в полезные виды топлива и химических реагентов. Существует потребность в более совершенных способах, системах и катализаторах.

### **КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ**

На **Фигурах 1–3** представлен комплексный высокоэффективный способ превращения диоксида углерода, воды и возобновляемой электроэнергии в возобновляемые виды топлива и химических реагентов.

На **Фигуре 1** представлена часть общей технологической схемы превращения  $H_2$  и  $CO_2$  в виды топлива и химических реагентов. В частности, на **Фигуре 1** представлена реакторная система с обратной конверсией водяного газа для получения  $CO$  из  $CO_2$ .

На **Фигуре 2** представлена часть общей технологической схемы превращения  $H_2$  и  $CO_2$  в виды топлива и химических реагентов. В частности, на **Фигуре 2** представлена система для получения жидкого топлива, в которой  $CO$  и  $H_2$  реагируют с образованием углеводородов с более длинной цепью, которые можно применять в качестве топлива или химических реагентов, а также способ автотермического риформинга для конверсии остаточных газов.

На **Фигуре 3** представлена часть общей технологической схемы превращения  $H_2$  и  $CO_2$  в виды топлива и химических реагентов. В частности, на **Фигуре 3** представлена электролизёрная установка для получения водорода и кислорода из воды и низкоуглеродной энергии.

10

### **КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СУЩНОСТИ ИЗОБРЕТЕНИЯ**

Изобретение относится к способу превращения диоксида углерода, воды и электроэнергии в полезные химические реагенты и топливо. Способ включает превращение воды в водород в эффективной электролизёрной установке, для которой применяют электроэнергию, в идеальном варианте возобновляемую электроэнергию, в качестве источника энергии. Диоксид углерода и водород реагируют с монооксидом углерода и водой в реакторе обратной конверсии водяного газа (RWGS), в котором теплота реакции обеспечивается возобновляемой электроэнергией. Катализатор, применяемый в реакторе, представляет собой новый твердорастворный катализатор. Полученный монооксид углерода и дополнительный водород вступают в реакцию в реакторе для получения жидких видов топлива для получения топлива и химических реагентов, при этом в реакторе применяют новый катализатор для прямого получения топлива и химических реагентов. Различные виды топлива или химических реагентов могут быть получены из синтез-газа, как описано в настоящем документе. Предпочтительно полученный продукт представляет собой углеводород длиной от 4 до 24 атомов углерода. Эффективность способа превращения повышают, а капитальные затраты снижают за счет включения в способ нескольких инновационных операций. Первым усовершенствованием является способ автотермического риформинга (ATR), при котором остаточный газ (и, потенциально, другое углеводородное сырьё) со стадии получения топлива/химических реагентов и кислород из способов электролиза превращают в дополнительный синтез-газ. Второе усовершенствование заключается в применении тепловой энергии способа автотермического риформинга для работы катализатора гидрирования  $CO_2$ . Третьим усовершенствованием является превращение  $CO_2$  из способа автотермического

риформинга в дополнительный синтез-газ с применением катализатора гидрирования CO<sub>2</sub>. Четвертое усовершенствование заключается в применении уникального катализатора и способа обратной конверсии водяного газа (RWGS) для превращения CO<sub>2</sub> и водорода в синтез-газ и предпочтительного выполнения данного способа обратной конверсии водяного

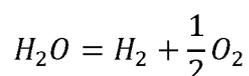
5 газа при давлении, близком к давлению способа получения топлива/химических реагентов, при котором синтез-газ предпочтительно превращают в жидкие углеводороды, большинство из которых находится в диапазоне C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub>.

### ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ СУЩНОСТИ НАСТОЯЩЕГО ИЗОБРЕТЕНИЯ

10 На **Фигуре 1** представлены несколько подсистем: 1) электролизная система для получения водорода из воды, 2) система реактора обратной конверсии водяного газа (RWGS) для получения CO из CO<sub>2</sub>, 3) секция автотермического риформинга (ATR), 4) компрессионная система синтез-газа.

Воду подают в электролизную систему. Возобновляемую электроэнергию применяют для

15 питания электролизной системы. Водород получают с помощью электролиза воды.



Электролизеры состоят из анода и катода, разделенных электролитом. Различные электролизеры функционируют немного по-разному. Можно применять различные конструкции электролизеров, в которых применяют различные технологии электролиза,

20 включая щелочной электролиз, мембранный электролиз и высокотемпературный электролиз. Щелочной электролиз предпочтителен, поскольку он коммерчески подходит для работы в более крупном масштабе > 1 МВт. Можно применять различные электролиты, включая жидкости КОН и NaOH с активирующими соединениями или без них. В электролит можно добавлять активирующие соединения для повышения стабильности

25 электролита. Большинство ионных активаторов реакции выделения водорода состоят из хлоридного комплекса металла на основе этилендиамина(-ена) ([M(en)<sub>3</sub>]Cl<sub>x</sub>, M<sup>1/4</sup>Co, Ni и др.) и Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> или Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>. На электродах могут быть применены различные электрокатализаторы, включая множество различных комбинаций металлов и оксидов, таких как сплав никель Ренея-алюминий, которые можно улучшить, добавив в сплав

30 кобальт или молибден.

Несколько комбинаций переходных металлов, таких как Pt<sub>2</sub>Mo, Hf<sub>2</sub>Fe и TiPt, были применены в качестве катодных материалов и показали значительно более высокую электрокаталитическую активность, чем электроды известного уровня техники.

5 Вода на катоде соединяется с электронами из внешней цепи с образованием газообразного водорода и отрицательно заряженных ионов кислорода. Ионы кислорода проходят через твердую керамическую мембрану и реагируют на аноде, образуя газообразный кислород и генерируя электроны для внешней цепи. Таким образом, в электролизере образуются как газообразный водород, так и газообразный кислород. В одном варианте реализации изобретения несколько электролизеров работают параллельно. Ни один электролизер не  
10 работает со 100%-ной энергетической эффективностью, и энергопотребление имеет решающее значение для экономичной работы оборудования. Энергопотребление в электролизере должно составлять менее 200 мегаватт-часов (МВт-ч)/метрическую тонну (МТ) H<sub>2</sub>, предпочтительно менее 120 МВт-ч/МТ H<sub>2</sub> и более предпочтительно менее 60 МВт-ч/МТ H<sub>2</sub>. Для варианта реализации щелочного электролизера потребление электроэнергии  
15 составляет более 39,4 МВт-ч/МТ H<sub>2</sub>. Однако для варианта реализации высокотемпературного электролизера потребление электроэнергии потенциально может составлять менее 39,4 МВт-ч/МТ H<sub>2</sub>, если отработанное тепло применяют для нагревания электролизера выше температуры окружающей среды.

Диоксид углерода может поступать из многочисленных промышленных и природных  
20 источников. Диоксид углерода часто встречается в месторождениях природного газа. Диоксид углерода выделяется в результате многих биологических процессов, таких как анаэробное пищеварение. В ходе многих других процессов (например, работа электростанций, цементных заводов, производство этанола, нефтепереработка, работа химических заводов и т.д.) производят диоксид углерода, который обычно выбрасывается  
25 в атмосферу. Диоксид углерода также можно найти в атмосфере. Диоксид углерода можно улавливать в данных биологических, промышленных и атмосферных процессах с помощью многих известных технологий и применять в качестве исходного сырья для настоящего изобретения.

Безуглеродные, низкоуглеродные и сверхнизкоуглеродные виды топлива и химических  
30 реагентов требуют, чтобы ископаемое топливо не сжигали при способе получения топлива и химических реагентов. Это означает, что любой нагрев сырья для комплексного способа должен быть осуществлен косвенными средствами (перекрестные теплообменники) или с

помощью электрического нагрева, когда электроэнергия поступает от безуглеродных или возобновляемых источников, таких как ветер, солнце, геотермальная или ядерная энергия.

Поток водорода 1 и поток диоксида углерода 2 смешивают с образованием потока 3 на **Фигуре 1**. Отношение  $H_2/CO_2$  составляет от 2,0 моль/моль до 4,0 моль/моль, более предпочтительно от 3,0 до 4,0 моль/моль. Смешанное сырье для обратной конверсии водяного газа (RWGS) может быть нагрето посредством косвенного теплообмена до температуры более 482 °C (900°F). Важно, чтобы это начальное повышение температуры происходило без применения прямого сжигания углеродосодержащего газа для получения тепла, поскольку это означало бы, что происходит образование диоксида углерода, и, возможно, сводит на нет вклад превращения диоксида углерода в полезные виды топлива и химических реагентов.

Сырьевой газ обратной конверсии водяного газа, содержащий смесь водорода и диоксида углерода, нагревают до температуры на входе более 816 °C (1500°F) или, предпочтительно, более 871 °C (1600°F), по меньшей мере, частично в устройстве для предварительного нагрева вне основного корпуса реактора для получения нагретого сырьевого газа. На **Фигуре 1** показано, что устройство для предварительного нагрева обозначено как ступень 4. Ступень устройства для предварительного нагрева 4 нагревают электрически и повышают температуру подаваемого газа за счет непрямого теплообмена до температуры выше 816 °C (1500°F), предпочтительно выше 871 °C (1600°F). Существует множество способов реализации электрического нагрева сырьевого газа. Одним из способов является электрический нагрев в излучающей печи с электрическим нагревом. В данном варианте реализации изобретения по меньшей мере часть сырьевого газа проходит через нагревательный змеевик в печи. В печи нагревательный змеевик окружен излучающими электрическими нагревательными элементами или газ проходит непосредственно над нагревательными элементами, в результате чего газ нагревается за счет некоторой конвективной теплопередачи. Электронагревательные элементы могут быть получены из различных материалов. Нагревательные элементы могут быть из сплавов хрома и никеля. Эти элементы могут быть в виде скрученных полос или проволоки или отлиты в виде зигзагообразных узоров. Элементы как правило защищены изолированной стальной оболочкой, а для изоляции обычно используют керамическое волокно. Излучающие элементы могут быть разделены на зоны для обеспечения контролируемого режима нагрева. Для подачи тепла к сырьевому газу и получения нагретого сырьевого газа может потребоваться несколько змеевиков и несколько зон. Излучающие печи требуют правильной конструкции нагревательных элементов и жидкостных змеевиков, чтобы

обеспечить хорошие коэффициенты видимости и хорошую теплопередачу. Потребление электроэнергии излучающей печью должно быть как можно меньше. Потребление электроэнергии излучающей печью составляет менее 0,5 МВт-ч (мегаватт-час) электроэнергии на метрическую тонну (МТ) CO<sub>2</sub> в сырьевом газе; более предпочтительно менее 0,40 МВт-ч/МТ CO<sub>2</sub>; и еще более предпочтительно менее 0,20 МВт-ч/МТ CO<sub>2</sub>.

Затем поток нагретого сырьевого газа обратной конверсии водяного газа 5 подают на ступень 6 основного корпуса реактора обратной конверсии водяного газа. Существует два возможных варианта реализации основного корпуса реактора обратной конверсии водяного газа. В первом варианте реализации основной корпус реактора обратной конверсии водяного газа является адиабатическим или почти адиабатическим и предназначен для минимизации потерь тепла, но в основной корпус реактора не подают дополнительное тепло, и температура в основном корпусе реактора снижается от входа к выходу из реактора. Во втором варианте реализации основной корпус реактора обратной конверсии водяного газа имеет аналогичную конструкцию, но в корпус подают дополнительное тепло для поддержания изотермического или близкого к изотермическому температурного профиля в корпусе. Основной корпус реактора обратной конверсии водяного газа представляет собой реактор, длина которого больше диаметра. Вход в основной корпус реактора меньше, чем общий диаметр корпуса. Основной корпус реактора представляет собой стальной корпус. Стальной корпус имеет внутреннюю изоляцию для ограничения потерь тепла. Для ограничения потерь тепла в окружающую среду можно применять различные виды изоляции, в том числе литую или литьевую огнеупорную футеровку или изоляционные кирпичи.

Слой катализатора находится внутри основного корпуса реактора обратной конверсии водяного газа. Катализатор может быть в форме гранул, окатышей, сфер, трехлепестковой формы, четырехлепестковой формы, монолитной формы или любой другой специально разработанной формы, предназначенной для минимизации перепада давления в реакторе. В идеальном варианте форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе составлял менее 100 фунтов на квадратный дюйм (psi) [345 кПа] и более предпочтительно менее 20 фунтов на квадратный дюйм (139 кПа). Размер формы катализатора имеет характерный размер от 1 мм до 10 мм. Частица катализатора представляет собой структурированный материал, представляющий собой пористый материал с площадью внутренней поверхности более 40 м<sup>2</sup>/г, более предпочтительно более 80 м<sup>2</sup>/г с предпочтительной площадью поверхности 100 м<sup>2</sup>/г. Возможны несколько материалов катализатора, которые катализируют реакцию обратной конверсии водяного

газа. Первичный катализатор, изученный ранее для обратной конверсии водяного газа, представлял собой Cu, Pt или Rh, диспергированные на носителях из оксидов металлов. (Daza & Kuhn, *RSC Adv.* 2016, 6, 49675-49691). Было обнаружено, что предпочтительным катализатором является твердорастворный катализатор с переходным металлом на металл-  
5 алюминиевой шпинели.

Катализатор обратной конверсии водяного газа, применяемый в способе, представляет собой высокоэффективный твердорастворный катализатор, обладающий высокой универсальностью и эффективно осуществляющий реакцию обратной конверсии водяного газа. Прочный твердорастворный катализатор на основе переходных металлов обладает  
10 высокой термической стабильностью до 1100°C, не образует углерода (не закоксовывается) и обладает хорошей устойчивостью к загрязнениям, которые могут присутствовать в захваченных потоках CO<sub>2</sub>. Данный катализатор проявляет высокую активность при низких концентрациях переходных металлов (5-20 мас.%) по сравнению с другими катализаторами, для которых требуется по меньшей мере 30 мас.% переходных металлов.  
15 Кроме того, нет необходимости в применении дорогих драгоценных металлов для улучшения характеристик катализатора. Способ получения катализатора обратной конверсии водяного газа также важен тем, что он позволяет получить катализатор, который образует уникальную твердорастворную фазу, биметаллическую кристаллическую фазу, которая не приводит к сегрегации металлических фаз. Эта уникальная химическая  
20 структура обеспечивает повышенную устойчивость к закоксовыванию по сравнению с обычными катализаторами на металлическом носителе. Это также приводит к повышенной устойчивости к ядам, таким как сера и аммиак. Кроме того, этот катализатор имеет повышенную каталитическую активность при меньшей площади поверхности по сравнению с монометаллической сегрегированной фазой катализатора, например Ni на  
25 оксиде алюминия. Данный катализатор не требует промотирования щелочью, необходимого для сдерживания отложений углерода.

При этом давление на стадии обратной конверсии водяного газа и давление на стадии синтеза углеводородов или получения жидкого топлива (LFP) отличаются в пределах 1379 кПа (200 фунтов на квадратный дюйм), более предпочтительно в пределах 690 кПа (100  
30 фунтов на квадратный дюйм) или еще более предпочтительно в пределах 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм). Выполнение двух способов при давлениях, близких друг к другу, ограничивает требуемое сжатие потока синтез-газа.

Превращение диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в основном корпусе реактора обратной конверсии водяного газа как правило составляет от 60 до 90 мольных % и более предпочтительно от 70 до 85 мольных %. При применении варианта адиабатического реактора температура в основном корпусе реактора обратной конверсии

5 водяного газа будет снижаться от входа к выходу. Температура на выходе из основного корпуса реактора обратной конверсии водяного газа на 38-76 °C (на 100-200°F) меньше, чем температура на входе в основной корпус реактора, и более предпочтительно на 41-71 °C (на 105-160°F) ниже, чем температура на входе в основной реактор. Среднечасовая скорость подачи сырья (WHSV) обратной конверсии водяного газа, которая представляет собой

10 массовый расход реагентов обратной конверсии водяного газа ( $H_2 + CO_2$ ) в час, деленная на массу катализатора в основном слое реактора обратной конверсии водяного газа, и составляет от 1000 до 50 000  $ч^{-1}$ , предпочтительно от 5000 до 30 000  $ч^{-1}$ .

Газ, выходящий из основного корпуса реактора обратной конверсии водяного газа, представляет собой поток газообразного продукта обратной конверсии водяного газа 7.

15 Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа содержит монооксид углерода (CO), водород ( $H_2$ ), непрореагировавший диоксид углерода ( $CO_2$ ) и воду ( $H_2O$ ). Кроме того, газообразный продукт обратной конверсии водяного газа может также содержать небольшое количество метана ( $CH_4$ ), который образуется в основном корпусе реактора в результате побочной реакции.

20 На данной стадии способа газообразный продукт обратной конверсии водяного газа можно применять различными способами. Газообразный продукт можно охлаждать и сжимать, а затем применять в последующем способе получения топлива и химических реагентов, как показано на **Фигуре 2**. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа также можно охлаждать, сжимать на ступени 8 и направлять обратно на ступень устройства для

25 предварительного нагрева 4 и подавать обратно на ступень 5 основного корпуса реактора. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа также можно повторно нагревать на второй ступени электрического устройства для предварительного нагрева 9 и направлять на вторую ступень корпуса реактора 10, где может происходить дополнительное превращение  $CO_2$  в CO.

30 На **Фигуре 2** показана стадия синтеза углеводородов. Эта стадия также известна как стадия получения жидкого топлива (LFP). Реактор для получения жидкого топлива превращает CO и  $H_2$  в длинноцепочечные углеводороды, которые можно применять в качестве жидкого топлива и химических реагентов. В данном реакторе применяют уникальный катализатор

для получения углеводородов жидкого топлива из синтез-газа. Поток синтез-газа 12 из ступени охлаждения и конденсации 22 синтез-газа на **Фигуре 2** (и необязательной ступени сжатия 11 на **Фигуре 1**) смешивают с потоком остаточного газа 13 для получения сырьевого потока 14 реактора для получения жидкого топлива. Сырье реактора для получения жидкого топлива содержит водород и монооксид углерода. В идеальном варианте отношение водорода к монооксиду углерода в потоке составляет от 1,9 до 2,2 моль/моль. Ступень реактора для получения жидкого топлива 15 представляет собой многотрубчатую реакторную систему с неподвижным слоем. Диаметр каждой трубы реактора для получения жидкого топлива составляет от 13 мм до 26 мм. Длина трубы реактора как правило превышает 6 метров и более предпочтительно превышает 10 метров. Реакторы для получения жидкого топлива как правило ориентированы вертикально, при этом сырье реактора для получения жидкого топлива поступает в верхнюю часть реактора для получения жидкого топлива. Однако в некоторых обстоятельствах возможна горизонтальная ориентация реактора, и установка реактора под углом также может быть выгодна при некоторых условиях, когда существуют ограничения по высоте. Большая часть длины трубы реактора для получения жидкого топлива заполнена катализатором для получения жидкого топлива. Катализатор для получения жидкого топлива также может быть смешан с разбавителем, таким как диоксид кремния или оксид алюминия, чтобы способствовать распределению сырья реактора для получения жидкого топлива в трубе реактора для получения жидкого топлива и посредством нее. Химическая реакция, протекающая в реакторе для получения жидкого топлива, приводит к образованию газообразного жидкого топлива, которое содержит большинство углеводородных продуктов длиной от пяти до двадцати четырех атомов углерода (углеводороды типа C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub>), а также воду, хотя некоторые углеводороды находятся за пределами этого диапазона. Важно, чтобы реактор для получения жидкого топлива не производил значительного количества диоксида углерода. Менее 2% монооксида углерода в сырье реактора для получения жидкого топлива должно быть превращено в диоксид углерода в реакторе для получения жидкого топлива. Также важно, чтобы только ограниченное количество монооксида углерода в сырье реактора для получения жидкого топлива было превращено в углеводороды с числом атомов углерода более 24. Менее 25% углеводородной фракции полученного жидкого топлива должно иметь число атомов углерода более 24. Более предпочтительно менее 10 мас.% углеводородной фракции полученного жидкого топлива должно иметь углеродное число более 24. Еще более предпочтительно менее 4 мас.% углеводородной фракции полученного жидкого топлива должно иметь углеродное число более 24. Еще более предпочтительно менее 1 мас.% углеводородной фракции полученного

жидкого топлива должно иметь число атомов углерода более 24. Как обсуждалось выше, в результате способов Фишера-Тропша (Ф-Т) как правило получают углеводородные продукты длиной от 1 до 125 атомов углерода. Применяемый катализатор для получения жидкого топлива не дает тяжелых углеводородов с таким же выходом, как другие катализаторы, применяемые в способе Фишера-Тропша. В некоторых вариантах реализации настоящего изобретения катализатор для получения жидкого топлива обладает незначительной активностью в отношении превращения монооксида углерода в диоксид углерода посредством реакции конверсии водяного газа. В некоторых вариантах реализации настоящего изобретения превращение монооксида углерода в диоксид углерода при конверсии водяного газа составляет менее 5% монооксида углерода в сырье. В некоторых вариантах реализации катализатор для получения жидкого топлива содержит кобальт в качестве активного металла. В некоторых вариантах реализации катализатор для получения жидкого топлива содержит железо в качестве активного металла. В некоторых вариантах реализации катализатор для получения жидкого топлива содержит комбинации железа и кобальта в качестве активного металла. Катализатор для получения жидкого топлива наносят на носитель из оксида металла, который выбирают из группы, состоящей из оксида алюминия, диоксида кремния, диоксида титана, активированного угля, углеродных нанотрубок, цеолитов или других материалов-носителей с достаточным размером, формой, диаметром пор, площадью поверхности, прочностью на раздавливание, эффективным радиусом окатышей или их смеси. Катализатор может иметь разные формы различных лепестковых подложек с тремя, четырьмя или пятью лепестками, причем два или более лепестков длиннее двух других более коротких лепестков, причем оба более длинных лепестка являются симметричными. Расстояние от средней точки опоры или средней точки каждого лепестка называется эффективным радиусом окатыша, который является важным параметром для достижения заданной селективности по углеводородам от C<sub>5</sub> до C<sub>24</sub>. Промоторы катализатора для получения жидкого топлива могут включать один из следующих металлов: никель, церий, лантан, платину, рутений, рений, золото или родий. Промоторы катализатора для получения жидкого топлива составляют менее 1 мас.% от общего количества катализатора, предпочтительно менее 0,5 мас.% и еще более предпочтительно менее 0,1 мас.%.

Носитель катализатора для получения жидкого топлива имеет диаметр пор более 8 нанометров (нм), средний эффективный радиус окатышей менее 600 микрон, прочность на раздавливание более 1,36 кг/мм (3 фунтов/мм) и площадь поверхности по БЭТ более 100 м<sup>2</sup>/г. Катализатор после пропитки металлом имеет дисперсность металла около 4%. Было

обнаружено, что несколько типов носителей максимизируют выход углеводородов  $C_5$ – $C_{24}$ . К ним относятся комбинации оксида алюминия/диоксида кремния, активированный уголь, оксид алюминия, углеродные нанотрубки и/или носители на основе цеолитов.

5 Реактор для получения жидкого топлива с неподвижным слоем работает таким образом, чтобы максимизировать выход углеводородов  $C_5$ – $C_{24}$ . Реактор для получения жидкого топлива в одном варианте реализации работает при давлении от 1034 до 3103 кПа (150 до 450 фунтов на квадратный дюйм). Реактор работает в диапазоне температур от 177 до 238 °C (350 до 460°F) и, как правило, при температуре около 210 °C (410°F). Реакция является экзотермической. Температуру реактора внутри труб реактора для получения жидкого топлива поддерживают за счет помещения пучка труб реактора в теплообменник, где 10 снаружи труб реактора для получения жидкого топлива присутствует кипящий пар. Температура пара находится при более низкой температуре, чем температура реакции получения жидкого топлива, так что тепло передается от трубы реактора для получения жидкого топлива пару с более низкой температурой. Температура пара поддерживается за 15 счет поддержания давления пара. Как правило, пар представляет собой насыщенный пар. В альтернативном варианте реализации каталитический реактор представляет собой суспензионный реактор, микроканальный реактор, реактор с псевдоожиженным слоем или другие типы реакторов, известные в данной области техники.

20 Степень превращения CO в реакторе для получения жидкого топлива поддерживают на уровне от 30 до 80 мольных % превращения CO за один цикл. CO можно рециркулировать для дополнительного превращения или отправить в дополнительный реактор для получения жидкого топлива, расположенный ниже по потоку. Селективность по углероду в отношении к  $CO_2$  сведена к минимуму до менее чем 4% от превращенного CO и более предпочтительно до менее чем 1%. Селективность по углероду для углеводородов  $C_5$ – $C_{24}$  25 составляет от 60 до 90%. Поток газообразного продукта реактора для получения жидкого топлива 16 содержит целевые углеводороды типа  $C_5$ – $C_{24}$ , которые конденсируются в виде жидкого топлива и воды, а также непрореагировавший монооксид углерода, водород, небольшое количество углеводородов типа  $C_1$ – $C_4$  и небольшое количество потока углеводородов типа  $C_{24+}$  24. Целевой продукт отделяют от потока путем охлаждения, 30 конденсации продукта и/или дистилляции или любым другим приемлемым способом на ступени 17. Непрореагировавший монооксид углерода, водород и поток углеводородов  $C_1$ – $C_4$  18 являются частью сырья, поступающего в установку автотермического риформинга ступени 19.

На **Фигуре 2** также показана секция 20 ступени способа автотермического риформинга (ATR). В установке для автотермического риформинга (ATR) углеводородное сырье автотермического риформинга включает монооксид углерода, водород и углеводороды C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub>. Автотермический риформинг природного газа, который преимущественно представляет собой метан (C<sub>1</sub>), в монооксид углерода и водород применяют в коммерческих целях в течение многих лет. Смотрите K. Aasberg-Petersen et al., *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 3 (2011) 423-459.

В одном варианте реализации настоящего изобретения углеводородное сырье автотермического риформинга содержит поток природного газа 20 и поток непрореагировавшего монооксида углерода, водорода и углеводородов типа C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub> 18. Природный газ содержит метан и может включать легкие углеводороды, а также диоксид углерода. В этом варианте реализации получаемые виды топлива и химических реагентов могут быть не безуглеродными, но все равно будут иметь улучшенную углеродоемкость по сравнению с традиционными видами топлива и химических реагентов. Природный газ в сырье для автотермического риформинга превращают в синтез-газ (включая большой процент водорода). Это уменьшает количество воды, которую необходимо подвергнуть электролизу для получения водорода, и уменьшает размер электролизера. Данный вариант реализации является более экономически целесообразным для получения низкоуглеродных видов топлива и химических реагентов. В углеводородном сырье для автотермического риформинга отношение природного газа к непрореагировавшему монооксиду углерода, водороду и углеводородам C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub> должно быть менее 2,0 кг/кг. Более предпочтительно соотношение должно быть менее 1,25 кг/кг.

Автотермический риформинг, применяемый в настоящем изобретении, предназначен для получения продукта с высоким содержанием монооксида углерода и содержанием диоксида углерода в газообразном продукте менее 10 мол.%. Окислительное сырье для автотермического риформинга содержит пар и кислород, причем кислород получают электролизом воды. Окислительное сырье для автотермического риформинга и углеводородное сырье для автотермического риформинга предварительно нагревают, а затем подвергают реакции в горелке для автотермического риформинга, где окислитель и углеводород частично окисляются при температурах в горелке выше 2000°C. Реактор для автотермического риформинга можно разделить на три зоны; зона горения (или горелка), где по меньшей мере часть углеводородного сырья для автотермического риформинга полностью сгорает до воды и диоксида углерода; термическая зона, где происходят термические реакции. В термической зоне дальнейшее превращение происходит за счет

гомогенных газофазных реакций. Данные реакции являются более медленными реакциями, чем реакции горения, такие как реакции окисления СО и реакции пиролиза с участием высших углеводородов. Основными реакциями в термической зоне являются гомогенный газофазный паровой риформинг углеводородов и реакция конверсии. В каталитической зоне завершающее превращение углеводородов происходит посредством гетерогенных каталитических реакций, включая риформинг метана паром и реакцию конверсии водяного газа. Полученный газообразный продукт автотермического риформинга имеет состав, близкий к предсказанному составу термодинамического равновесия. Фактический состав газообразного продукта автотермического риформинга совпадает с термодинамически равновесным составом с разницей менее 70°C. Это так называемая равновесная температура. Чтобы свести к минимуму количество СО<sub>2</sub>, образующегося в результате автотермического риформинга, количество пара в окислительном сырье для автотермического риформинга необходимо поддерживать на как можно более низком уровне, что по-прежнему приводит к получению газообразного продукта автотермического риформинга с низким содержанием сажи, состав которого близок к прогнозируемому равновесному составу. Как правило, общее отношение пара к углероду (моль/моль) в газосырьевой смеси для автотермического риформинга (окислитель + углеводород) должно составлять от 0,4 до 1,0, при оптимальном значении около 0,6.

Продукт автотермического риформинга покидает каталитическую зону автотермического риформинга при температуре более 800°C. Продукт автотермического риформинга стадии 21 охлаждается до более низких температур в утилизационном паровом котле ступени 22, где тепло передается для получения пара. Этот пар, а также пар более низкого давления, производимый реактором для получения жидкого топлива, можно применять для выработки электроэнергии.

Подходящие катализаторы автотермического риформинга для реакций в каталитической зоне обычно получают на основе никеля. Новый твердорастворный катализатор, описанный ранее, может быть применен в качестве катализатора автотермического риформинга. Другие подходящие катализаторы автотермического риформинга представляют собой никель на альфа-фазе оксида алюминия или магний-алюминиевой шпинели (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), которые применяют с промоторами из драгоценных металлов или без них, где промотор из драгоценных металлов содержит золото, платину, рений или рутений. Шпинели имеют более высокую температуру плавления и более высокую термическую прочность и стабильность, чем катализаторы на основе оксида алюминия.

Поток продуктов автотермического риформинга 23 можно смешивать с продуктом обратной конверсии водяного газа и применять в качестве сырья реактора для получения жидкого топлива. Это приводит к высокой степени превращения исходного диоксида углерода в углеводородные продукты от  $C_5$  до  $C_{24}$ .

- 5 В некоторых вариантах реализации газообразный продукт реакции получения жидкого топлива не подходит для прямой подачи в установку автотермического риформинга и должен подвергаться предварительному риформингу. В этих случаях газообразный продукт реакции получения жидкого топлива, содержащий непрореагировавший монооксид углерода, водород, углеводороды  $C_1$ – $C_4$  и  $CO_2$ , представляет собой
- 10 углеводородный сырьевой газ для установки предварительного риформинга. Чем выше содержание углеводородов и оксидов углерода в потоке, тем больше может потребоваться применение установки для предварительного риформинга вместо непосредственного применения в качестве исходного углеводородного сырья для автотермического риформинга. Установка для предварительного риформинга как правило представляет собой
- 15 адиабатический реактор. Адиабатическая установка предварительного риформинга превращает высшие углеводороды для предварительного риформинга в смесь метана, водяного пара, оксидов углерода и водорода, которые затем пригодны в качестве углеводородного сырья для автотермического риформинга. Одним из преимуществ применения установки для предварительного риформинга является то, что она
- 20 обеспечивает более высокий предварительный нагрев углеводородного сырья для автотермического риформинга, что может уменьшить количество кислорода, применяемого в установке для автотермического риформинга. В результате комплексный способ, как описано выше, приводит к высокой степени превращения диоксида углерода в углеводородные продукты  $C_5$ – $C_{24}$ , которые подходят в качестве топлива или химических
- 25 реагентов.

## **НЕКОТОРЫЕ ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ СПОСОБА**

Ниже приведены некоторые варианты реализации способов превращения диоксида углерода, воды и электроэнергии в высококачественные низкоуглеродные или

30 безуглеродные виды топлива и химических реагентов:

1. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии. Диоксид углерода улавливают из источника. Водород и диоксид углерода смешивают с

образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который обычно нагревают и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждаают, сжимают и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP») или иначе называемую ступень для синтеза углеводородов. Система для получения жидкого топлива превращает газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub>. При этом давление на стадии обратной конверсии водяного газа и давление на стадии синтеза углеводородов отличаются в пределах 1379 кПа (200 фунтов на квадратный дюйм), более предпочтительно в пределах 690 кПа (100 фунтов на квадратный дюйм) или еще более предпочтительно в пределах 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм).

2. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии. Диоксид углерода улавливают из источника. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который обычно нагревают и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>, монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR») для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»). Система для получения жидкого топлива превращает смешанные продукты обратной конверсии водяного газа и автотермического риформинга в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>4</sub>-C<sub>24</sub>.

3. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии. Диоксид углерода улавливают из источника. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа

«RWGS»), который обычно нагревают и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>, монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный катализатор на основе никеля для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»), которая содержит катализатор Фишера-Тропша или другой катализатор или катализаторы для получения углеводородов из синтез-газа. Система для получения жидкого топлива превращает смешанные продукты обратной конверсии водяного газа и автотермического риформинга в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub>.

4. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу, рис или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который обычно нагревают и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждают, сжимают и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»), которая содержит катализатор или другой катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Система для получения жидкого топлива превращает газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub>.

5. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу, рис или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который обычно нагревают и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>+ (например, метан), монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR») для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в каталитическую систему, в которой получают метанол.

6. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который обычно нагревают и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>+ (например, метан), монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный катализатор на основе никеля, для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или

неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в рамках способа для получения аммиака из синтез-газа.

7. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который обычно нагревают и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждают, сжимают и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»), которая содержит катализатор Фишера-Тропша, который в основном способствует получению парафина с углеводородами в диапазоне C<sub>5</sub>-C<sub>100+</sub>.

8. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который обычно нагревают и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит

- твердорастворный катализатор на основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Один или несколько углеводородов типа  $C_1-C_4$  (например, метан), монооксид
- 5 углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR») для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в рамках способа для получения аммиака.
- 10 9. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где
- 15 источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для
- 20 обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который обычно нагревают и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор, содержащий переходный металл. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший
- 25 диоксид углерода и воду. Один или несколько углеводородов типа  $C_1-C_4$  (например, метан), монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный катализатор, для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов
- 30 автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»), которая содержит катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Система для получения жидкого топлива превращает смешанные продукты обратной конверсии водяного газа и автотермического риформинга в

углеводородные продукты, где более 70 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub>.

10. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением  
5 щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого или низкоуглеродного источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола,  
10 который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, газоперерабатывающий завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C  
15 (1400°F), где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду.  
20 Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждают, сжимают и подают в систему для получения аммиака, метанола или жидких углеводородов.

11. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза,  
25 а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого или низкоуглеродного источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод,  
30 химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 538 °C (1000°F), где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в реактор обратной конверсии

водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> (например, метан), монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный катализатор на основе никеля, для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»), которая содержит катализатор для получения топлива, в котором применяют комбинацию никеля и кобальта. Система для получения жидкого топлива превращает смешанные продукты обратной конверсии водяного газа и автотермического риформинга в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub>.

12. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого или низкоуглеродного источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе переходного металла. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший

диоксид углерода и воду. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждают, сжимают и подают на химическое производство.

13. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением  
5 щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает  
10 кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических  
15 нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа и затем подают в реактор обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на  
20 основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> (например, метан), монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный  
25 катализатор на основе никеля, для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему, в которой применяют катализатор Фишера-Тропша для получения парафина на основе высших углеводородов в качестве  
30 основного продукта.

14. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной

энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждают, сжимают и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»), которая содержит катализатор Фишера-Тропша или другой катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Система для получения жидкого топлива превращает газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>4</sub>-C<sub>24</sub>.

15. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого или низкоуглеродного источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, газоперерабатывающий завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа

или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или  
5 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий  
10 монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>3</sub> (например, метан), монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»). Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в  
15 систему для получения метанола.

16. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной  
20 энергии в качестве возобновляемого или низкоуглеродного источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном  
25 разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч  
30 электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад

давления в реакторе составлял менее 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм) или менее 318 кПа (20 фунтов на квадратный дюйм). Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду.

5 Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждают, сжимают и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»), которая содержит катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Система для получения жидкого топлива превращает газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов  
10 представляют собой углеводороды типа C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub>.

17. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной  
15 энергии в качестве возобновляемого или низкоуглеродного источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном  
20 разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч  
25 электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе  
30 составлял менее 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм) или менее 138 кПа (20 фунтов на квадратный дюйм). Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>3</sub> (например, метан), монооксид углерода и водород подают в

установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный катализатор на основе никеля для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему для превращения синтез-газа, состоящую либо из способа синтеза метанола, способа получения аммиака, способа Фишера-Тропша для получения воска и других углеводородов, либо получения другого вида химических реагентов или топлива.

18. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого или низкоуглеродного источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе составлял менее 690 кПа (100 фунтов на квадратный дюйм) или менее 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм). Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной конверсии водяного газа составляет от 30 до 90 мольных % или от 50 до 70 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа

составляет от 1 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> или от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждают, сжимают и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»), которая содержит катализатор для получения углеводов из синтез-газа. Система для получения жидкого топлива превращает газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub>.

19. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого или низкоуглеродного источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, газоперерабатывающий завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 538 °C (1000°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе переходного металла. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе составлял менее 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм) или менее 138 кПа (20 фунтов на квадратный дюйм). Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной конверсии водяного газа составляет от 15 до 75 мольных % или от 30 до 70 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа составляет от 1 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> и более предпочтительно от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>. Один или несколько

углеводородов типа  $C_1$ - $C_4$  (например, метан), монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный катализатор на основе никеля, для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»), которая содержит катализатор Фишера-Тропша или другой катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Система для получения жидкого топлива превращает смешанные продукты обратной конверсии водяного газа и автотермического риформинга в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа  $C_4$ - $C_{24}$ .

20. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого или низкоуглеродного источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более  $760\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $1400^{\circ}\text{F}$ ) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее  $0,5\text{ МВт}\cdot\text{ч}$  электроэнергии/метрическую тонну,  $0,40\text{ МВт}\cdot\text{ч}$  электроэнергии/метрическую тонну или  $0,20\text{ МВт}\cdot\text{ч}$  электроэнергии/метрическую тонну  $\text{CO}_2$  в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе составлял менее  $345\text{ кПа}$  (50 фунтов на квадратный дюйм) или менее  $138\text{ кПа}$  (20 фунтов на квадратный дюйм). Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду.

Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной конверсии водяного газа составляет от 15 до 75 мольных % или от 30 до 70 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа составляет от 1 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> и более предпочтительно от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>.

5 Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»), которая содержит катализатор Фишера-Тропша или другой катализатор для получения углеводов из синтез-газа. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа  
10 охлаждаются, сжимают и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP») вместе с рециркулируемым синтез-газом, который содержит катализатор для получения углеводов из синтез-газа. Реактор представляет собой многотрубчатую реакторную систему с неподвижным слоем, где диаметр каждой трубы реактора составляет от 13 мм до 26 мм, а длина трубы реактора превышает 6 метров или 10 метров.

15 21. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из  
20 источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для  
25 обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло  
30 не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе переходного металла. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород,

непрореагировавший диоксид углерода и воду. Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной конверсии водяного газа составляет от 15 до 90 мольных % или от 30 до 70 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа составляет от 1 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> и более  
5 предпочтительно от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> (например, метан), монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный катализатор на основе никеля, для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком  
10 продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP») вместе с рециркулируемым синтез-газом, который содержит катализатор Фишера-Тропша или другой катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Реактор представляет собой многотрубчатую реакторную систему с неподвижным слоем, где диаметр каждой трубы реактора составляет от 13 мм до  
15 26 мм, а длина трубы реактора превышает 6 метров или 10 метров. Система для получения жидкого топлива превращает смешанные продукты обратной конверсии водяного газа и автотермического риформинга в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub>.

23. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой  
20 электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака  
25 для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до  
30 температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в

адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе составлял менее 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм) или менее 138 кПа (20 фунтов на квадратный дюйм). Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной конверсии водяного газа составляет от 15 до 90 мольных % или от 40 до 80 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа составляет от 1 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> и более предпочтительно от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждают, сжимают и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP») вместе с рециркулируемым синтез-газом, который содержит катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Реактор представляет собой многотрубчатую реакторную систему с неподвижным слоем, где диаметр каждой трубы реактора составляет от 13 мм до 26 мм, а длина трубы реактора превышает 6 метров или 10 метров. Система для получения жидкого топлива превращает газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>4</sub>-C<sub>24</sub>. Менее 2% монооксида углерода в сырье реактора для получения жидкого топлива превращается в диоксид углерода в реакторе для получения жидкого топлива, и менее 10 мас.% или менее 4 мас.% углеводородной фракции полученного жидкого топлива имеет углеродное число более 24.

24. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до

температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло

5 не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе составлял

10 менее 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм) или менее 138 кПа (20 фунтов на квадратный дюйм). Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной

15 конверсии водяного газа составляет от 15 до 75 мольных % или от 30 до 70 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа составляет от 1 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> и более предпочтительно от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> (например, метан), монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный катализатор на основе никеля, для получения потока продуктов автотермического

20 риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP») вместе с рециркулируемым синтез-газом, которая содержит катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Реактор представляет собой многотрубчатую

25 реакторную систему с неподвижным слоем, где диаметр каждой трубы реактора составляет от 13 мм до 26 мм, а длина трубы реактора превышает 6 метров или 10 метров. Система для получения жидкого топлива превращает смешанные продукты обратной конверсии водяного газа и автотермического риформинга в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>4</sub>-C<sub>24</sub>. Менее 2%

30 монооксида углерода в сырье реактора для получения жидкого топлива превращается в диоксид углерода в реакторе для получения жидкого топлива, и менее 10 мас.% или менее 4 мас.% углеводородной фракции полученного жидкого топлива имеет углеродное число более 24.

25. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе составлял менее 690 кПа (100 фунтов на квадратный дюйм) или менее. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной конверсии водяного газа составляет от 15 до 75 мольных % или от 30 до 70 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа составляет от 1 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> и более предпочтительно от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждают, сжимают и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP») вместе с рециркулируемым синтез-газом, который содержит катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Носитель катализатора для получения жидкого топлива имеет диаметр пор более 8 нанометров (нм), средний эффективный радиус окатышей менее 60 микрометров, прочность на раздавливание более 1,36 кг/мм (3 фунтов/мм) и площадь поверхности по БЭТ более 80 м<sup>2</sup>/г, более 90 м<sup>2</sup>/г, более 100 м<sup>2</sup>/г, более 125 м<sup>2</sup>/г или более 150 м<sup>2</sup>/г; и дисперсность металла катализатора на носителе составляет от 2% до 4% или около 3%. Реактор представляет собой многотрубчатую реакторную систему с неподвижным слоем, где

диаметр каждой трубы реактора составляет от 13 мм до 26 мм, а длина трубы реактора превышает 6 метров или 10 метров. Система для получения жидкого топлива превращает газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>4</sub>-C<sub>24</sub>. Менее 2% монооксида углерода в сырье реактора для получения жидкого топлива превращается в диоксид углерода в реакторе для получения жидкого топлива, и менее 10 мас.% или менее 4 мас.% углеводородной фракции полученного жидкого топлива имеет углеродное число более 24.

26. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе составлял менее 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм) или менее 138 кПа (20 фунтов на квадратный дюйм). Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной конверсии водяного газа составляет от 15 до 90 мольных % или от 50 до 85 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа составляет от 1

- 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> и более предпочтительно от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>, монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный катализатор на основе никеля для получения потока продуктов автотермического риформинга.
- 5 Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP»). Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и
- 10 подают в систему вместе с катализатором для получения углеводородов из синтез-газа. Носитель катализатора для получения жидкого топлива имеет диаметр пор более 8 нанометров (нм), средний эффективный радиус окатышей менее 60 микрометров, прочность на раздавливание более 1,36 кг/мм (3 фунтов/мм) и площадь поверхности по БЭТ более 80 м<sup>2</sup>/г, более 90 м<sup>2</sup>/г, более 100 м<sup>2</sup>/г, более 125 м<sup>2</sup>/г или более 150 м<sup>2</sup>/г; и дисперсность
- 15 металла катализатора на носителе составляет от 2% до 4% или около 3%. Реактор представляет собой многотрубчатую реакторную систему с неподвижным слоем, где диаметр каждой трубы реактора составляет от 13 мм до 26 мм, а длина трубы реактора превышает 6 метров или 10 метров. Система для получения жидкого топлива превращает смешанные продукты обратной конверсии водяного газа и автотермического риформинга в
- 20 углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>4</sub>-C<sub>24</sub>. Менее 2% монооксида углерода в сырье реактора для получения жидкого топлива превращается в диоксид углерода в реакторе для получения жидкого топлива, и менее 10 мас.% или менее 4 мас.% углеводородной фракции полученного жидкого топлива имеет углеродное число более 24.
- 25 27. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из
- 30 источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для

обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе составлял менее 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм) или менее 138 кПа (20 фунтов на квадратный дюйм). Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной конверсии водяного газа составляет от 15 до 75 мольных % или от 30 до 70 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа составляет от 1 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> и более предпочтительно от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждают, сжимают и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP») вместе с рециркулируемым синтез-газом, который содержит катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Носитель катализатора для получения жидкого топлива имеет диаметр пор более 8 нанометров (нм), средний эффективный радиус окатышей менее 60 микрометров, прочность на раздавливание более 1,36 кг/мм (3 фунтов/мм) и площадь поверхности по БЭТ более 80 м<sup>2</sup>/г, более 90 м<sup>2</sup>/г, более 100 м<sup>2</sup>/г, более 125 м<sup>2</sup>/г или более 150 м<sup>2</sup>/г; и дисперсность металла катализатора на носителе составляет от 2% до 4% или около 3%. Реактор представляет собой многотрубчатую реакторную систему с неподвижным слоем, где диаметр каждой трубы реактора составляет от 13 мм до 26 мм, а длина трубы реактора превышает 6 метров или 10 метров. Система для получения жидкого топлива превращает газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>4</sub>-C<sub>24</sub>. Менее 2% монооксида углерода в сырье реактора для получения жидкого топлива превращается в диоксид углерода в реакторе для получения жидкого топлива, и менее 10 мас.% или менее 4 мас.% углеводородной фракции полученного жидкого топлива имеет углеродное число более 24. Степень превращения CO в реакторе для получения жидкого топлива поддерживают на уровне от 30 до 80 мольных % превращения CO за один цикл, а

селективность по углерода в отношении к СО сведена к минимуму до менее чем 4% или менее чем 1% от превращенного СО.

28. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением  
5 щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает  
10 кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °С (1400°F) с применением излучающих электрических  
15 нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну СО<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа,  
20 который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе составлял менее 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм) или менее 138 кПа (20 фунтов на квадратный дюйм). Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид  
25 углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной конверсии водяного газа составляет от 15 до 90 мольных % или от 60 до 90 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа составляет от 1 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> и более предпочтительно от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>. Один или несколько  
30 углеводородов типа С<sub>1</sub>-С<sub>3</sub> (например, метан), монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный катализатор на основе никеля для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга

(очищенным или неочищенным) и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP») вместе с рециркулируемым синтез-газом, который содержит катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Носитель катализатора для получения жидкого топлива имеет диаметр пор более 8 нанометров (нм), средний эффективный радиус окатышей менее 60 микрометров, прочность на раздавливание более 1,36 кг/мм (3 фунтов/мм) и площадь поверхности по БЭТ более 80 м<sup>2</sup>/г, более 90 м<sup>2</sup>/г, более 100 м<sup>2</sup>/г, более 125 м<sup>2</sup>/г или более 150 м<sup>2</sup>/г; и дисперсность металла катализатора на носителе составляет от 2% до 4% или около 3%. Реактор представляет собой многотрубчатую реакторную систему с неподвижным слоем, где диаметр каждой трубы реактора составляет от 13 мм до 26 мм, а длина трубы реактора превышает 6 метров или 10 метров. Система для получения жидкого топлива превращает смешанные продукты обратной конверсии водяного газа и автотермического риформинга в углеводородные продукты, где более 50 процентов продуктов представляют собой углеводороды типа C<sub>4</sub>-C<sub>24</sub>. Менее 2% монооксида углерода в сырье реактора для получения жидкого топлива превращается в диоксид углерода в реакторе для получения жидкого топлива, и менее 10 мас.% или менее 4 мас.% углеводородной фракции полученного жидкого топлива имеет углеродное число более 24. Степень превращения CO в реакторе для получения жидкого топлива поддерживают на уровне от 30 до 80 мольных % превращения CO за один цикл, а селективность по углерода в отношении к CO сведена к минимуму до менее чем 4% или менее чем 1% от превращенного CO.

29. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод, электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую

тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, чтобы перепад давления в реакторе составлял менее 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм) или менее 138 кПа (20 фунтов на квадратный дюйм). Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной конверсии водяного газа составляет от 15 до 90 мольных % или от 30 до 70 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа составляет от 1 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> и более предпочтительно от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа охлаждают, сжимают и подают в систему для получения жидкого топлива («LFP») вместе с рециркулируемым синтез-газом, который содержит катализатор для получения углеводородов из синтез-газа. Углеводороды, полученные в рамках данного способа, или их часть применяют в качестве топлива; данное топливо имеет процент сокращения выбросов парниковых газов в течение жизненного цикла по сравнению со средними выбросами парниковых газов в течение жизненного цикла для нефтяного дизельного топлива (полученного путем фракционной перегонки сырой нефти при температуре от 200°C до 350°C при атмосферном давлении, что приводит к смеси углеродных цепей, которые обычно содержат от 9 до 25 атомов углерода на молекулу) по меньшей мере 10 процентов, по меньшей мере 20 процентов, по меньшей мере 30 процентов, по меньшей мере 40 процентов, по меньшей мере 50 процентов, по меньшей мере 60 процентов, по меньшей мере 70 процентов, по меньшей мере 80 процентов или по меньшей мере 90 процентов.

30. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, где электролизер электролизной системы работает с применением щелочного электролиза, мембранного электролиза или высокотемпературного электролиза, а возобновляемую электроэнергию получают из ветра, солнца, геотермальной или ядерной энергии в качестве возобновляемого источника энергии. Диоксид углерода улавливают из источника, где источником является промышленное предприятие по производству аммиака для удобрений, цементный завод, завод по производству этанола, который перерабатывает кукурузу или пшеницу в этанол, нефтеперерабатывающий завод, химический завод,

электростанция, вырабатывающая электроэнергию, при анаэробном разложении или из атмосферы. Водород и диоксид углерода смешивают с образованием потока (сырье для обратной конверсии водяного газа или сырье типа «RWGS»), который нагревают до температуры на входе более 760 °C (1400°F) с применением излучающих электрических нагревательных элементов, потребление электроэнергии которых составляет менее 0,5 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну, 0,40 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну или 0,20 МВт-ч электроэнергии/метрическую тонну CO<sub>2</sub> в сырьевом газе, где тепло не обеспечено прямым сжиганием углеродсодержащего газа, и затем подают в адиабатический или изотермический корпус реактора обратной конверсии водяного газа, который содержит твердорастворный катализатор на основе никеля. Реактор обратной конверсии водяного газа превращает исходное сырье в газообразный продукт обратной конверсии водяного газа, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Степень превращения диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в корпусе реактора обратной конверсии водяного газа составляет от 15 до 75 мольных % или от 30 до 70 мольных %, а среднечасовая скорость подачи сырья обратной конверсии водяного газа составляет от 1 000 до 50 000 ч<sup>-1</sup> и более предпочтительно от 5 000 до 30 000 ч<sup>-1</sup>. Один или несколько углеводородов типа C<sub>1</sub>-C<sub>3</sub> (например, метан), монооксид углерода и водород подают в установку автотермического риформинга («ATR»), которая содержит твердорастворный катализатор для получения потока продуктов автотермического риформинга. Газообразный продукт обратной конверсии водяного газа (очищенный или неочищенный) смешивают с потоком продуктов автотермического риформинга (очищенным или неочищенным) и подают в систему для получения топлива или химических реагентов. Топливо или химические вещества, полученные в рамках данного способа, или их часть, имеют процент сокращения выбросов парниковых газов в течение жизненного цикла по сравнению со средними выбросами парниковых газов в течение жизненного цикла для продуктов, полученных из нефти, по меньшей мере 10 процентов, по меньшей мере 20 процентов, по меньшей мере 30 процентов, по меньшей мере 40 процентов, по меньшей мере 50 процентов, по меньшей мере 60 процентов, по меньшей мере 70 процентов, по меньшей мере 80 процентов или по меньшей мере 90 процентов.

## **ПРИМЕРЫ**

На **Фигурах 1–2** показан комплексный способ превращения диоксида углерода, воды и электроэнергии в возобновляемые виды топлива и химических реагентов.

Входные показатели способа составляли: 1) 1919 метрических тонн/сутки (MT/D) диоксида углерода; 1214 MT/сутки пресной воды; и 3) 721,5 МВт возобновляемой электроэнергии.

- 5 На **Фигуре 3** пресную воду (поток 25) смешивали с 1497 MT/сутки технической (или рециркулируемой) воды (поток 26) из способа. Подача пресной и рециркулируемой воды в электролизер составляла 2711 MT/сутки суммарного количества воды. Ступень щелочного электролизера 27 работала при давлении 414 кПа (60 фунтов на квадратный дюйм) и температуре 21 °C (70°F). Продукт электролизера представлял собой 303 MT/сутки
- 10 водорода (поток 28) и 2408 MT/сутки кислорода (поток 29). Электролизер потреблял 648,1 МВт электроэнергии при потреблении энергии электролизером 51,3 МВт-ч/MT полученного водорода. Водород (**Фигура 1**, поток 1, 303 MT/сутки) смешивали с диоксидом углерода (поток 2) для получения сырья обратной конверсии водяного газа (поток 3). Диоксид углерода (поток 2) представлял собой смесь только что полученного
- 15 диоксида углерода (поток 2, 1919 MT/сутки) и рециркулируемого диоксида углерода (734 MT/сутки). Молярное отношение  $H_2$  к  $CO_2$  в сырье обратной конверсии водяного газа составляло 2,5 и находилось в заданном диапазоне. Исходное сырье обратной конверсии водяного газа (поток 3) находилось под давлением 414 кПа (60 фунтов на квадратный дюйм) и при температуре 816 °C (66°F). Поток 3 нагревали посредством косвенного теплообмена
- 20 в двух отдельных теплообменниках на ступени 4 для повышения температуры до 816 °C (984°F) (поток 5). Электрическую излучающую печь применяли для нагрева газов до 871 °C (1600°F). Электрическая излучающая печь потребляла 30,7 МВт электроэнергии и потребляла 0,278 МВт-ч/MT  $CO_2$  в потоке продуктов или конечном потоке сырья обратной конверсии водяного газа (поток 5). Реактор обратной конверсии водяного газа (ступень 6)
- 25 представлял собой корпус с огнеупорной футеровкой или группу параллельных реакторов. Реактор обратной конверсии водяного газа был заполнен катализатором. Катализатор обратной конверсии водяного газа, применённый в данном примере, представлял собой твердорастворный катализатор, в котором были применены только переходные металлы. Давление на выходе из реактора обратной конверсии водяного газа было на 69 кПа (10
- 30 фунтов на квадратный дюйм) ниже, чем давление на входе в 379 кПа (55 фунтов на квадратный дюйм). Температура на выходе из реактора для обратной конверсии водяного газа на 67°C (152°F) была ниже, чем температура на входе, равная 871 °C (1600°F). Степень превращения  $CO_2$  составляла 70 мол.%. 92 мольных % превращенного  $CO_2$  были

превращены в СО (селективность по отношению к СО, равная 92%), а 8% превращенного СО<sub>2</sub> были превращены в метан посредством побочной реакции.

Газообразный продукт реактора обратной конверсии водяного газа (поток 7) в этом примере повторно нагревали обратно до 871 °С (1600°F) в необязательном 2-м нагревательном элементе и слое катализатора обратной конверсии водяного газа (ступени 9 и 10 соответственно). Данная ступень нагревательного элемента 9 представляла собой излучающую печь с электрическим нагревом. Ступень 9 потребляла 7,3 МВт электроэнергии при потреблении электроэнергии 0,22 МВт-ч/МТ СО<sub>2</sub> в сырье. В данном примере повторно нагретый газ затем подавали во второй реактор обратной конверсии водяного газа (ступень 10). Перепад давления во втором реакторе обратной конверсии водяного газа составлял 69 кПа (10 фунтов на квадратный дюйм), а падение температуры составляло 42°C (108°F). Степень превращения СО<sub>2</sub> составляла 7 мол. %.

На выходе из второго реактора обратной конверсии водяного газа имели смесь синтез-газа с приблизительным объемным составом: 49 мол.% Н<sub>2</sub>, 20 мол.% СО, 1 мол.% метана, 8 мол.% СО<sub>2</sub>, 22 мол.% воды при температуре 811 °С (1492°F). Этот пар охлаждали до 680 °С (1256°F) посредством косвенного теплообмена (ступень 11) и смешивали с синтез-газом, полученным в установке автотермического риформинга (ATR) для образования газосырьевой смеси, охлаждающей синтез-газ и сжатие синтез-газа в рамках способа.

На **Фигуре 2** показана часть способа автотермического риформинга. Установка автотермического риформинга содержала углеводородное сырье автотермического риформинга (поток 18), которое содержало остаточные газы из установки части способа получения жидкого топлива с расходом 855 МТ/сутки и молярным составом 21% водорода, 12% СО, 42% метана, 1% этана, 2% пропана, 1% бутана, 1% пентана, 1% гексана и 18% диоксида углерода. Окислительное сырье для автотермического риформинга (поток 29) представляло собой 335 МТ/сутки кислорода, который получали с помощью электролизера. Углеводородное сырье для автотермического риформинга смешивали с 255 МТ/сутки перегретого пара при температуре 816 °С (343°F). Пар предварительно подавали в горелку для автотермического риформинга, в то время как окислитель смешивали с углеводородным сырьем для автотермического риформинга. Данный поток нагревали за счет перекрестного теплообмена продуктов автотермического риформинга, этот поток и кислород сжигали в горелке для автотермического риформинга, а продукты сгорания проходили через слой катализатора автотермического риформинга и покидали установку автотермического риформинга при равновесном предсказанном составе или близком к нему

составе при температуре на выходе 816 °C (1832°F) (поток 21). Установка автотермического риформинга работала при соотношении подаваемого пара к углероду, равном 0,53, где отношение представляет собой моли пара к молям углерода из любого источника сырья (включая CO<sub>2</sub> и CO). Образование сажи и углерода было сведено к минимуму за счет применения катализатора из никель-магниевого шпинели с золотым промотором и низкого рабочего давления 400 кПа (58 фунтов на квадратный дюйм). Молярный состав потока продуктов автотермического риформинга (поток 21) представлял собой 46% водорода, 27% CO, 7% диоксида углерода и 20% воды. Отношение водорода к монооксиду углерода в синтез-газе составляло 1,7. Поток продуктов автотермического риформинга охлаждали посредством перекрестного обмена до 816 °C (1251°F).

Поток продуктов из установки автотермического риформинга представлял собой смешанный синтез-газ из реакторной системы обратной конверсии водяного газа и его подавали на ступень охлаждения и сжатия синтез-газа установки. Объединенный синтез-газ охлаждали с помощью паровых котлов. Часть пара из паровой системы применяли для смешивания с углеводородным сырьем автотермического риформинга. Поток также охлаждали с помощью вентилятора воздухоохладителя. Воду удаляли из потока в виде конденсата синтез-газа. Трехступенчатое сжатие применяли для повышения давления синтез-газа до 2344 кПа (340 фунтов на квадратный дюйм) и температуры 170 °C (338°F). Синтез-газ выходил в виде синтез-газа для получения жидкого топлива со скоростью 3093 МТ/сутки с молярным составом примерно 61% водорода, 28% монооксида углерода, 10% диоксида углерода и 1% воды. Для сжатия синтез-газа требовалась электроэнергия. Потребление электроэнергии компрессорами синтез-газа составляло 34,0 МВт.

На **Фигуре 2** показана часть способа получения жидкого топлива. Поток сырьевого синтез-газа 23 (3093 МТ/сутки) смешивали с рециркулируемым потоком для получения жидкого топлива (поток 13) со скоростью потока 19185 МТ/сутки. Молярный состав рециркулируемого газа представлял собой около 13% водорода, 7% монооксида углерода, 26% метана, 48% диоксида углерода, 1% воды, 1% этана, 2% пропана, 1% бутана и 1% пентана. Состав рециркулируемого газа регулировали таким образом, чтобы объединенный сырьевой газ имел правильный состав, идеально подходящий для способа получения жидкого топлива с применением предпочтительного катализатора для получения жидкого топлива. Сырье реактора для получения жидкого топлива (поток 14) имело приблизительный молярный состав: 26 % водорода, 13 % CO, 19 % метана, 1 % пропана, 1 % бутана, 1 % пентана, 38 % диоксида углерода и 1 % воды, а скорость потока составляла около 22 277 МТ/сутки. Соотношение H<sub>2</sub>/CO в сырье для получения жидкого топлива

составляло 2,0. За счет непрямого теплообмена температура сырья для получения жидкого топлива повышалась до 816 °С (380°F) при давлении (330 фунтов на квадратный дюйм). В некоторых случаях: реакторы для получения жидкого топлива представляли собой 10 реакторов, работающих параллельно; высота реакторов по касательной составляла 30 метров; каждый реактор представлял собой корпус с 5000 трубами внутри; внешний диаметр труб составлял около 19 мм.

Реакция синтез-газа с образованием углеводородов являлась экзотермической. Пар применяли вне труб реактора для получения жидкого топлива для контроля температуры. Таким образом, реакторы для получения жидкого топлива производили пар, который применяли для выработки электроэнергии. Пар для получения жидкого топлива применяли для выработки 8,7 МВт электроэнергии.

Предпочтительная рабочая температура реактора для получения жидкого топлива составляла 210 °С (410°F).

В некоторых случаях: катализатор для получения жидкого топлива представлял собой четырехлепестковый катализатор со средним радиусом частиц 50 микрометров, диаметром пор 9 нм и площадью поверхности 140 м<sup>2</sup>/г; активный металл представлял собой кобальт с платиновым или палладиевым промотором.

Диаметр частиц катализатора, загрузка катализатора и скорость подачи сырья для получения жидкого топлива в трубы реактора для получения жидкого топлива регулировали таким образом, чтобы падение давления в трубах реактора и в реакторе для получения жидкого топлива было минимальным. В этом примере перепад давления поддерживали на уровне 138 кПа (20 фунтов на квадратный дюйм).

Степень превращения СО в реакторах для получения жидкого топлива составляла 55 мол.%. Селективность по углероду в отношении C<sub>5</sub>-C<sub>24</sub> составляла 73,5%, где селективность по углероду определяли как:

$$C5 - C24 \text{ Селективность по углероду} = \frac{1}{n_{CO \text{ превращенный}}} \sum_{i=4}^{24} in_i$$

Где  $n_{CO \text{ превращенный}}$  представлял собой молярный расход СО, который был превращен в реакторе для получения жидкого топлива;  $n_i$  представлял собой молярный расход углеводорода с углеродным номером  $i$ , который образовывался в реакторе для получения жидкого топлива. Селективность по углероду в отношении диоксида углерода была низкая

и составляла 0,38%, что указывает на то, что очень небольшая часть СО, превращенного в реакторе для получения жидкого топлива, была превращена в диоксид углерода.

$$CO_2 \text{ Селективность по углероду} = \frac{1}{n_{CO} \text{ превращенный}} n_{CO_2}$$

5 Где  $n_{CO_2}$  представлял собой молярный расход  $CO_2$ , который был получен в реакторе для получения жидкого топлива. Это было крайне желательно для способа получения безуглеродных видов топлива и химических реагентов, который начинался с применения диоксида углерода в качестве исходного сырья.

10 Продукты поступали из нижней части реактора. Существовала вероятность образования тяжелых углеводороды ( $C_{24+}$ ), поэтому на выходе из реактора эти продукты могли быть удалены. Если реактор для получения жидкого топлива работал с катализатором в правильных условиях, тяжелых продуктов было либо мало, либо они совсем отсутствовали. Первичными продуктами способа получения жидкого топлива являлся поток 16. Продукт способа получения жидкого топлива дополнительно охлаждали до 816 °С (333°F) на ступени 17 и он становился потоком номер 24, который покидал систему на **Фигуре 2**.

15 Поток продуктов способа получения жидкого топлива охлаждали, продукты конденсировали, а затем продукты способа получения жидкого топлива разделяли на три потока через сепараторы на ступени 17. Очищенную воду (поток 26), полученную в способе получения жидкого топлива, возвращали в электролизер, и она могла потребовать очистки или предварительной обработки. Легкие газообразные продукты реактора для получения жидкого топлива попадали в потоки 13 и 18, которые были рециркулированы в сырье реактора для получения жидкого топлива и автотермического риформинга. Необязательно, прежде чем этот поток был рециркулирован, он мог быть дополнительно разделен на два потока с помощью системы разделения  $CO_2$ . Обогащенный  $CO_2$  поток мог быть рециркулирован обратно в сырье реактора обратной конверсии водяного газа.  $CO$ ,  $H_2$  и  
25 легкие углеводороды, оставшиеся в этом потоке, были рециркулированы обратно в устройство автотермического риформинга.

Продукт способа получения жидкого топлива, который содержал потоки углеводородов типа  $C_4$ - $C_{24}$ , разделяли на два потока: на смесь бензина и дизельное топливо. Продукты также могли подвергаться дальнейшей обработке.

30 В рамках способа, приведенного в качестве примера, было получено 1669 баррелей/сутки (баррелей в сутки) смеси лигроина/бензина и 3387 баррелей/сутки дизельного топлива.

Продукты способа получения жидкого топлива могли быть дополнительно фракционированы и переработаны для получения специализированных химических реагентов, включая растворители, н-парафины, олефины и другие.

В **Таблице 1** приведены входные данные для примера. МТ С/сутки представляло собой количество метрических тонн углерода в сутки на входе. МТ Н/сутки представляло собой метрические тонны водорода на входе. Они важны для расчетов выхода углерода и водорода.

**Таблица 1: Пример****Входные данные**

| На входе        | <u>МТ/сутки</u> | <u>МВт</u> | <u>МТ С/сутки</u> | <u>МТ Н/сутки</u> |
|-----------------|-----------------|------------|-------------------|-------------------|
| СО <sub>2</sub> | 1915            |            | 522,3             | 0                 |
| Вода (Пресная)  | 1212            |            | 0                 | 134,7             |
| Электроэнергия  |                 | 721,5      |                   |                   |

В **Таблице 2** приведены выходные данные для примера.

**Таблица 2: Пример****Выходные данные**

| На выходе           | <u>баррелей/сутки</u> | <u>МТ/сутки</u> | <u>МТ С/сутки</u> | <u>МТ Н/сутки</u> |
|---------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| Компоненты смешения |                       |                 |                   |                   |
| бензинов            | 1669                  | 181             | 154,4             | 26,8              |
| Дизельное топливо   | 3387                  | 412             | 350,9             | 60,8              |
| Совокупный продукт  | 5056                  | 593             | 505,3             | 87,6              |

В **Таблице 3** вычислены некоторые полезные показатели для примера способа.

**Таблица 3: Пример показателей  
производительности**

|                                   |      |                |
|-----------------------------------|------|----------------|
| Выход электроэнергии и<br>топлива | 3,42 | МВт-ч/баррелей |
|-----------------------------------|------|----------------|

Выход углерода                      96,8%      углерод в продукте из сырья CO<sub>2</sub>

Пример способа и все способы по изобретению имели выход углерода более 70% и предпочтительно более 85%. Для получения такого высокого выхода углерода необходим общий комплексный способ, а также применение раскрытого катализатора обратной конверсии водяного газа и раскрытого катализатора получения жидкого топлива.

**ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ**

1. Комплексный способ превращения потока сырья, содержащего диоксид углерода, в поток продуктов, содержащих углеводороды, включающий:

а. стадию электролиза, на которой поток сырья для электролизера, содержащий воду, превращают в поток продуктов электролизера, содержащий водород и кислород, где по меньшей мере часть электроэнергии, применяемой на стадии электролиза, поступает из возобновляемых или низкоуглеродных источников;

б. стадию обратной конверсии водяного газа, на которой по меньшей мере часть водорода из потока продуктов электролизера взаимодействует с потоком, содержащим диоксид углерода, с получением потока продуктов обратной конверсии водяного газа, содержащего монооксид углерода;

в. стадию синтеза углеводородов, на которой по меньшей мере часть водорода из потока продуктов электролизера вводят в реакцию с потоком, содержащим по меньшей мере часть потока продуктов обратной конверсии водяного газа, с получением потока продуктов синтеза углеводородов, содержащего углеводороды;

г. стадию автотермического риформинга, на которой по меньшей мере часть кислорода, полученного с помощью электролиза, реагирует с потоком или потоками, содержащими а) непрореагировавшие реагенты со стадии синтеза углеводородов и б) продукты со стадии синтеза углеводородов, которые не являются углеводородами длиной от 5 до 24 атомов углерода.

2. Способ по п.1, в котором давление на стадии обратной конверсии водяного газа и давление на стадии синтеза углеводородов соответствуют давлениям, отличающимся в пределах 345 кПа (50 фунтов на квадратный дюйм).

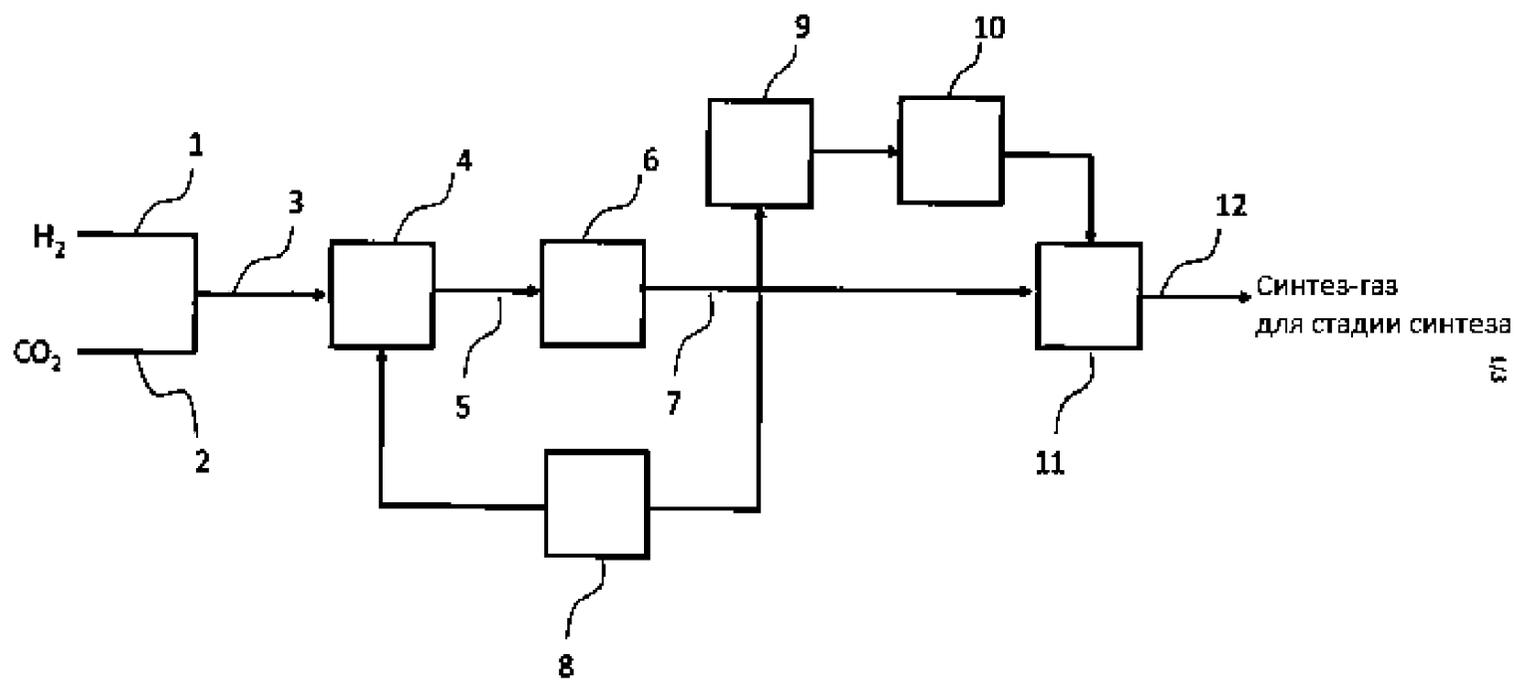
3. Способ по п.1, в котором исходное сырье реактора конверсии водяного газа нагревают в электрической излучающей печи по меньшей мере до 816 °C (1500°F), а корпус реактора представляет собой адиабатический реактор, где температура на выходе по меньшей мере на 38 °C (100°F) меньше, чем температура на входе в реактор.

4. Способ по п.3, в котором исходное сырье реактора конверсии водяного газа имеет такой состав, что молярное отношение водорода к диоксиду углерода составляет от 2,5 до 3,5.

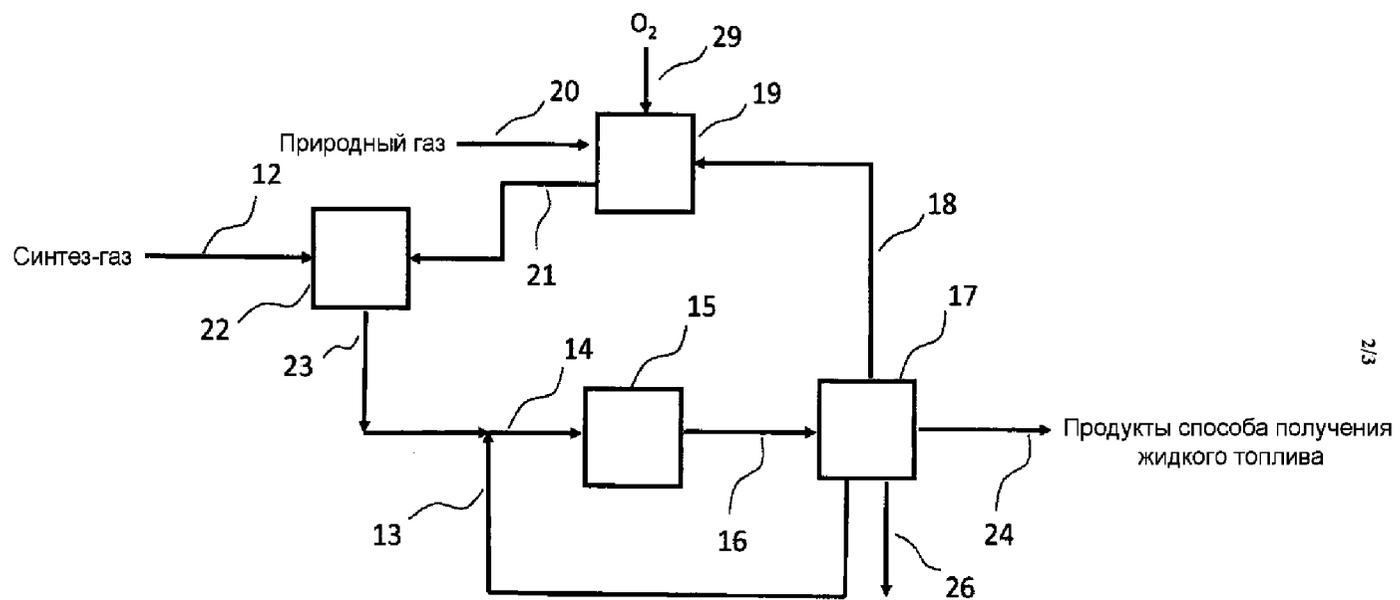
5. Способ по п.1, в котором исходное сырье для синтеза углеводородов имеет молярное отношение водорода к монооксиду углерода от 1,90 до 2,20, катализатор для синтеза углеводородов содержит кобальт, селективность по  $C_4-C_{24}$  превышает 70%, и где количество монооксида углерода, превращенного в продукты тяжелее  $C_{24}$ , составляет менее 10%.
6. Способ по п.1, в котором стадия автотермического риформинга включает пар в качестве исходного сырья, где отношение пара к углероду составляет 0,40-1,00.
7. Способ по п.6, в котором катализатор автотермического риформинга представляет собой твердорастворный катализатор.
8. Способ по п.1, в котором один из сырьевых материалов для стадии автотермического риформинга содержит природный газ.
9. Способ по п.1, в котором потребление электроэнергии в излучающей печи составляет менее 0,5 МВт-ч (мегаватт-час) электроэнергии/метрическую тонну (МТ)  $CO_2$  в сырьевом газе.
10. Способ по п.1, в котором излучающие элементы могут быть разделены на зоны для создания управляемого профиля распределения нагрева реактора обратной конверсии водяного газа.
11. Комплексный способ превращения потока сырья, содержащего диоксид углерода, в поток продуктов, содержащий углеводороды, включающий:
- a. стадию электролиза, на которой поток сырья электролизера, содержащий воду, превращают в поток продуктов электролизера, содержащий водород и кислород, при этом по меньшей мере часть электроэнергии, применяемой на стадии электролиза, поступает из возобновляемых источников;
- b. стадию обратной конверсии водяного газа, на которой по меньшей мере часть водорода из потока продуктов электролизера взаимодействует с потоком, содержащим диоксид углерода, с получением потока продуктов обратной конверсии водяного газа, содержащего монооксид углерода;
- c. стадию химического синтеза, на которой по меньшей мере часть водорода из потока продуктов электролизера вводят в реакцию с потоком, содержащим по меньшей мере часть потока продуктов обратной конверсии водяного газа, с получением химических реагентов;

d. стадию автотермического риформинга, на которой по меньшей мере часть кислорода, полученного с помощью электролиза, реагирует с потоком или потоками, содержащими а) непрореагировавшие реагенты со стадии химического синтеза.

- 5 12. Способ по п.11, в котором химические реагенты, полученные как часть способа, содержат метанол.
13. Способ по п.11, в котором химические реагенты, полученные как часть способа, содержат растворители.
14. Способ по п.11, в котором химические реагенты, полученные как часть способа, содержат олефины.
- 10 15. Способ по п.11, в котором химические реагенты, полученные как часть способа, содержат n-парафины.
16. Способ по п.12, в котором помимо химических реагентов получают топливо.
17. Способ по п.13, в котором помимо химических реагентов получают топливо.
18. Способ по п.14, в котором помимо химических реагентов получают топливо.
- 15 19. Способ по п.15, в котором помимо химических реагентов получают топливо.

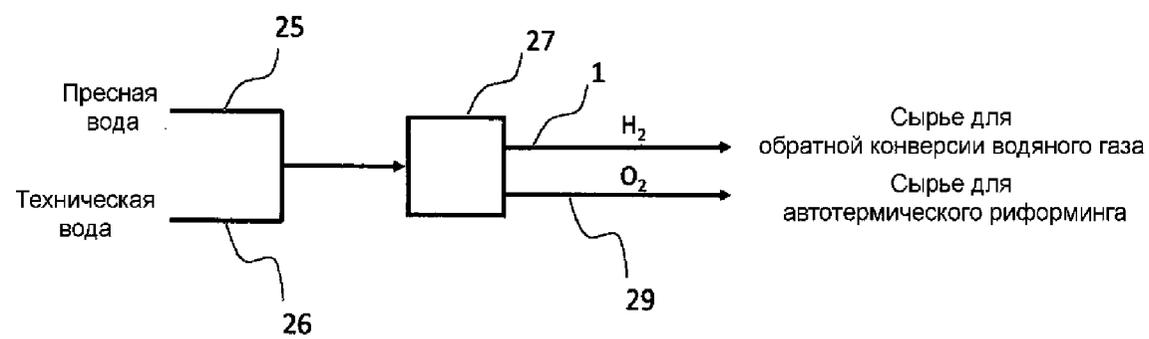


ФИГУРА 1



2/3

ФИГУРА 2



ФИГУРА 3