

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(21) 202393232 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2024.03.22

(51) Int. Cl. C01B 3/12 (2006.01)
B01J 8/06 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2022.06.02

(54) ТЕПЛООБМЕННЫЙ РЕАКТОР С УМЕНЬШЕННЫМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЗАПЫЛИВАНИЕМ

(31) 21177657.0

(32) 2021.06.03

(33) EP

(86) PCT/EP2022/065067

(87) WO 2022/253963 2022.12.08

(71) Заявитель:

ТОПСЕЭ А/С (DK)

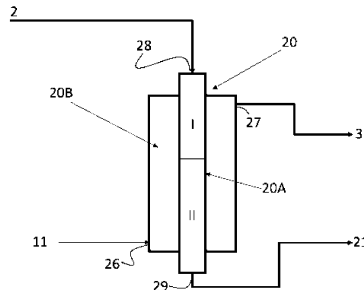
(72) Изобретатель:

Мортенсен Петер Мельгаард,
Аасберг-Петерсен Ким (DK)

(74) Представитель:

Беляева Е.Н. (BY)

(57) Настоящая технология относится к системе теплообменного реактора (ТОР), включающей первый сырьевой газовый поток и теплообменный реактор, ТОР. ТОР имеет две реакционные зоны. Первая реакционная зона (I) предназначена для проведения общей экзотермической реакции первого сырьевого газового потока, а вторая реакционная зона (II) предназначена для проведения общей эндотермической реакции газа, поступающего из указанной первой реакционной зоны (I).



A1

202393232

202393232

A1

Теплообменный реактор с уменьшенным металлическим запыливанием

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

Настоящая технология относится к способу преобразования первого сырьевого газового потока, содержащего CO_2 и H_2 , в поток синтез-газа (синтетического газа) посредством реакции конверсии CO_2 в теплообменном реакторе (ТОР). ТОР имеет две реакционные зоны; первая реакционная зона предназначена для проведения общей экзотермической реакции первого сырьевого газового потока, а вторая реакционная зона предназначена для проведения общей эндотермической реакции газа, поступающего из указанной первой реакционной зоны (I).

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

Производство CO из CO_2 может осуществляться посредством реакции обратной конверсии водяного газа по формуле:



Это эндотермическая реакция, и, следовательно, для ее непрерывного протекания необходимы затраты энергии. На самом деле существует несколько промышленных реализаций этой технологии, но на бумаге реакцию можно обеспечить в конфигурации, подобной установке парового риформинга метана (ПРМ), в которой тепло подается за счет внешнего нагрева, а реакция обеспечивается внутри нагретых зон реактора или его труб.

Однако внешний подогрев обычно означает, что происходит сжигание углеводородного топлива и, следовательно, часто это сопровождается выбросами CO_2 , что противоречит текущим интересам химической промышленности, где в последние годы основное внимание уделяется сокращению выбросов парниковых газов. В принципе, внешний подогрев также может обеспечиваться за счет сжигания водорода, при котором водород получают посредством электролиза. Однако этот путь потребует значительного количества электроэнергии для производства водорода, поэтому данный вариант является дорогостоящим и не считается предпочтительным.

Целью настоящей технологии является создание эффективного теплообменного реактора (ТОР) и способа производства СО из СО₂. В частности, в настоящей технологии риск металлического запыливания как на технологической стороне, так и на стороне нагрева снижается или, где это возможно, полностью исключается.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ СУЩНОСТИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Было обнаружено, что способ и реактор ТОР, используемые в настоящем документе для конверсии СО₂, обеспечивают гораздо более низкий риск металлического запыливания по сравнению с паровым риформером метана с теплообменником.

Изобретение соответствует определению, приведенному в независимых пунктах формулы.

В одном из вариантов осуществления предложен способ преобразования первого сырьевого газового потока, содержащего СО₂ и Н₂, в поток синтез-газа посредством реакции конверсии СО₂ указанного первого сырьевого газового потока в теплообменном реакторе ТОР, при этом указанный ТОР содержит:

по меньшей мере, одну технологическую сторону и, по меньшей мере, одну сторону нагрева, причем технологическая сторона ТОР содержит впускное отверстие технологической стороны и выпускное отверстие технологической стороны,

причем технологическая сторона ТОР содержит первую реакционную зону (I), расположенную ближе всего к входному отверстию технологической стороны,

и причем технологическая сторона ТОР содержит вторую реакционную зону (II), расположенную ближе всего к выпускному отверстию технологической стороны,

причем сторона нагрева ТОР содержит впускное отверстие стороны нагрева и, при необходимости, выпускное отверстие стороны нагрева,

при этом указанная, по меньшей мере, одна технологическая сторона и указанная, по меньшей мере, одна сторона нагрева расположены таким образом, что имеется возможность передачи тепла от стороны нагрева, по меньшей мере, к части технологической стороны,

при этом указанный способ включает следующие этапы:

- подачу первого сырьевого газового потока на технологическую сторону ТОР через указанное впускное отверстие технологической стороны;
- подачу нагревательной жидкости на сторону нагрева ТОР через указанное впускное отверстие стороны нагрева и обеспечение передачи тепла от указанной нагревательной жидкости на технологическую сторону ТОР;
- проведение общей экзотермической реакции указанного первого сырьевого газового потока в первой реакционной зоне (I), причем общая экзотермическая реакция включает, по меньшей мере, следующие реакции, которые протекают слева направо:

$$\text{CO (g)} + 3 \text{H}_2 \text{(g)} \rightleftharpoons \text{CH}_4 \text{(g)} + \text{H}_2\text{O (g)} \quad (2)$$

$$\text{CO}_2 \text{(g)} + \text{H}_2 \text{(g)} \rightleftharpoons \text{CO (g)} + \text{H}_2\text{O (g)} \quad (1);$$
- проведение общей эндотермической реакции газа, полученного из указанной первой реакционной зоны, во второй реакционной зоне (II), при этом общая эндотермическая реакция включает, по меньшей мере, следующие реакции, которые протекают слева направо:

$$\text{CH}_4 \text{(g)} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO (g)} + 3\text{H}_2 \text{(g)} \quad (\text{обратная реакции (2)})$$

$$\text{CO}_2 \text{(g)} + \text{H}_2 \text{(g)} \rightleftharpoons \text{CO (g)} + \text{H}_2\text{O (g)} \quad (1);$$
- выпуск потока синтез-газа с технологической стороны через выпускное отверстие технологической стороны, при необходимости, в смеси с охлажденной жидкостью; и
- при необходимости, выпуск охлажденной жидкости с указанной стороны нагрева через выпускное отверстие стороны нагрева.

Также предусмотрен теплообменный реактор (ТОР) для проведения этого способа. Дополнительные сведения по настоящей технологии представлены в следующем тексте описания, на фигурах и в зависимых пунктах формулы изобретения.

ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

Технология описана со ссылкой на прилагаемые схематические фигуры, на которых:

На Фигуре 1 показана система ТОР согласно изобретению, содержащая теплообменный реактор (ТОР)

На Фигуре 2 показана система ТОР, аналогичная системе на Фигуре 1, в которой реактор ТОР представляет собой ТОР байонетного типа.

На Фигуре 3 показана система согласно изобретению, содержащая электрический реактор обратной конверсии водяного газа (э-ОКВГ) и теплообменный реактор (ТОР).

На Фигуре 4 показана система, аналогичная системе на Фигуре 3, в которой первый и второй сырьевые потоки поступают из общего сырьевого потока.

На Фигуре 5 показана система, аналогичная системе на Фигуре 5, в которой ТОР имеет две отдельные стороны нагрева.

На Фигуре 6 показана система согласно изобретению, дополнительно содержащая камеру сгорания.

На Фигуре 7 показана система, аналогичная системе на Фигуре 6, в которой первый и второй сырьевые потоки поступают из общего сырьевого потока.

На Фигуре 7А показана система согласно изобретению, в которой имеется блок мгновенного разделения для удаления конденсата.

На Фигуре 7В показана система, аналогичная Фигуре 7А.

На Фигурах 8 - 10 показаны температура и фактический профиль активности газообразного углерода из газа на стороне нагрева ТОР для примеров 4, 5 и 6.

На Фигуре 11 показана альтернативная конструкция ТОР по изобретению, в которой поток синтез-газа и охлажденная жидкость перед выпускным отверстием ТОР объединяют.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

Если не указано иное, любые заданные проценты содержания газа представляют собой объемные %.

Система может дополнительно содержать любые дополнительные узлы и соединения (например, трубопроводы), которые специалист в данной области посчитает необходимыми.

При использовании содержащего CO газа для нагрева и, следовательно, охлаждения необходимо учитывать образование углерода в результате так называемого явления металлического запыливания. Основными реакциями образования углерода, которые следует учитывать, являются реакция Будуара и реакции восстановления CO, описанные в настоящем документе. Обе реакции являются экзотермическими и, следовательно, протекают при более низких температурах.

Мерой оценки риска образования углерода является активность углерода (a_c) по формуле:

$$a_c = K_{eq}(\text{CO red}) \cdot p(\text{CO}) \cdot p(\text{H}_2) / p(\text{H}_2\text{O}),$$

где $K_{eq}(\text{CO red})$ – это константа термодинамического равновесия реакции восстановления CO, а $p(i)$ – это парциальное давление i . Следует обратить внимание, что образование углерода при $a_c < 1$ невозможно. Температура, при которой $a_c=1$, известна как температура восстановления монооксида углерода, T_{CO} .

Аналогичное выражение можно составить и для реакции Будуара. Температура, при которой $a_c=1$ для реакции Будуара, известна как температура Будуара, T_B .

В первом варианте осуществления предложен способ преобразования первого сырьевого газового потока, содержащего CO₂ и H₂, в поток синтез-газа (синтетического газа) посредством реакции конверсии CO₂ указанного первого сырьевого газового потока в специальном теплообменном реакторе ТОР.

Теплообменный реактор

ТОР выполнен с возможностью использования горячего газа для подачи тепла для эндотермической реакции путем теплообмена, как правило, через стенку трубы. В качестве примера устройства установки теплообменного риформинга можно привести несколько параллельных трубок, обычно заполненных гранулированным катализатором, в которые поступает сырьевой газ. В нижней части реактора газообразный продукт из трубок, заполненных катализатором, смешивают с горячим синтез-газом из находящихся ранее по ходу процесса установок риформинга, и объединенный синтез-газ осуществляет теплообмен с

трубками, которые заполнены катализатором. Также возможны и другие варианты устройства теплообменных реакторов.

В предпочтительном варианте катализатор ТОР является неселективным. В качестве примеров таких катализаторов можно привести Ni/MgAl₂O₄, Ni/Al₂O₃, Ni/CaAl₂O₄, NiIr/MgAl₂O₄, Ni/ZrO₂, Ru/MgAl₂O₄, Rh/MgAl₂O₄, Ir/MgAl₂O₄, Ru/ZrO₂, NiIr/ZrO₂, Mo₂C, W₂C, CeO₂, благородный металл на Al₂O₃. Другие примеры включают активные металлы, такие как никель, иридий, родий и/или рутений на различных формах алюмината кальция.

ТОР имеет, по меньшей мере, технологическую сторону и, по меньшей мере, сторону нагрева. Технологическая сторона ТОР содержит входное отверстие технологической стороны и выходное отверстие технологической стороны, тогда как сторона нагрева ТОР содержит входное отверстие стороны нагрева и, при необходимости, выходное отверстие стороны нагрева. Соответствующие входные и выходные отверстия имеют жидкостное соединение внутри каждой стороны ТОР.

Технологические стороны и стороны нагрева отделены друг от друга внутренней стенкой (стенками), благодаря чему имеется возможность передачи тепла от стороны нагрева к технологической стороне. В одном из аспектов ТОР может содержать две стороны нагрева.

Технологическая сторона ТОР – это та сторона, на которой происходит реакция конверсии CO₂. Технологическая сторона ТОР может включать один или несколько катализаторов, которые ускоряют реакцию конверсии CO₂. Катализаторы также катализируют реакции метанирования и парового риформинга, что разъясняется ниже. Удобно то, что катализатор, используемый в обеих реакционных зонах, является неселективным.

Сторона нагрева ТОР не предназначена для протекания химических реакций. Вместо этого тепловая энергия горячей жидкости, проходящей через сторону нагрева, передается на технологическую сторону.

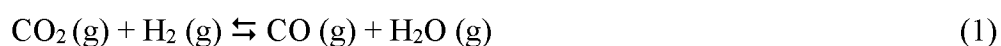
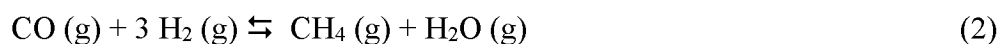
ТОР может представлять собой типичный кожухотрубный теплообменный реактор, содержащий множество наполненных катализатором трубок, расположенных внутри корпуса. Существует жидкостное сообщение между внутренней частью всех трубок, но при этом жидкостное сообщение между внутренней и внешней частью трубок не предусмотрено. При работе одна жидкость

течет через внутреннюю часть трубок, а вторая жидкость течет в корпусе снаружи трубок. Тепло передается от одной жидкости к другой через стенки трубок. На каждом конце пучка трубок расположено устройство коллекторного типа.

ТОР обычно работает при давлении, близком к давлению любого связанного с ним реактора(ов), который в одном из аспектов представляет собой реактор ОКВГ, такой как э-ОКВГ.

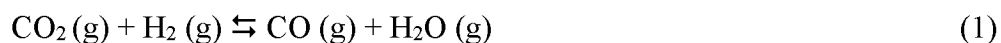
В этом аспекте технологическая сторона ТОР содержит входное отверстие на технологической стороне (через которое первый сырьевой газовый поток поступает в ТОР) и выпускное отверстие на технологической стороне (через которое поток синтез-газа выходит из ТОР). Первая реакционная зона (I) расположена ближе всего к входному отверстию на технологической стороне, а вторая реакционная зона (II) расположена ближе всего к выпускному отверстию на технологической стороне. Термин «расположен ближе всего» следует измерять с точки зрения пути прохождения газа, а не геометрически.

Первая реакционная зона (I) предназначена для проведения общей экзотермической реакции первого сырьевого газового потока.



Обе эти реакции протекают в первой реакционной зоне (I).

Вторая реакционная зона (II) предназначена для проведения общей эндотермической реакции газа, полученного из указанной первой реакционной зоны (I). Основные реакции, протекающие в этой зоне:



Обычно, как ОКВГ/реакция конверсии водяного газа, так и реакции парового риформинга/метанирования на выходе из ТОР находятся в химическом равновесии или близки к нему.

В одном из аспектов технологическая сторона ТОР имеет общую протяженность от входного отверстия технологической стороны до выпускного отверстия технологической стороны, и причем первая реакционная зона (I) имеет

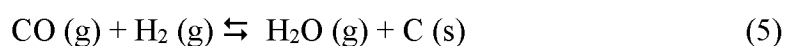
протяженность менее 50%, например, менее 30%, предпочтительно менее 20%, более предпочтительно менее 10% от общей длины технологической стороны TOP. Первый катализатор может быть расположен, по меньшей мере, в первой реакционной зоне (I) и может, по меньшей мере, частично заходить во вторую реакционную зону (II).

В еще одном варианте осуществления один и тот же тип неселективного катализатора используют как в первой, так и во второй реакционных зонах. Обе реакции (1) и (2) катализирует неселективный катализатор. Неселективный катализатор также может катализировать и другие реакции, такие как паровой риформинг высших углеводородов, таких как этан и пропан.

Соответственно, по меньшей мере, конец первой реакционной зоны (I), который расположен ближе всего к входному отверстию технологической стороны TOP, не находится в непосредственном контакте со стороной нагрева TOP, в результате чего этот конец первой реакционной зоны (I) в первую очередь нагревается за счет адиабатического повышения температуры, вызванного указанной экзотермической реакцией. Входное отверстие технологической стороны TOP является тем концом TOP, куда поступает первый сырьевой газовый поток.

Крайне важно избегать образования углерода на катализаторе в реакторе TOP. Кроме того, хорошо известно, что риск металлического запыливания существует при производстве газов, содержащих CO, и особенно при охлаждении таких газов. Настоящее изобретение позволяет избежать или существенно снижает риск как образования углерода, так и металлического запыливания в реакторе TOP.

Металлическое запыливание может происходить на металлических стенках в присутствии газов, содержащих CO. Химическая реакция, приводящая к металлическому запыливанию, часто представлена одной из следующих:



Первая реакция известна как реакция Будуара, а вторая – как реакция восстановления CO. Металлическое запыливание в тяжелых случаях может

привести к быстрому разрушению металлических стенок и к серьезным отказам оборудования.

В качестве основной части изобретения использование неселективного катализатора предпочтительнее использования селективного по нескольким причинам, которые будут разъясняться ниже:

При использовании неселективного катализатора в первой реакционной зоне (I) помимо реакции ОКВГ происходит метанирование. Это приводит к высвобождению химической энергии для нагрева системы и, как следствие, к повышению температуры, поскольку метанирование является экзотермическим. Поскольку реакция восстановления СО также является экзотермической, повышение температуры, вызванное реакцией метанирования, приводит к снижению потенциала реакции восстановления СО, и, когда температура поднимется до определенного уровня, потенциал для реакции восстановления СО будет полностью утрачен. Этот точный уровень будет зависеть от конкретной концентрации реагента, температуры на входе и давления, но обычно находится в диапазоне 500-800°C, выше которого реакция восстановления СО не может происходить. Обратите внимание, что экзотерма, генерируемая реакцией метанирования, приводит к максимальному повышению температуры в активном центре катализатора на поверхности структурированного катализатора, который также является местом, где может происходить образование углерода. Следовательно, эта экзотерма оказывает выраженное положительное воздействие на снижение потенциала образования углерода на катализаторе.

В целом, устройство этого ТОР позволяет облегчить реакцию обратной конверсии водяного газа и реакцию метанирования внутри ТОР без возникновения побочных реакций образования углерода на катализаторе или металлических поверхностях, поскольку реакция метанирования, как это ни парадоксально, смягчает все это. Конкретная конфигурация ТОР, которая позволяет повысить температуру от относительно низкой на входе до очень высокой температуры газового продукта, превышающей 500°C, предпочтительно более 800°C и еще более предпочтительно более 900°C или 1000°C, означает, что образовавшийся в результате реакции метанирования метан будет находиться в первой реакционной зоне (I) реактора ТОР, но при превышении уровня около 600 - 800°C этот метан в результате реакции обратного метанирования начнет превращаться обратно в

продукт с высоким содержанием СО. Это устройство удачным образом позволяет удалить часть СО и сформировать некоторое количество H_2O внутри слоя катализатора в температурном диапазоне, в котором восстановление СО является проблематичным, но затем позволяет воспроизводить СО в высокотемпературной зоне с низким углеродным потенциалом или без него. По сути, использование высокой температуры газообразного продукта означает, что конечный продукт синтетического газа может быть обеспечен при очень низкой концентрации метана несмотря на то, что метан имеет пиковую концентрацию где-то в зоне реакции. В одном из вариантов осуществления реакторная система работает без метана в первом сырьевом газовом потоке или с очень малым его количеством в сырьевом потоке и только с очень небольшим количеством метана в потоке синтетического газа, но с пиком концентрации метана внутри зоны реакции выше, чем в первом сырьевом газовом потоке и/или потоке синтетического газа. При необходимости эта пиковая концентрация метана внутри реакционной зоны может быть на порядок выше, чем концентрации метана на входе и выходе.

Как указано выше, при использовании неселективного катализатора имеет место низкая концентрация СО и низкая вероятность образования углерода. Если предположить, что газ на технологической стороне реактора TOP находится в равновесии по отношению к реакциям (1) и (2), то обычно не будет термодинамического потенциала для образования углерода по любой из реакций (4) и (5). Если используется селективный катализатор и происходит только реакция (1) (т.е. реакция (2) не происходит), то концентрация СО будет значительно выше. В этом случае обычно будет существовать термодинамический потенциал образования углерода из обеих реакций (4) и (5), и, следовательно, риск образования углерода существенно выше.

Первый сырьевой газовый поток

Необходим первый сырьевой газовый поток, содержащий CO_2 и H_2 . Этот первый сырьевой поток может представлять собой или содержать продукт сгорания другого газового состава, стороннего по отношению к системе. Примеры источников CO_2 включают отработанные газы или отходящие газы от установок улавливания CO_2 , таких как установки промывки амином, биогенный CO_2 , CO_2 от установок прямого улавливания воздуха и/или CO_2 от цементных или сталелитейных заводов. Примеры источников H_2 включают водород, полученный

в результате электролиза (например, щелочного или твердооксидного электролиза) или водород, полученный в результате парового риформинга. Первый сырьевой газовый поток преобразуется в поток синтез-газа посредством реакции конверсии CO_2 первого сырьевого газового потока в теплообменном реакторе.

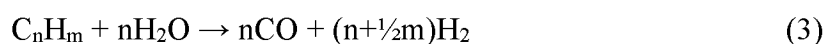
Часть первого сырьевого потока и/или нагревательной жидкости, используемой в технологическом процессе, также может содержать газ, рециркулируемый из последующей установки. Примером является рециркуляция отходящих газов (или остаточных газов) установки синтеза Фишера-Тропша. Такой отходящий газ может быть предварительно обработан перед использованием в качестве части или всего первого сырьевого потока и/или нагревательной жидкости. Еще одним примером является продувочный газ из контура метанола.

Соответственно, первый сырьевой поток содержит от 10 до 60% CO_2 , например, от 20 до 35% CO_2 , от 25 до 35% CO_2 . Соответственно, первое сырье содержит от 40 до 90% H_2 , например, от 50 до 80% H_2 , от 60 до 70% H_2 или от 65 до 70 % H_2 .

В первом сырьевом потоке соотношение H_2 и CO_2 может составлять 1 - 5, например, 2 - 4, 2 - 3 или 2,2 - 2,5, или 2,8 - 3,5, или 2,8 - 3,2. В другом варианте осуществления молярное соотношение CH_4/CO_2 в первом сырьевом потоке предпочтительно составляет менее 0,5, например, менее 0,2, предпочтительно менее 0,1.

Соответственно, основным источником водорода в первом сырьевом газовом потоке является установка электролиза.

Часть первого сырьевого потока может дополнительно происходить из потока, содержащего углеводороды, который был предварительно подвергнут риформингу перед поступлением в реакторы ТОР с использованием следующей реакции:



Вышеупомянутая реакция обычно сопровождается реакцией метанирования и реакцией конверсии водяного газа (обратной реакции (1)), приводящей к образованию смеси, в основном, CO_2 , H_2 , CH_4 и пара.

Примером потока углеводородов является поток, содержащий парафины, такие как этан, пропан, бутаны и/или пентаны. Для парафинов в уравнении (3) $m=2n+2$.

Другим примером потока углеводородов является сжиженный нефтяной газ, который рециркулируется из секции синтеза после системы по изобретению, например, из установки синтеза Фишера-Тропша или установки, производящей углеводороды из метанола.

Кроме того, первый сырьевой поток может содержать другие компоненты, такие как CH_4 , N_2 , Ar , O_2 , CO или H_2O . Другие компоненты, такие как другие углеводороды, включая этан, также возможны, как правило, в незначительных количествах.

Первый сырьевой поток соответственно имеет следующий состав (по объему):

- 50-80% H_2 (сух.)
- 20-50% CO_2 (сух.)

В одном из вариантов осуществления первый сырьевой поток обычно имеет следующий альтернативный объемный состав:

50-70 % H_2

20-40% CO_2

2 - 10% CH_4

1 - 8% H_2O

0-5% CO

0-5% в общей сложности других компонентов, таких как Ar , N_2 и этан.

В другом варианте осуществления, где природный газ предварительно кондиционируется путем десульфурации и/или предварительного риформинга, углерод из природного газа составляет менее 20%, предпочтительно менее 10%, более предпочтительно менее 5% от общего количества углерода в первом сырьевом потоке.

Первый сырьевой газовый поток дополнительно может содержать метан, предпочтительно до 3 мол.%, или до 8 мол.%, или до 12 мол.% метана.

Первый сырьевой газовый поток подают на технологическую сторону ТОР через указанное входное отверстие технологической стороны. В конкретном варианте осуществления первый сырьевой газовый поток имеет температуру от 250°C до 550°C, предпочтительно от 260°C до 450°C, предпочтительно от 270 до 400°C, предпочтительно от 280°C до 380°C, предпочтительно от 290°C до 370°C и наиболее предпочтительно от 300°C до 360°C.

Нагревательная жидкость

В системе также необходима нагревательная жидкость. Эта нагревательная жидкость может частично или полностью быть продуктом сгорания другого газового состава, который является сторонним по отношению к системе. Удобно то, что нагревательная жидкость содержит CO_2 и H_2 и также может представлять собой поток синтез-газа.

Нагревательную жидкость подают на сторону нагрева ТОР через указанное входное отверстие стороны нагрева и происходит передача тепла от указанной нагревательной жидкости на технологическую сторону ТОР.

В одном из аспектов нагревательную жидкость подают из электрического реактора ОКВГ (э-ОКВГ), огневого реактора ОКВГ или автотермического реактора ОКВГ, предпочтительно из электрического реактора ОКВГ (э-ОКВГ).

В одном из вариантов осуществления, где в качестве нагревающей жидкости выступает поток синтез-газа, этот поток синтетического газа и охлажденная жидкость могут быть объединены в ТОР с получением третьего потока продукта, выходящего из выпускного отверстия технологической стороны. Иными словами, синтез-газ, выходящий из второй реакционной зоны, смешивается с горячей нагревательной жидкостью, после чего эта смесь охлаждается, и охлажденная жидкость выходит из реактора ТОР.

Как отмечалось выше, нагревательная жидкость может подаваться из электрического реактора ОКВГ (э-ОКВГ), огневого реактора ОКВГ или автотермического реактора ОКВГ, предпочтительно электрического реактора ОКВГ (э-ОКВГ).

В одном из аспектов реактор ОКВГ, используемый для проведения реакции обратной конверсии водяного газа между CO_2 и H_2 , представляет собой реактор с

обратной конверсией водяного газа с электрическим подогревом (э-ОКВГ). Реактор э-ОКВГ использует реактор с электрическим резистивным нагревом, который обеспечивает более эффективный процесс обратной конверсии водяного газа и существенно снижает или предпочтительно исключает использование ископаемого топлива в качестве источника тепла. Реактор э-ОКВГ может содержать катализатор, который является селективным или неселективным. Предпочтительно реактор э-ОКВГ содержит неселективный катализатор.

В одном из вариантов осуществления реактор э-ОКВГ содержит:

- структурированный катализатор, выполненный с возможностью катализа указанной реакции ОКВГ, при этом указанный структурированный катализатор содержит макроскопическую структуру электропроводящего материала, при этом указанная макроскопическая структура поддерживает керамическое покрытие, причем указанное керамическое покрытие поддерживает каталитически активный материал (для селективного э-ОКВГ);
- структурированный катализатор, содержащий макроскопическую структуру электропроводящего материала, при этом указанная макроскопическая структура поддерживает керамическое покрытие, причем указанное керамическое покрытие поддерживает неселективный каталитически активный материал (для неселективного э-ОКВГ);
- при необходимости, верхний слой, содержащий неселективный гранулированный катализатор,
- герметичный корпус, в котором находится указанный структурированный катализатор; указанный герметичный корпус содержит впускное отверстие для подачи указанного сырьевого потока и выпускное отверстие для выпуска продукта синтез-газа; причем указанное входное отверстие расположено таким образом, что указанный сырьевой поток поступает в указанный структурированный катализатор через первый конец указанного структурированного катализатора, а указанный продукт синтез-газа выходит из указанного

структурированного катализатора через второй конец указанного структурированного катализатора;

- теплоизоляционный слой между указанным структурированным катализатором и указанным герметичным корпусом;
- по меньшей мере, два проводника, электрически соединенных с указанным структурированным катализатором и с источником электропитания, расположенным вне указанного корпуса под давлением, при этом указанный источник электропитания рассчитан на нагрев, по меньшей мере, части указанного структурированного катализатора до температуры, по меньшей мере, 500°C путем прохождения электрического тока через указанную макроскопическую структуру электропроводящего материала; причем указанные, по меньшей мере, два проводника подключены к структурированному катализатору в положении на структурированном катализаторе ближе к указанному первому концу указанного структурированного катализатора, чем к указанному второму концу указанного структурированного катализатора, и причем структурированный катализатор выполнен с возможностью направления электрического тока для его прохождения от одного проводника по существу ко второму концу структурированного катализатора и возвращения ко второму из указанных, по меньшей мере, двух проводников.

Удобно то, что герметичный корпус имеет расчетное давление 2 - 50 бар. Герметичный корпус также может иметь расчетное давление от 50 до 200 бар., по меньшей мере, два проводника обычно проходят через герметичный корпус в трубке, в результате чего, по меньшей мере, два проводника электрически изолированы от герметичного корпуса. Герметичный корпус может дополнительно содержать одно или несколько входных отверстий рядом с, по меньшей мере, одной трубкой или в сочетании с ним, что позволяет охлаждающему газу протекать над, вокруг, рядом или внутри, по меньшей мере, одного проводника внутри указанного герметичного корпуса. Температура газа на выходе из реактора э-ОКВГ составляет 900 °С или более, предпочтительно 1000 °С или более, еще более предпочтительно 1100 °С или более.

Реактор э-ОКВГ также может иметь другую конструкцию, и/или тепло может передаваться индукционным способом.

Реактор э-ОКВГ в качестве альтернативы может содержать первый нагревательный конец, где сырьевой газ нагревается электрически до высокой температуры, такой как 800 - 1000°C, и второй конец, содержащий слой (адиабатического) катализатора, включающий селективный или неселективный катализатор, или сочетание катализаторов.

В одном из вариантов осуществления реактор ОКВГ представляет собой огневой реактор ОКВГ. Огневой реактор ОКВГ может состоять из ряда помещенных внутри печи трубок, заполненных гранулами катализатора. Трубки обычно довольно длинные, например, 10 - 13 метров, и обычно имеют относительно небольшой внутренний диаметр, например, от 80 до 160 мм, что в совокупности обеспечивает большую площадь внешней поверхности и облегчает передачу тепла в катализатор. Катализатор может представлять собой селективный катализатор, неселективный катализатор или их сочетание. Для работы огневого реактора ОКВГ необходим топливный газ. Размещенные в печи горелки обеспечивают необходимое тепло для реакций за счет сгорания топливного газа. Существует общее ограничение получаемого теплового потока из-за механических ограничений, в связи с чем производительность увеличивается за счет увеличения количества труб и размера печи. Этот тип устройства реактора часто использовался для парового риформинга, более подробную информацию о котором можно получить в материалах из уровня техники, например, «Производство синтез-газа для синтеза ФТ»; Глава 4, стр.258-352, 2004 г. Также могут быть предусмотрены и другие типы огневых реакторов ОКВГ.

В одном из вариантов осуществления реактор ОКВГ представляет собой автотермический реактор ОКВГ или, более предпочтительно, один или более предварительных реакторов, за которыми далее по ходу процесса следует автотермический реактор ОКВГ. Отходящий газ из первого предварительного реактора, при необходимости, может охлаждаться и отправляться в следующий предварительный реактор, в котором происходят те же самые реакции. Могут использоваться дополнительные предварительные реакторы. Предварительные реакторы обычно являются адиабатическими или нагреваемыми. Газ на выходе из

последнего предварительного реактора направляется в автотермический реактор ОКВГ.

В предварительном(ых) реакторе(ах) протекают реакции (1) и (2). Обычно состав газа как на выходе каждого из предварительных реакторов, так и на выходе из автотермического реактора ОКВГ находится в состоянии химического равновесия или близок к нему относительно реакций (1) и (2).

Основными элементами автотермического реактора ОКВГ являются горелка, камера сгорания и слой катализатора, заключенный в герметичный корпус с огнеупорной футеровкой. Для работы автотермического реактора ОКВГ необходима подача кислорода. В автотермическом реакторе ОКВГ частичное сжигание сырья автотермического реактора ОКВГ субстехиометрическими количествами кислорода сопровождается обратной конверсией водяного газа и, при необходимости, также паровым риформингом частично сгоревшего газа в неподвижном слое катализатора. Обычно на выходе из реактора газ находится в равновесии или близко к нему относительно реакций конверсии водяного газа и парового риформинга. Температура выходящего газа обычно находится в диапазоне от 850 до 1100°C. Этот тип устройства реактора часто использовался для производства синтез-газа из углеводородного сырья, более подробную информацию о чем можно найти в материалах из уровня техники, например, в «Исследования в области науки о поверхности и катализа», том 152, «Производство синтез-газа для синтеза ФТ»; Глава 4, с.258-352, 2004 г.

Также можно использовать огневой реактор ОКВГ, за которым следует автотермический реактор ОКВГ. В этом случае поток на выходе из реактора ОКВГ направляется в автотермический реактор ОКВГ. Отходящий газ из реактора ОКВГ в этом случае обычно имеет температуру 700 - 900°C.

Также возможен электрический реактор ОКВГ, за которым следует автотермический реактор ОКВГ. Отходящий газ на выходе из электрического реактора ОКВГ в этом случае обычно имеет температуру 700 - 900°C.

Настоящее изобретение также предусматривает теплообменный реактор (ТОР) для преобразования первого сырьевого газового потока, содержащего CO₂ и H₂, в поток синтез-газа посредством реакции конверсии CO₂ указанного первого сырьевого газового потока. ТОР содержит:

по меньшей мере, одну технологическую сторону и, по меньшей мере, одну сторону нагрева, причем технологическая сторона TOP содержит впускное отверстие технологической стороны и выпускное отверстие технологической стороны,

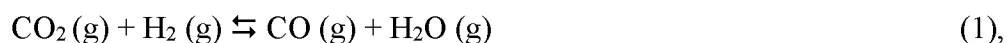
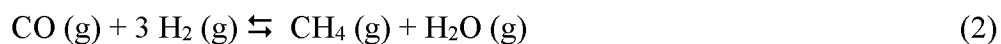
при этом указанное входное отверстие технологической стороны выполнено с возможностью подачи указанного первого сырьевого газового потока, содержащего CO_2 и H_2 , на указанную технологическую сторону,

при этом указанное выпускное отверстие технологической стороны выполнено с возможностью вывода указанного потока синтез-газа с технологической стороны, при необходимости, в смеси с охлажденной жидкостью,

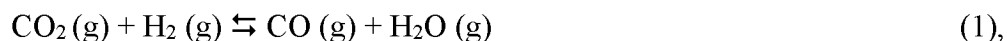
причем технологическая сторона TOP содержит первую реакционную зону (I), расположенную ближе всего к входному отверстию технологической стороны,

и причем технологическая сторона TOP содержит вторую реакционную зону (II), расположенную ближе всего к выпускному отверстию технологической стороны,

причем первая реакционная зона (I) предназначена для проведения общей экзотермической реакции указанного первого сырьевого газового потока, а общая экзотермическая реакция включает, по меньшей мере, следующие реакции, которые протекают слева направо:



причем вторая реакционная зона (II) предназначена для проведения общей эндотермической реакции газа из указанной первой реакционной зоны, причем общая эндотермическая реакция включает, по меньшей мере, следующие реакции, которые протекают слева направо:



причем сторона нагрева TOP содержит впускное отверстие стороны нагрева и, при необходимости, выпускное отверстие стороны нагрева,

при этом указанное впускное отверстие стороны нагрева выполнено с возможностью подачи нагревательной жидкости на указанную сторону нагрева,

при этом указанное выходное отверстие стороны нагрева, если оно имеется, предусмотрено для вывода охлажденной жидкости со стороны нагрева,

при этом указанная, по меньшей мере, одна технологическая сторона и указанная, по меньшей мере, одна сторона нагрева расположены таким образом, что имеется возможность передачи тепла от стороны нагрева к технологической стороне.

Система может дополнительно содержать любые дополнительные узлы и соединения (например, трубопроводы), которые специалист в данной области посчитает необходимыми.

Удобно то, что технологическая сторона ТОР имеет общую протяженность от входного отверстия технологической стороны до выпускного отверстия технологической стороны, и причем первая реакционная зона (I) имеет протяженность менее 50%, например, менее 30%, предпочтительно менее 20%, более предпочтительно менее 10% от общей длины технологической стороны ТОР. Первый катализатор удобно расположен, по меньшей мере, в первой реакционной зоне (I) ТОР. По меньшей мере, концевая секция технологической стороны первой реакционной зоны (I), которая расположена ближе всего к входному отверстию технологической стороны ТОР и имеет протяженность до 25% от общей протяженности технологической стороны первой реакционной зоны в направлении от входного отверстия технологической стороны к выходному отверстию технологической стороны, не находится в непосредственном контакте со стороной нагрева ТОР, в результате чего эта концевая секция первой реакционной зоны (I) нагревается в первую очередь за счет адиабатического повышения температуры, вызванного экзотермической реакцией в первой реакционной зоне (I). В частности, указанная концевая секция имеет протяженность 5 - 20%, предпочтительно 5 - 10% от общей протяженности технологической стороны первой реакционной зоны в направлении от входного до выпускного отверстия технологической стороны. Удобно то, что ТОР представляет собой ТОР байонетного типа. ТОР может иметь, по меньшей мере, две технологических стороны и/или, по меньшей мере, две стороны нагрева.

Соотношение H_2/CO в потоке синтез-газа, выходящем из ТОР, предпочтительно составляет от 1,8 до 2,2, например от 1,9 до 2,1. Это желательно,

например, если синтез-газ будет использоваться для последующего синтеза синтетического топлива, такого как керосин или дизельное топливо, с использованием процесса синтеза Фишера-Тропша.

В одном из вариантов осуществления соотношение $(\text{H}_2\text{-CO}_2)/(\text{CO}+\text{CO}_2)$ (также известное как модуль синтез-газа) выходящего из TOP потока синтез-газа составляет от 1,8 до 2,2, например от 2,0 до 2,1. Это желательно, например, если синтез-газ будет использоваться для последующего синтеза метанола.

Общую экзотермическую реакцию первого сырьевого газового потока осуществляют в первой реакционной зоне (I); общую эндотермическую реакцию газа, поступающего из первой реакционной зоны (I), осуществляют во второй реакционной зоне (II); и поток синтез-газа выходит с технологической стороны (TOP) через выпускное отверстие технологической стороны, при необходимости, в смеси с охлажденной жидкостью. Охлажденная жидкость может выходить со стороны нагрева TOP через выпускное отверстие стороны нагрева.

Температура газа в первой реакционной зоне (I) обычно составляет 300 - 800°C. Температура газа во второй реакционной зоне (II) обычно находится в пределах 600 - 1200°C.

Соответственно, условия способа регулируют таким образом, чтобы обеспечить температуру потока синтез-газа и/или охлажденной жидкости, и/или третьего потока продукта на соответствующем выходном отверстии TOP, которая выше критического предела металлического запыливания. Это означает, что температура будет достаточно высока, в результате чего отсутствует термодинамический потенциал для металлического запыливания, либо термодинамический потенциал достаточно низок, в связи с чем металлического запыливания не происходит или происходит очень медленно.

Например, температура на выходе охлажденного потока синтез-газа и/или охлажденной жидкости, и/или третьего потока продукта составляет 500°C или выше, 600°C или выше, 700°C или выше, или 800°C или выше. За счет контроля температуры потока охлажденного продукта можно контролировать и риск металлического запыливания, при этом, как правило, более низкие температуры способствуют увеличению (нежелательного) потенциала (более высокого значения

а_с) металлического запыливания из-за экзотермической природы соответствующих реакций.

Поток синтез-газа и/или охлажденная жидкость, и/или третий поток продукта при указанной охлажденной температуре на выходе соответственно имеет фактическую активность углерода в газе реакции восстановления CO ниже 100, или ниже 50, или ниже 10, или ниже 5, или ниже 1.

Обычно соотношение H_2/CO потока синтез-газа и/или охлажденной жидкости, и/или третьего потока продукта находится в диапазоне 0,5 - 3,0, например, в диапазоне 1,9 - 2,1, или в диапазоне 2 - 3. Кроме того, соотношение $(H_2-CO_2)/(CO+CO_2)$ потока синтез-газа и/или охлажденной жидкости, и/или третьего потока продукта может быть в диапазоне 1,5 - 2,5, например, в диапазоне 1,9 - 2,1, или в диапазоне 2 - 2,05.

Регулирование температуры на выходе выхода охлажденного потока синтез-газа и/или охлажденной жидкости, и/или третьего потока продукта может осуществляться за счет правильной конструкции реактора TOP. Одним из способов достижения этого является сведение к минимуму или исключение передачи тепла от стороны нагрева к технологической стороне в зоне реакции (I). Согласно описанию выше, в предпочтительном варианте осуществления большая часть или все повышение температуры в реакционной зоне (I) вызвано адиабатическим повышением температуры вследствие реакции метанирования при использовании неселективного катализатора. В предпочтительном варианте температура газа, выходящего из первой реакционной зоны (I), составляет выше 650°C, более предпочтительно выше 700°C и наиболее предпочтительно выше 750°C. Температура газа, выходящего из реактора TOP со стороны нагрева, должна быть выше температуры газа, выходящего из зоны реакции (I) с технологической стороны, если в зоне реакции (I) не происходит теплопередачи между технологической стороной процесса и стороной нагрева. Следовательно, одним из способов поддержания высокой температуры газа (например, охлажденного первого газового продукта), выходящего из реактора TOP со стороны нагрева, является предотвращение или сведение к минимуму теплопередачи в реакторе TOP в реакционной зоне (I). Это можно сделать, например, за счет следующего:

- 1) Установить адиабатический неселективный катализатор по ходу процесса перед реактором ТОР согласно описанию выше.
- 2) Большая часть или вся первая реакционная зона (I) не находится в прямом тепловом контакте со стороной нагрева ТОР или внутри ТОР.
- 3) Такие средства, как изоляция, предусмотрены в части реактора ТОР между технологической стороной и стороной нагрева, по меньшей мере, в части реакционной зоны (I).

В одном из вариантов осуществления согласно пунктам 1) или 2) выше первый сырьевой газовый поток реагирует адиабатически согласно реакциям (1) и (2) с переходом в равновесие (или близкое к нему состояние).

Смесительные средства могут быть расположены по ходу процесса после ТОР и предназначены для объединения потока синтез-газа и охлажденной жидкости. Такое расположение выгодно применять в том случае, когда и поток синтез-газа, и охлажденная жидкость должны использоваться для одного и того же последующего применения, поэтому смешивание с таким же успехом может выполняться в ТОР, что позволит максимально увеличить использование площади теплопередачи в оборудовании.

ТОР может иметь две отдельные стороны нагрева. Такой ТОР показан на Фигуре 3.

В конкретном варианте ТОР содержит несколько двойных трубок. Под двойными трубками понимаются две концентрические трубки одинаковой длины, внутренняя трубка из которых имеет меньший диаметр по сравнению с внешней. При таком устройстве катализатор размещается как во внутренних трубках, так и между внешними. Часть первого сырьевого газового потока протекает от входа в реактор ТОР через заполненные катализатором внутренние трубки к другому концу реактора ТОР. Оставшаяся часть первого сырьевого газового потока протекает через заполненные катализатором области между внешними трубками. Нагревательная жидкость состоит из газа, выходящего из заполненных катализатором внутренних трубок, а заполненные катализатором области между внешними трубками смешиваются с синтез-газом, образуя третий газовый продукт. Третий газовый продукт протекает, по существу, в противоточном режиме через кольцевое пространство между внутренней и внешней трубками, образуя

охлажденный третий газовый продукт. Охлаждение третьего газового продукта обеспечивает необходимое тепло для сторон способа (внутренние трубки, заполненные катализатором, и пространство между внешними трубками). Это пример системы, в которой ТОР имеет две технологических стороны.

В другом варианте осуществления третий поток продукта дополнительно охлаждается в теплообменнике (котле-утилизаторе), в котором тепло используется для выработки пара из потока воды. Этот дополнительно охлажденный третий поток продукта обычно имеет температуру 300 - 550°C. Произведенный пар можно использовать для различных целей, например, для производства электроэнергии или в качестве потока сырья для установки электролиза при производстве водорода. В этом случае установка электролиза может быть расположена последовательно с реактором ТОР. Произведенный в установке электролиза водород может добавляться непосредственно в реактор ТОР как часть или весь водород в составе первого сырьевого газового потока.

Дополнительно охлажденный третий поток продукта может иметь температуру 300 - 550°C после использования для выработки пара согласно описанию выше. Этот дополнительно охлажденный третий поток продукта впоследствии можно также использовать для дополнительного нагрева, например, для предварительного нагрева части или всего первого сырьевого газового потока. Даже если дополнительно охлажденный третий поток продукта имеет высокое содержание монооксида углерода, можно избежать сильного металлического запыливания, поскольку температура поверхностей теплопередачи достаточно низкая.

Третий поток продукта может использоваться в качестве источника тепла, например, для предварительного нагрева части или всего первого сырьевого газового потока. Преимущество этого заключается в оптимизации энергоэффективности. Предварительный нагрев первого газового потока и выработка пара могут происходить параллельно либо последовательно.

В одном из аспектов система может дополнительно содержать камеру сгорания и четвертый сырьевой поток топлива, при этом указанный третий сырьевой поток топлива предусмотрен с возможностью подачи в камеру сгорания и сжигания в ней в присутствии окислителя для обеспечения пятого сырьевого

потока сгоревшего газа, причем указанный пятый сырьевой поток предназначен для подачи на сторону нагрева ТОР в виде части или всей указанной нагревательной жидкости. Предпочтительно, чтобы окислитель в указанной камере сгорания представлял собой, по существу, чистый кислород, предпочтительно более 90% кислорода, наиболее предпочтительно более 99% кислорода. Это предоставляет возможность увеличить передаваемую нагрузку ТОР, что способствует увеличению производимого СО во втором потоке продукта.

Третий сырьевой поток топлива может представлять собой сырьевой поток с содержанием водорода, который сжигается с переходом в пятый сырьевой поток, в котором содержится пар. Наличие по существу чистого пара в качестве пятого сырьевого потока является предпочтительным, когда он смешивается с потоком синтез-газа, поскольку пар легко удаляется снова и, таким образом, не влияет на качество полученного синтез-газа.

В качестве альтернативы, третий сырьевой поток топлива может представлять собой сырье, содержащее метан и/или другие углеводороды, в результате чего пятый сырьевой поток представляет собой поток с содержанием диоксида углерода и водяного пара. Таким образом, СО₂ может выгодным образом извлекаться из последующего ТОР и использоваться в качестве сырья для сырьевого потока, применяемого на более ранних этапах. В одном из вариантов осуществления внешняя горелка работает субстехиометрически, и пятый сырьевой поток может содержать СН₄, СО и/или Н₂. В частности, интересен здесь тот факт, является ли Н₂ субстехиометрическим по отношению к О₂.

Когда пятый сырьевой поток подают отдельно на сторону нагрева ТОР, как указано выше, охлажденный пятый сырьевой поток может использоваться по ходу процесса после ТОР, как часть указанного первого сырьевого газового потока, содержащего СО₂ и Н₂. Охлаждение этого сырьевого потока может привести к конденсации в нем части пара.

Обычно охлажденный пятый сырьевой поток будет охлажден в достаточной степени для конденсации Н₂О перед отправкой на сторону сырьевого потока (см. Фигуру 7). Поэтому система может включать дополнительный этап конденсации.

Синтетический газ, полученный с помощью описанной выше системы и способа, может использоваться, например, для производства метанола,

синтетического бензина, синтетического реактивного топлива или синтетического дизельного топлива.

Конкретные варианты осуществления

На Фигуре 1 показан общий вариант осуществления TOP 20 по изобретению. Первый сырьевой газовый поток 2 подают на технологическую сторону 20А TOP 20 через указанное входное отверстие технологической стороны 28. Нагревательную жидкость 11 подают на сторону 20В нагрева TOP 20, в результате чего тепло от нагревательной жидкости 11 передается на технологическую сторону 20А TOP 20. За счет этого ускоряется преобразование первого сырьевого газового потока 2 в поток 21 синтез-газа с содержанием СО на технологической стороне 20А TOP 20; причем общая экзотермическая реакция указанного первого сырьевого газового потока 2 происходит в первой реакционной зоне (I); а общая эндотермическая реакция газа из первой реакционной зоны (I) происходит во второй реакционной зоне (II). Охлажденную жидкость 31 выводят из выпускного отверстия 27 стороны нагрева. Температура охлажденной жидкости 31 на выходе из TOP составляет около 500°C или выше.

На Фигуре 2 показан еще один вариант осуществления TOP 20, который представляет собой байонетный TOP. Ссылочные номера указаны на Фигуре 1.

На Фигуре 3 показан общий вариант системы 100, содержащей TOP 20 по настоящему изобретению и реактор 10 обратной конверсии водяного газа (ОКВГ). Первый сырьевой поток 1, содержащий CO_2 и H_2 , подают в реактор 10 обратной конверсии водяного газа (ОКВГ), где он также преобразуется в первый поток 11 продукта; т.е. в поток синтетического газа. Температура на выходе из реактора ОКВГ (т.е. первого потока 11 продукта) составляет $>1000^\circ\text{C}$, благодаря чему этот поток можно использовать в качестве нагревательной жидкости в расположенном ниже по потоку TOP. Первый сырьевой поток 2 подают на технологическую сторону 20А TOP 20 и преобразуют там в поток 21 синтез-газа. TOP работает при температуре на выходе (т.е. потока 21 синтез-газа) 950°C . Первый поток 11 продукта подают на сторону 20В нагрева TOP 20, в результате чего тепло от первого потока 11 продукта передается на технологическую сторону 20А TOP 20. Таким образом стимулируется конверсия второго сырьевого потока 2 во второй поток 21 продукта, содержащий СО, на технологической стороне 20А TOP 20; и

обеспечивается охлажденный первый поток 31 продукта. Температура охлажденного первого потока 31 продукта на выходе из TOP составляет около 500°C или выше.

На Фигуре 4 показан вариант осуществления системы 100, аналогичной той, что показана на Фигуре 3, на которой используются такие же ссылочные номера, как и на Фигуре 3. Кроме того, для этой системы основной сырьевой поток 9, содержащий CO₂ и H₂, разделяют на первый сырьевой поток 2 и второй сырьевой поток 1. Первичный сырьевой поток 9 поступает со скоростью 10 000 Нм³/ч и содержит около 70% H₂ и 30% CO₂. В этом варианте осуществления первый и второй сырьевой потоки имеют одинаковые молярные размеры. Остальные подробности аналогичны тем, что используются на Фигуре 3.

В варианте осуществления, показанном на Фигуре 5, предусмотрена система 100, аналогичная системе, показанной на Фигуре 4, в которой используются такие же ссылочные номера, как и на Фигуре 4. Кроме того, TOP 20 имеет первую 20В' и вторую 20В" стороны нагрева. Нагревательную жидкость 11 подают на первую сторону 20В' нагрева, тогда как поток 21 синтез-газа подают на вторую сторону 20В" нагрева. Охлажденная жидкость 31 выходит из первой стороны 20В' нагрева TOP, тогда как поток 32 охлажденного синтез-газа выходит из второй стороны 20В" нагрева.

В варианте осуществления, показанном на Фигуре 6, предусмотрена система 100, аналогичная системе, показанной на Фигуре 3, в которой используются такие же ссылочные номера, как и на Фигуре 3. Кроме того, эта система содержит камеру 30 сгорания и третий сырьевой поток 4 топлива. Третий сырьевой поток 4 топлива предназначен для подачи в камеру 30 сгорания и сжигания в ней в присутствии окислителя 4В (обычно потока O₂), чтобы получить пятый сырьевой поток 5 сгоревшего газа. Пятый сырьевой поток 5 подают на сторону 20В нагрева TOP в качестве дополнительного источника тепла.

На Фигуре 7 показана система 100, аналогичная системе на Фигуре 6, в которой первый сырьевой поток 2 и второй сырьевой поток 1 происходят из одного и того же основного сырьевого потока 9 таким же образом, как в варианте осуществления, показанном на Фигуре 4.

Вариант осуществления, показанный на Фигуре 7А, основан на варианте осуществления, показанном на Фигуре 5. В этом варианте осуществления пятый сырьевой поток 5 сгоревшего газа проходит через сторону нагрева ТОР, а охлажденный пятый сырьевой поток 25 используется по ходу процесса после ТОР как часть указанного второго сырьевого потока 1 и/или как часть указанного первого сырьевого потока 2, содержащего CO_2 и H_2 . В проиллюстрированном варианте осуществления для удаления потока воды 41 используется испарительный сепаратор 40, а остаток пятого сырьевого потока 25 возвращается в основной сырьевой поток 9.

Вариант осуществления, показанный на Фигуре 7В, основан на варианте осуществления, показанном на Фигуре 7А. В этом варианте осуществления нагревательная жидкость 11 объединяется с потоком 21 синтез-газа, за счет чего формируется третий поток продукта, который подают на сторону нагрева ТОР.

На фигуре 11 показана альтернативная конструкция ТОР по изобретению, в которой поток 21 синтез-газа и охлажденная жидкость 31 перед выпускным отверстием ТОР объединяют.

ПРИМЕРЫ

Сравнительный пример 1

В качестве первого примера проиллюстрирован сравнительный случай с использованием автономного реактора э-ОКВГ с неселективным катализатором. Работа этого процесса обобщена в Таблице 1, где общий сырьевой поток с расходом $10\,000 \text{ Нм}^3/\text{ч}$ и с содержанием 69,2% H_2 и 30,8% CO_2 преобразуется в синтез-газ с соотношением H_2/CO 1,88 при использовании $3,21 \text{ Гкал}/\text{ч}$ в реакторе э-ОКВГ, что соответствует 1340 ккал на произведенный $\text{Нм}^3 \text{ CO}$.

Таблица 1

Поток	1	11
Т [°C]	450	1050
Р [бар и.д.]	11,5	10,0
Поток [$\text{Нм}^3/\text{ч}$]	10000	9988
Композиция [мол.%]		

H ₂	69,2	45,1
CO ₂	30,8	6,8
N ₂	0,0	0,0
CO	0,0	24,0
H ₂ O	0,0	24,1
CH ₄	0,0	0,1

Пример 2

В качестве первого примера изобретения в Таблице 2 проиллюстрировано сочетание э-ОКВГ и ТОР для получения синтез-газа, подходящего для синтеза Фишера-Тропша. В этом случае первичный поток с расходом 10 000 Нм³/ч и с содержанием 69,2% H₂ и 30,8% CO₂ разделяется на первый и второй сырьевые потоки с одинаковыми молярными размерами, которые подаются соответственно в э-ОКВГ и ТОР. Поток из э-ОКВГ снова позволяет произвести синтез-газ с соотношением H₂/CO 1,88 путем нагрева и преобразования газа в соответствии с законами термодинамики до 1050°C. ТОР работает при температуре на выходе 950°C (частично определяемой имеющимися температурами отопительных газов) и получает 50% молярного потока от первичного сырьевого потока (т.е. 50% объединенного молярного потока первого и второго сырьевых потоков). Первый и второй потоки продукта смешивают и используют в качестве источника тепла для ТОР, который охлаждает газ до 646°C, т.е. оставляет 196°C движущей силы для теплообмена. В целом, комбинированный синтез-газ имеет соотношение H₂/CO, равное 1,94, что немного выше, чем в сравнительном примере. Однако это также делается с использованием всего 689 ккал на Нм³ CO, что на 49% снижает мощность по сравнению со сравнительным примером. В частности, мощность, необходимая для э-ОКВГ, составляет 1,6 Гкал/ч, тогда как мощность, передаваемая на технологическую сторону ТОР, составляет 1,4 Гкал/ч, и таким образом на ТОР приходится 46% от общей мощности, передаваемой на технологическую сторону через два реактора. Это разделение мощности примерно отражает разделение объемов производства CO, где 49% производимого CO приходится на ТОР.

Активность углерода для реакции восстановления CO в объединенном (т.е. третьем) охлажденном газовом продукте составляет 6,2.

Таблица 2.

Поток	1	2	11	21	35
T [°C]	450	450	1050	950	646
P [бар и.д.]	11,5	11,5	10,0	10,0	9,5
Поток [Нм ³ /ч]	5000	5000	4994	4968	9962
Композиция [мол.%]					
H ₂	69,2	69,2	45,1	45,6	45,3
CO ₂	30,8	30,8	6,8	7,9	7,3
N ₂	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CO	0,0	0,0	24,0	22,8	23,4
H ₂ O	0,0	0,0	24,1	23,4	23,8
CH ₄	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2

Пример 3

В еще одном примере сочетание э-ОКВГ и ТОР показано в Таблице 3, иллюстрирующей, как ТОР может являться основной установкой производства СО. В этом случае основной сырьевой поток с расходом 10 000 Нм³/ч, и с содержанием 69,2% H₂ и 30,8% разделяется на первый и второй сырьевой потоки, на которые приходится соответственно 45% и 55% от общего молярного потока. Поток из э-ОКВГ снова позволяет произвести синтез-газ с соотношением H₂/CO 1,88 путем нагрева и преобразования газа в соответствии с законами термодинамики до 1050°C. ТОР работает при температуре на выходе 905°C (частично определяемой имеющимися температурами отопительных газов) и получает 55% молярного потока от первичного сырьевого потока (т.е. 55% объединенного молярного потока первого и второго сырьевых потоков). Первый и второй потоки продукта смешивают и используют в качестве источника тепла для ТОР, который охлаждает газ до 621°C, т.е. оставляет 171°C движущей силы для теплообмена. В целом, комбинированный синтез-газ имеет соотношение H₂/CO, равное 1,98, что немного выше, чем в сравнительном примере. Однако это также делается с использованием всего 637 ккал на Нм³ СО, что на 52% снижает мощность по сравнению со сравнительным примером. В частности, мощность, необходимая для э-ОКВГ, составляет 1,4 Гкал/ч, тогда как мощность, передаваемая на технологическую сторону ТОР, составляет 1,3 Гкал/ч, и таким образом на ТОР приходится 48% от

общей мощности, передаваемой на технологическую сторону через два реактора. Это разделение мощности примерно отражает разделение объемов производства СО, где 52% производимого СО приходится на ТОР.

Активность углерода для реакции восстановления СО в объединенном (т.е. третьем) охлажденном газовом продукте составляет 73.

Таблица 3.

Поток	1	2	11	21	35
T [°C]	450	450	1050	905	621
P [бар и.д.]	11,5	11,5	10,0	10,0	9,5
Поток [Нм ³ /ч]	4500	5500	4495	5420	9915
Композиция [мол.%]					
H ₂	69,2	69,2	45,1	45,4	45,2
CO ₂	30,8	30,8	6,8	8,6	7,8
N ₂	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CO	0,0	0,0	24,0	21,9	22,8
H ₂ O	0,0	0,0	24,1	23,4	23,7
CH ₄	0,0	0,0	0,1	0,7	0,4

Пример 4

В еще одном примере сочетание э-ОКВГ и ТОР показано в Таблице 4, иллюстрирующей, как можно организовать работу ТОР с очень низкой движущей силой для металлического запыливания. В этом случае основной сырьевой поток с расходом 10 000 Нм³/ч, и с содержанием 69,2% H₂ и 30,8% разделяется на первый и второй сырьевой потоки, на которые приходится соответственно 60% и 40% от общего молярного потока. Поток из э-ОКВГ снова позволяет произвести синтез-газ с соотношением H₂/CO 1,88 путем нагрева и преобразования газа в соответствии с законами термодинамики до 1050°C. ТОР работает при температуре на выходе 915°C (частично определяемой имеющимися температурами отопительных газов) и получает 40% молярного потока от первичного сырьевого потока (т.е. 40% объединенного молярного потока первого и второго сырьевых потоков). Первый и второй потоки продукта смешивают и используют в качестве источника тепла для ТОР, который охлаждает газ до 737°C. В целом, комбинированный синтез-газ

имеет соотношение H_2/CO , равное 1,95, что немного выше, чем в сравнительном примере. Однако это также делается с использованием всего 832 ккал на Hm^3 CO , что на 38% снижает мощность по сравнению со сравнительным примером. В частности, мощность, необходимая для э-ОКВГ, составляет 1,9 Гкал/ч, тогда как мощность, передаваемая на технологическую сторону ТОР, составляет 1,0 Гкал/ч, и таким образом на ТОР приходится 34% от общей мощности, передаваемой на технологическую сторону через два реактора. Это разделение мощности примерно отражает разделение объемов производства CO , где 38% производимого CO приходится на ТОР.

При существующем устройстве ТОР используется то обстоятельство, что первая реакционная зона (I) ТОР является экзотермической, что приводит к значительному повышению температуры на технологической стороне и, следовательно, также к более низкой температуре для охлаждения отопительного газа. Такой контроль означает, что активность углерода не может больше увеличиваться. Эти данные наглядно иллюстрируются температурой и фактическим профилем активности газообразного углерода на стороне нагрева ТОР, показанного на Фигуре 8. Здесь видно, что активность углерода для реакции восстановления CO не превышает 1,6.

Таблица 4.

Поток	1	2	11	21	35
T [°C]	450	450	1050	915	738
P [бар и.д.]	11,5	11,5	10,0	10,0	9,5
Поток [$Hm^3/ч$]	6000	4000	5993	3952	9945
Композиция [мол.%]					
H_2	69,2	69,2	45,1	45,5	45,2
CO_2	30,8	30,8	6,8	8,4	7,4
N_2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CO	0,0	0,0	24,0	22,1	23,2
H_2O	0,0	0,0	24,1	23,4	23,8
CH_4	0,0	0,0	0,1	0,6	0,3

Пример 5

В еще одном примере сочетание э-ОКВГ и ТОР показано в Таблице 5, иллюстрирующей, как эту конфигурацию можно использовать для производства синтез-газа, подходящего для производства метанола с высоким содержанием СО. В этом случае основной сырьевой поток с расходом 10 000 Нм³/ч и с содержанием Н₂ 75% и СО₂ 25% разделяется на первый и второй сырьевой поток, на которые приходится соответственно 60% и 40% общего молярного потока. Поток из э-ОКВГ позволяет произвести синтез-газ с соотношением Н₂/СО 2,6 путем нагрева и преобразования газа в соответствии с законами термодинамики до 1050°С. ТОР работает при температуре на выходе 930°С (частично определяемой имеющимися температурами отопительных газов) и получает 40% молярного потока от первичного сырьевого потока (т.е. 40% объединенного молярного потока первого и второго сырьевых потоков). Первый и второй потоки продукта смешивают и используют в качестве источника тепла для ТОР, который охлаждает газ до 750°С. В целом, комбинированный синтез-газ имеет соотношение Н₂/СО, равное 2,68 и модуль 2,0, подходящий для производства метанола. Это также делается с использованием 899 ккал на Нм³ СО. В частности, мощность, необходимая для э-ОКВГ, составляет 1,8 Гкал/ч, тогда как мощность, передаваемая на технологическую сторону ТОР, составляет 0,9 Гкал/ч, и таким образом на ТОР приходится 34% от общей мощности, передаваемой на технологическую сторону через два реактора. Это разделение мощности примерно отражает разделение объемов производства СО, где 38% производимого СО приходится на ТОР.

При существующем устройстве ТОР используется то обстоятельство, что первая реакционная зона (I) ТОР является экзотермической, что приводит к значительному повышению температуры на технологической стороне и, следовательно, также к более низкой температуре для охлаждения отопительного газа. Такой контроль означает, что активность углерода не может больше увеличиваться. Эти данные наглядно иллюстрируются температурой и фактической активностью газообразного углерода на стороне нагрева ТОР в данном примере, что показано на Фигуре 9. Здесь видно, что активность углерода для реакции восстановления СО не превышает 1,5.

Таблица 5.

Поток	1	2	11	21	35
T [°C]	450	450	1050	930	750
P [бар и.д.]	11,5	11,5	10,0	10,0	9,5
Поток [Нм ³ /ч]	6000	4000	5988	3941	9929
Композиция [мол.%]					
H ₂	75,0	75,0	54,0	53,8	53,9
CO ₂	25,0	25,0	4,2	5,3	4,7
N ₂	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CO	0,0	0,0	20,7	19,3	20,2
H ₂ O	0,0	0,0	20,9	20,8	20,9
CH ₄	0,0	0,0	0,1	0,7	0,4

Пример 6

В еще одном примере сочетание э-ОКВГ и ТОР показано в Таблице 6, иллюстрирующей, как эту конфигурацию можно использовать для переработки первичного сырья с содержанием метана. В этом случае основной сырьевой поток с расходом 10 000 Нм³/ч, и с содержанием 56,8% H₂, 22,7% CO₂, 11,4% CH₄ и 9,1% H₂O разделяется на первый и второй сырьевые потоки, на которые приходится соответственно 70% и 30% от общего молярного потока. Поток из э-ОКВГ позволяет произвести синтез-газ с соотношением H₂/CO 2,37 путем нагрева и преобразования газа в соответствии с законами термодинамики до 1050°C. ТОР работает при температуре на выходе 912°C (частично определяемой имеющимися температурами отопительных газов) и получает 30% молярного потока от первичного сырьевого потока (т.е. 30% объединенного молярного потока первого и второго сырьевых потоков). Первый и второй потоки продукта смешивают и используют в качестве источника тепла для ТОР, который охлаждает газ до 682°C. В целом, комбинированный синтез-газ имеет соотношение H₂/CO, равное 2,41. Это делается с использованием 1456 ккал на Нм³ CO, и часть этой мощности идет на более эндотермическую реакцию риформинга. В частности, мощность, необходимая для э-ОКВГ, составляет 4,2 Гкал/ч, тогда как мощность, передаваемая на технологическую сторону ТОР, составляет 1,4 Гкал/ч, и таким образом на ТОР приходится 26% от общей мощности, передаваемой на технологическую сторону

через два реактора. Это разделение мощности примерно отражает разделение объемов производства СО, где 27% производимого СО приходится на ТОР.

При существующем устройстве ТОР используется то обстоятельство, что первая реакционная зона (I) ТОР является экзотермической, что приводит к значительному повышению температуры на технологической стороне и, следовательно, также к более низкой температуре для охлаждения отопительного газа. Такой контроль означает, что активность углерода не может больше увеличиваться. Эти данные наглядно иллюстрируются температурой и фактическим профилем активности газообразного углерода на стороне нагрева ТОР в данном примере, что показано на Фигуре 10. Здесь можно видеть, что активность углерода для реакции восстановления СО не превышает 0,3.

Таблица 6.

Поток	1	2	11	21	35
Т [°С]	450	450	1050	912	682,53428
Р [бар и.д.]	11,5	11,5	10,0	10,0	9,5
Поток [Нм³/ч]	7000	3000	8553	3542	12095
Композиция [мол.%]					
Водород	56,8	56,8	58,2	56,2	57,6
Диоксид углерода	22,7	22,7	3,1	4,4	3,5
Азот	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Метан	11,4	11,4	0,2	2,0	0,7
Вода	9,1	9,1	13,9	14,9	14,2
Монооксид углерода	0,0	0,0	24,6	22,5	24,0

Настоящее изобретение описано со ссылкой на несколько аспектов и вариантов осуществления изобретения. Эти аспекты и варианты осуществления могут комбинироваться по желанию специалиста в данной области, оставаясь при этом в пределах объема патентной формулы изобретения.

Формула изобретения

1. Способ преобразования первого сырьевого газового потока (2), содержащего CO_2 и H_2 , в поток (21) синтез-газа посредством реакции конверсии CO_2 указанного первого сырьевого газового потока (2) в теплообменном реакторе, ТОР (20), при этом указанный ТОР (20) содержит:

по меньшей мере, одну технологическую сторону (20А) и, по меньшей мере, одну сторону (20В) нагрева, причем технологическая сторона (20А) ТОР (20) содержит впускное отверстие (28) технологической стороны и выпускное отверстие (29) технологической стороны,

причем технологическая сторона (20А) ТОР (20) содержит первую реакционную зону (I), расположенную ближе всего к входному отверстию (28) технологической стороны,

и причем технологическая сторона (20А) ТОР (20) содержит вторую реакционную зону (II), расположенную ближе всего к выпускному отверстию (29) технологической стороны,

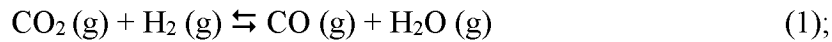
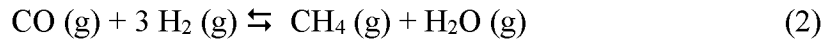
причем сторона (20В) нагрева ТОР содержит впускное отверстие (26) стороны нагрева и, при необходимости, выпускное отверстие (27) стороны нагрева,

при этом указанная, по меньшей мере, одна технологическая сторона (20А) и указанная, по меньшей мере, одна сторона (20В) нагрева расположены таким образом, что имеется возможность передачи тепла от стороны (20В) нагрева, по меньшей мере, к части указанной технологической стороны (20А),

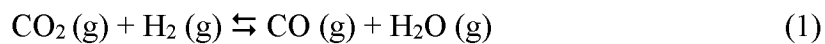
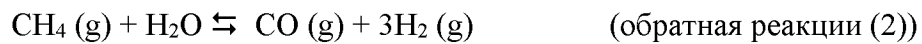
при этом указанный способ включает следующие этапы:

- подачу первого сырьевого газового потока (2) на технологическую сторону (20А) ТОР (20) через указанное входное отверстие (28) технологической стороны;
- подачу нагревательной жидкости (11) на сторону (20В) нагрева ТОР через указанное впускное отверстие (26) стороны нагрева и обеспечение передачи тепла от указанной нагревательной жидкости (11) на технологическую сторону (20А) ТОР (20);

- проведение общей экзотермической реакции указанного первого сырьевого газового потока (2) в первой реакционной зоне (I), причем общая экзотермическая реакция включает, по меньшей мере, следующие реакции, которые протекают слева направо:



- проведение общей эндотермической реакции газа, полученного из указанной первой реакционной зоны (I), во второй реакционной зоне (II), при этом общая эндотермическая реакция включает, по меньшей мере, следующие реакции, которые протекают слева направо:



- выпуск потока (21) синтез-газа с технологической стороны (20А) через выпускное отверстие (29) технологической стороны, при необходимости, в смеси с охлажденной жидкостью (31), и
- при необходимости, выпуск охлажденной жидкости (31) с указанной стороны (20В) нагрева через выпускное отверстие (27) стороны нагрева.

2. Способ по п. 1, **отличающийся тем**, что температура газа в первой реакционной зоне (I) находится в диапазоне 300 - 800°C.

3. Способ по любому из пп. 1 - 2, **отличающийся тем**, что температура газа во второй реакционной зоне (II) находится в диапазоне 600 - 1200°C.

4. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что поток (21) синтез-газа и охлажденная жидкость (31) объединяют с получением третьего потока (35) продукта.

5. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что нагревательную жидкость (11) и, по меньшей мере, часть потока (21) синтез-газа, выходящего из второй реакционной зоны, объединяют внутри ТОР (20) и рециркулируют в виде, по меньшей мере, части нагревательной жидкости (11).

6. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что условия способа регулируют таким образом, чтобы обеспечить температуру

потока (21) синтез-газа и/или охлажденной жидкости (31), и/или третьего потока (35) продукта на соответствующем выходном отверстии ТОР (20), которая выше критического предела металлического запыливания.

7. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что температура на выходе охлажденного потока (21) синтез-газа и/или охлажденной жидкости (31), и/или третьего потока (35) продукта составляет 500°C или выше, 600°C или выше, 700°C или выше, или 800°C или выше.

8. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что поток (21) синтез-газа и/или охлажденная жидкость (31), и/или третий поток (35) продукта при указанной охлажденной температуре на выходе имеет фактическую активность углерода в газе реакции восстановления СО ниже 100, или ниже 50, или ниже 10, или ниже 5, или ниже 1.

9. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что соотношение H_2/CO потока (21) синтез-газа и/или охлажденной жидкости (31), и/или третьего потока (35) продукта находится в диапазоне 0,5 - 3,0, например, в диапазоне 1,9 - 2,1, или в диапазоне 2 - 3.

10. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что соотношение $(H_2-CO_2)/(CO+CO_2)$ потока (21) синтез-газа и/или охлажденной жидкости (31), и/или третьего потока (35) продукта находится в диапазоне 1,5 - 2,5, например, в диапазоне 1,9 - 2,1, или в диапазоне 2 - 2,05.

11. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что соотношение H_2 и CO_2 может составлять 1 - 5, например, 2 - 4, 2 - 3 или 2,2 - 2,5, или 2,8 - 3,5, или 2,8 - 3,2.

12. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что молярное соотношение CH_4/CO_2 в первом сырьевом потоке предпочтительно составляет менее 0,5, например, менее 0,2, предпочтительно менее 0,1.

13. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что первый сырьевой газовый поток (2) дополнительно содержит метан, предпочтительно до 3 мол.%, или до 8 мол.%, или до 12 мол.% метана.

14. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что нагревательную жидкость (11) подают из электрического реактора (10А) ОКВГ (э-ОКВГ), огневого реактора (10В) ОКВГ или автотермического реактора (10С) ОКВГ, предпочтительно из электрического реактора (10А) ОКВГ (э-ОКВГ).

15. Способ по любому из предшествующих пунктов, **отличающийся тем**, что нагревательная жидкость (11) содержит CO_2 и H_2 .

16. Теплообменный реактор (ТОР) (20) преобразования первого сырьевого газового потока (2), содержащего CO_2 и H_2 , в поток (21) синтез-газа посредством реакции конверсии CO_2 указанного первого сырьевого газового потока (2), при этом указанный ТОР (20) содержит:

по меньшей мере, одну технологическую сторону (20А) и, по меньшей мере, одну сторону (20В) нагрева, причем технологическая сторона (20А) ТОР (20) содержит впускное отверстие (28) технологической стороны и выпускное отверстие (29) технологической стороны,

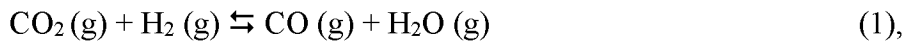
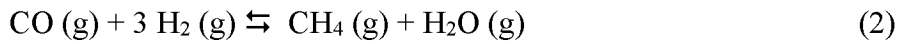
при этом указанное входное отверстие (28) технологической стороны выполнено с возможностью подачи указанного первого сырьевого газового потока (2), содержащего CO_2 и H_2 , на указанную технологическую сторону (20А),

при этом указанное выпускное отверстие (28) технологической стороны выполнено с возможностью вывода указанного потока (21) синтез-газа с указанной технологической стороны (20А), при необходимости, в смеси с охлажденной жидкостью (31),

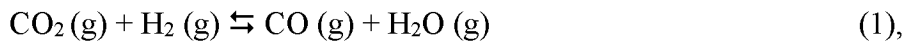
причем технологическая сторона (20А) ТОР (20) содержит первую реакционную зону (I), расположенную ближе всего к входному отверстию (28) технологической стороны,

и причем технологическая сторона (20А) ТОР (20) содержит вторую реакционную зону (II), расположенную ближе всего к выпускному отверстию (29) технологической стороны,

причем первая реакционная зона (I) предназначена для проведения общей экзотермической реакции указанного первого сырьевого газового потока (2), а общая экзотермическая реакция включает, по меньшей мере, следующие реакции, которые протекают слева направо:



причем вторая реакционная зона (II) предназначена для проведения общей эндотермической реакции газа из указанной первой реакционной зоны (I), причем общая эндотермическая реакция включает, по меньшей мере, следующие реакции, которые протекают слева направо:



причем сторона (20B) нагрева TOP содержит впускное отверстие (26) стороны нагрева и, при необходимости, выпускное отверстие (27) стороны нагрева,

при этом указанное впускное отверстие (26) стороны нагрева выполнено с возможностью подачи нагревательной жидкости (11) на указанную сторону (20B) нагрева,

при необходимости, причем указанное выпускное отверстие (27) стороны нагрева выполнено с возможностью вывода охлажденной жидкости (31) из указанной стороны (20B) нагрева,

при этом указанная, по меньшей мере, одна технологическая сторона (20A) и указанная, по меньшей мере, одна сторона (20B) нагрева расположены таким образом, что имеется возможность передачи тепла от стороны (20B) нагрева, по меньшей мере, к части указанной технологической стороны (20A).

17. TOP (20) по п. 16 или способ по любому из пп. 1 - 15, **отличающийся тем**, что технологическая сторона (20A) TOP (20) имеет общую протяженность от входного отверстия (28) технологической стороны до выпускного отверстия (29) технологической стороны, и причем первая реакционная зона (I) имеет протяженность менее 50%, например, менее 30%, предпочтительно менее 20%, более предпочтительно менее 10% от общей длины технологической стороны (20A) TOP (20).

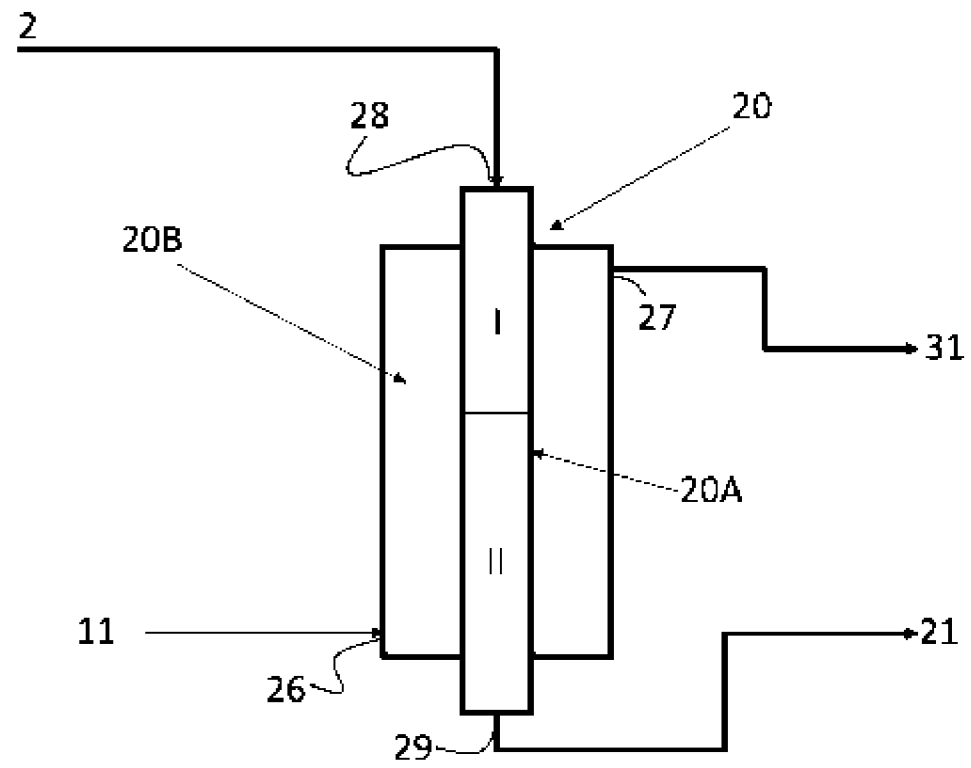
18. TOP (20) по любому из пп. 16 - 17 или способ по любому из пп. 1 - 15, **отличающийся тем**, что первый катализатор расположен, по меньшей мере, в первой реакционной зоне (I) TOP (20).

19. ТОР (20) по любому из пп. 16 - 18 или способ по любому из пп. 1 - 15, **отличающийся тем**, что по меньшей мере, концевая секция технологической стороны (20А) первой реакционной зоны (I), которая расположена ближе всего к входному отверстию (28) технологической стороны ТОР (20) и имеет протяженность до 25% от общей протяженности технологической стороны (20А) первой реакционной зоны (I) в направлении от входного отверстия (28) технологической стороны к выходному отверстию (29) технологической стороны, не находится в непосредственном контакте со стороной (20В) нагрева ТОР, в результате чего эта концевая секция первой реакционной зоны (I) нагревается в первую очередь за счет адиабатического повышения температуры, вызванного экзотермической реакцией в первой реакционной зоне (I).

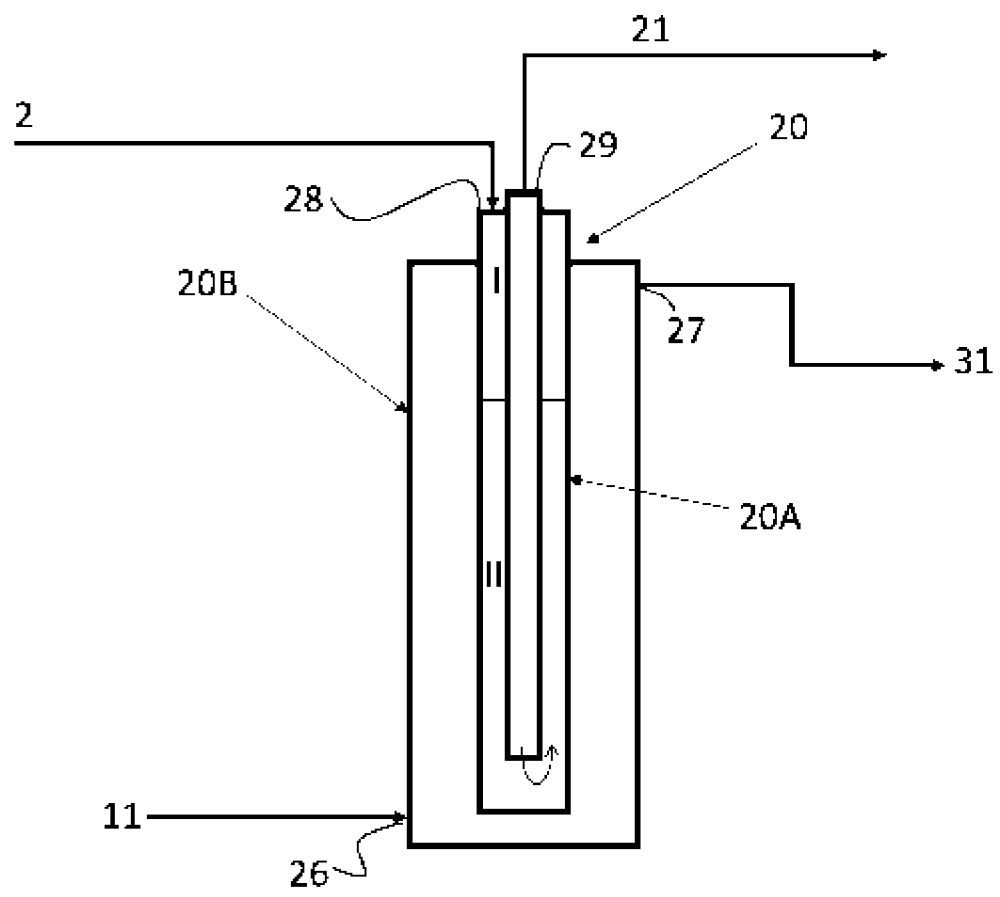
20. ТОР (20) по любому из пп. 16 - 19 или способ по любому из пп. 1 - 15, **отличающийся тем**, что ТОР представляет собой ТОР байонетного типа.

21. ТОР (20) по любому из пп. 16 - 20 или способ по любому из пп. 1 - 15, **отличающийся тем**, что ТОР имеет, по меньшей мере, две технологические стороны (20А).

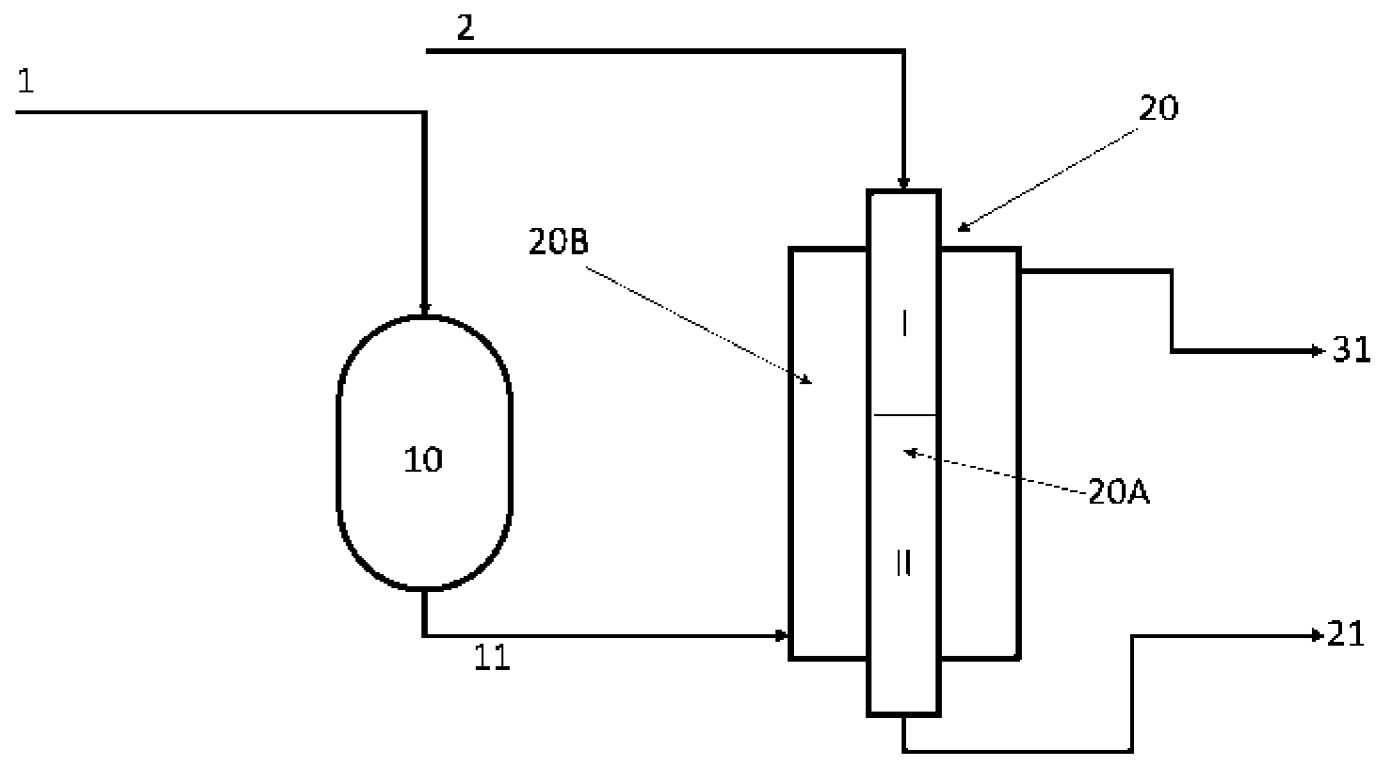
22. ТОР (20) по любому из пп. 16 - 21 или способ по любому из пп. 1 - 15, **отличающийся тем**, что ТОР имеет, по меньшей мере, две стороны (20В) нагрева.



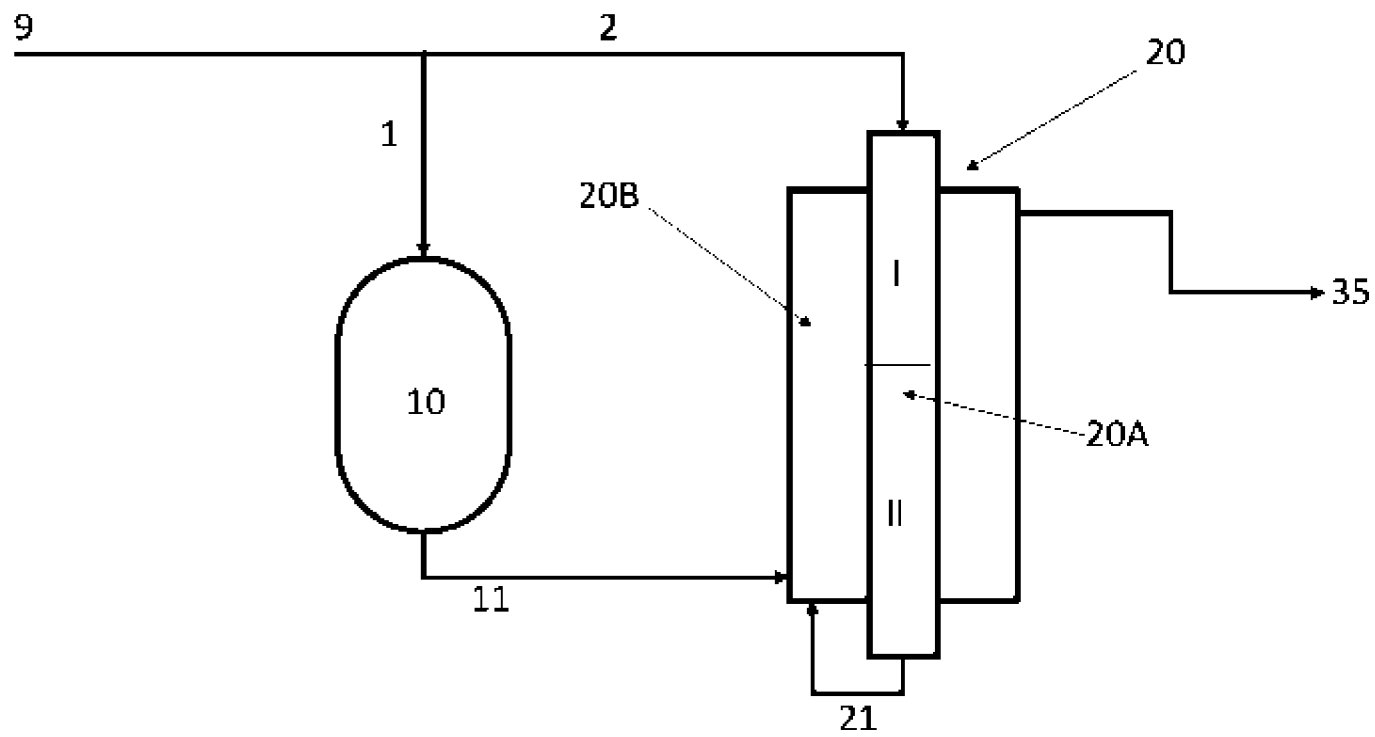
Фиг. 1



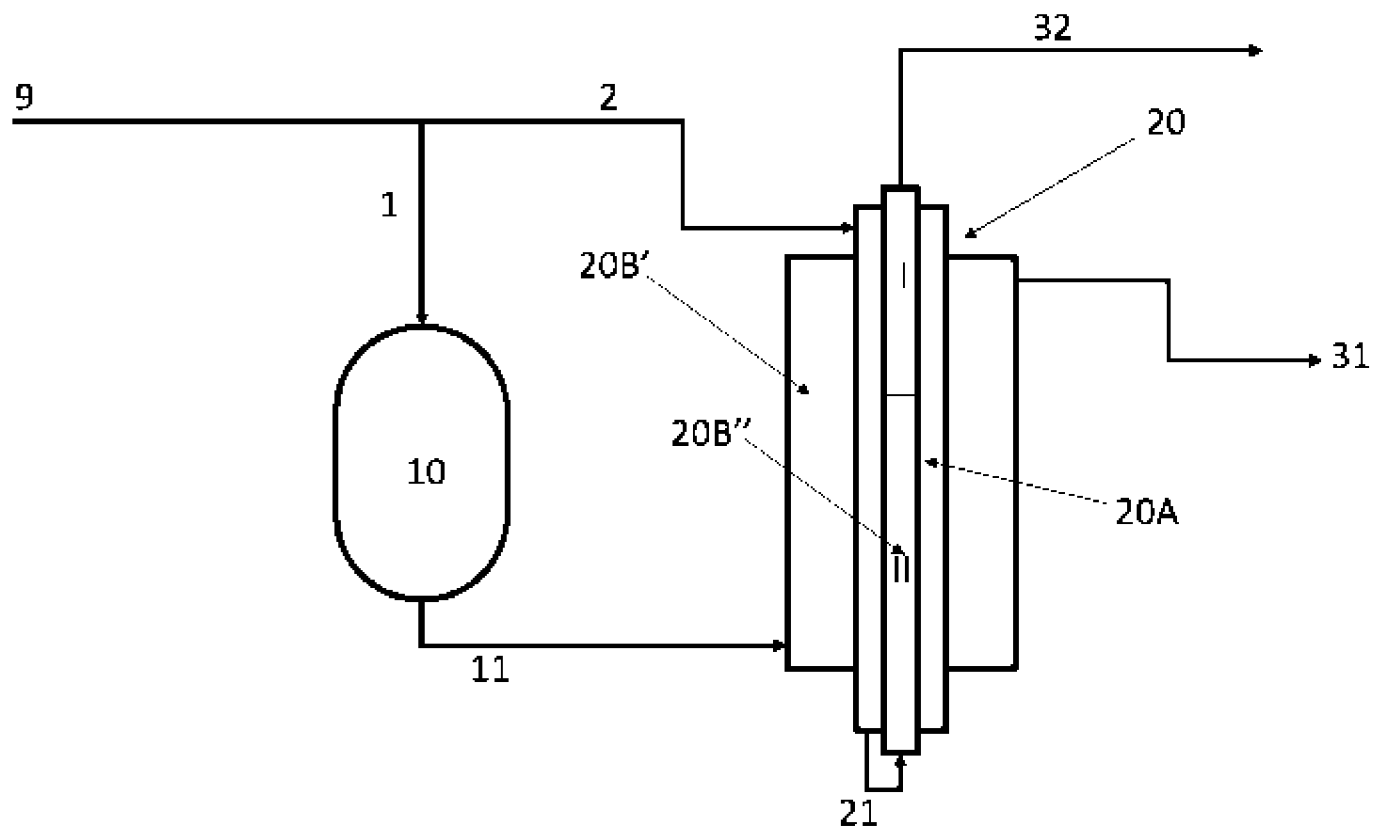
Фиг. 2



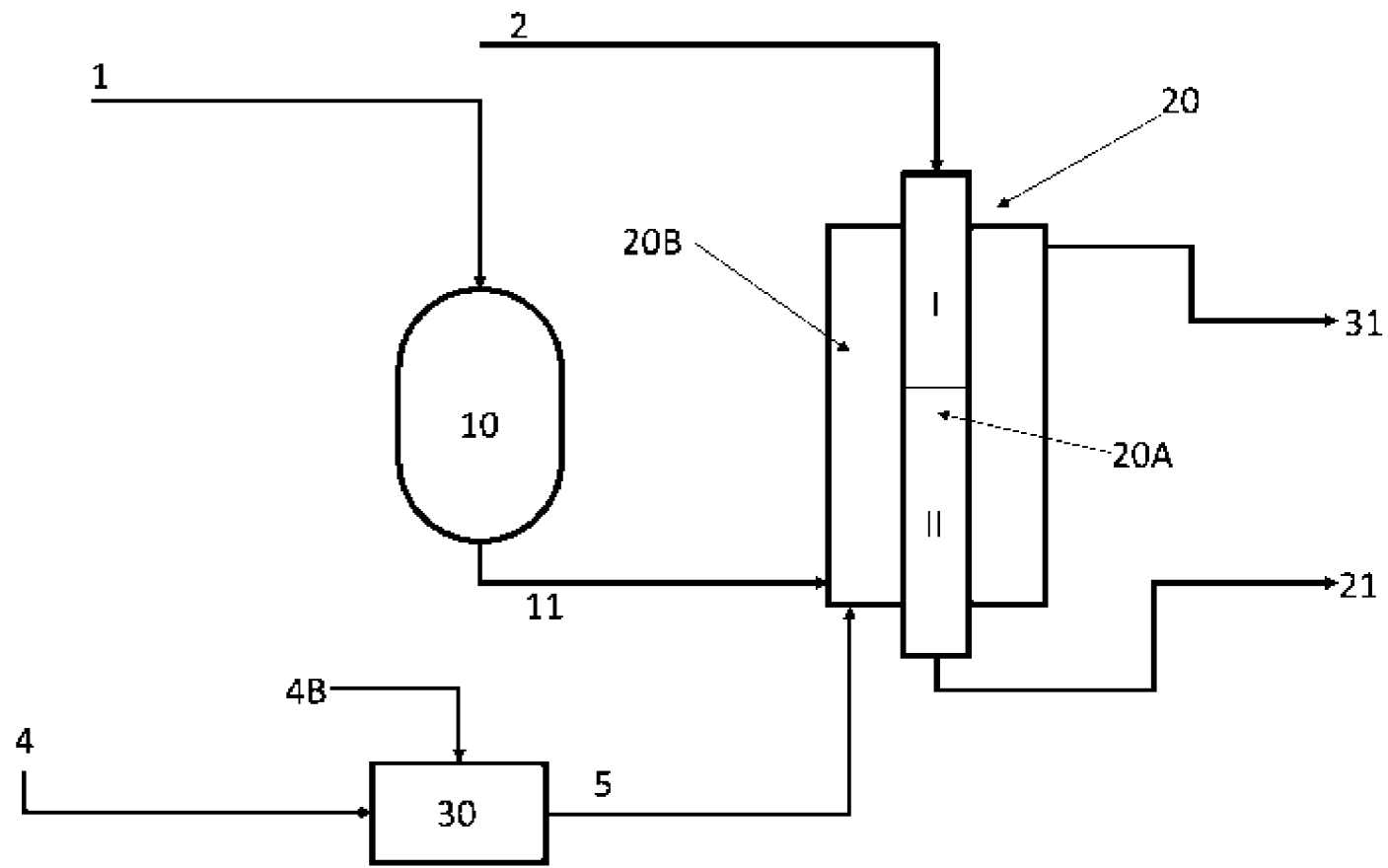
Фиг. 3



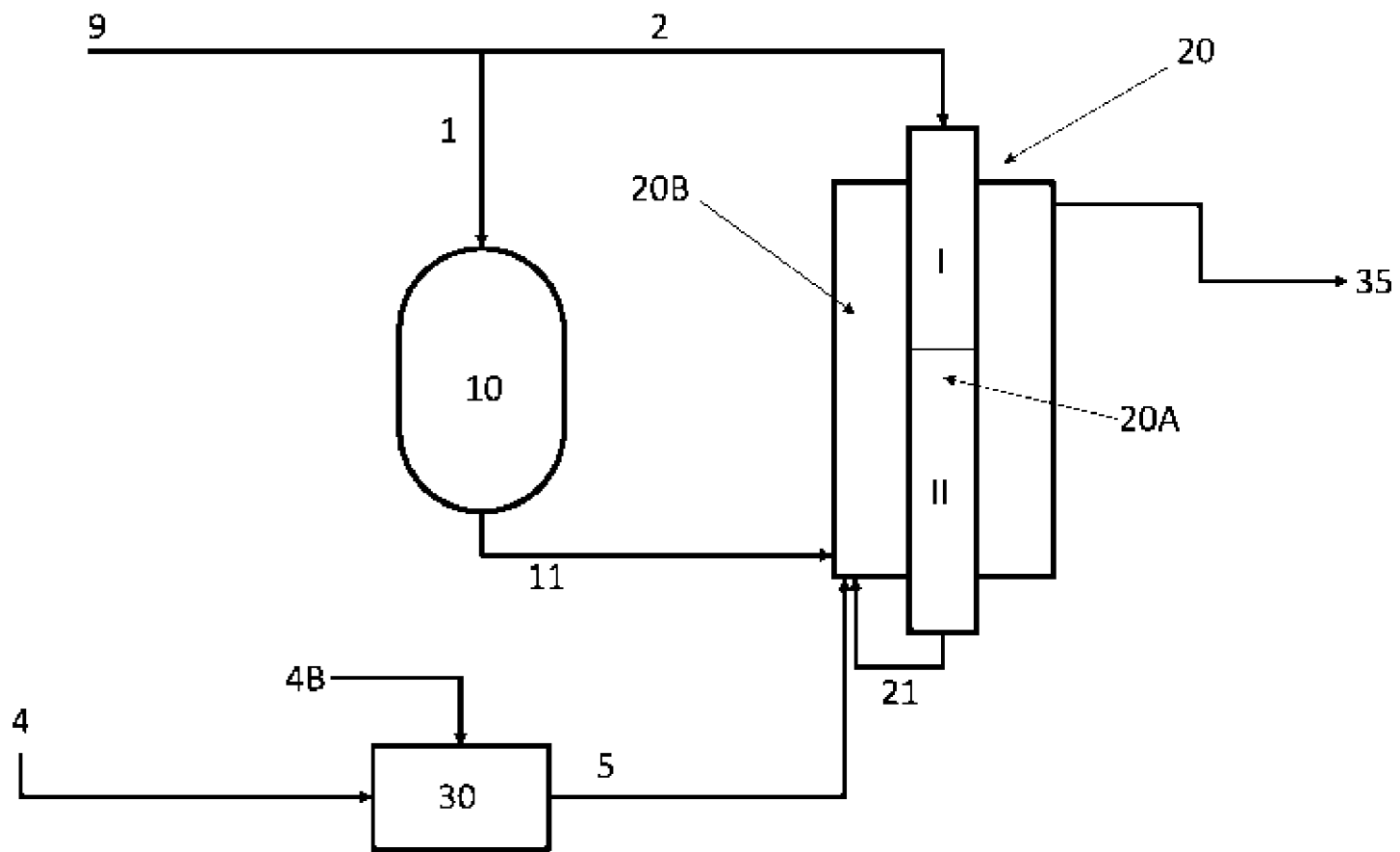
Фиг. 4



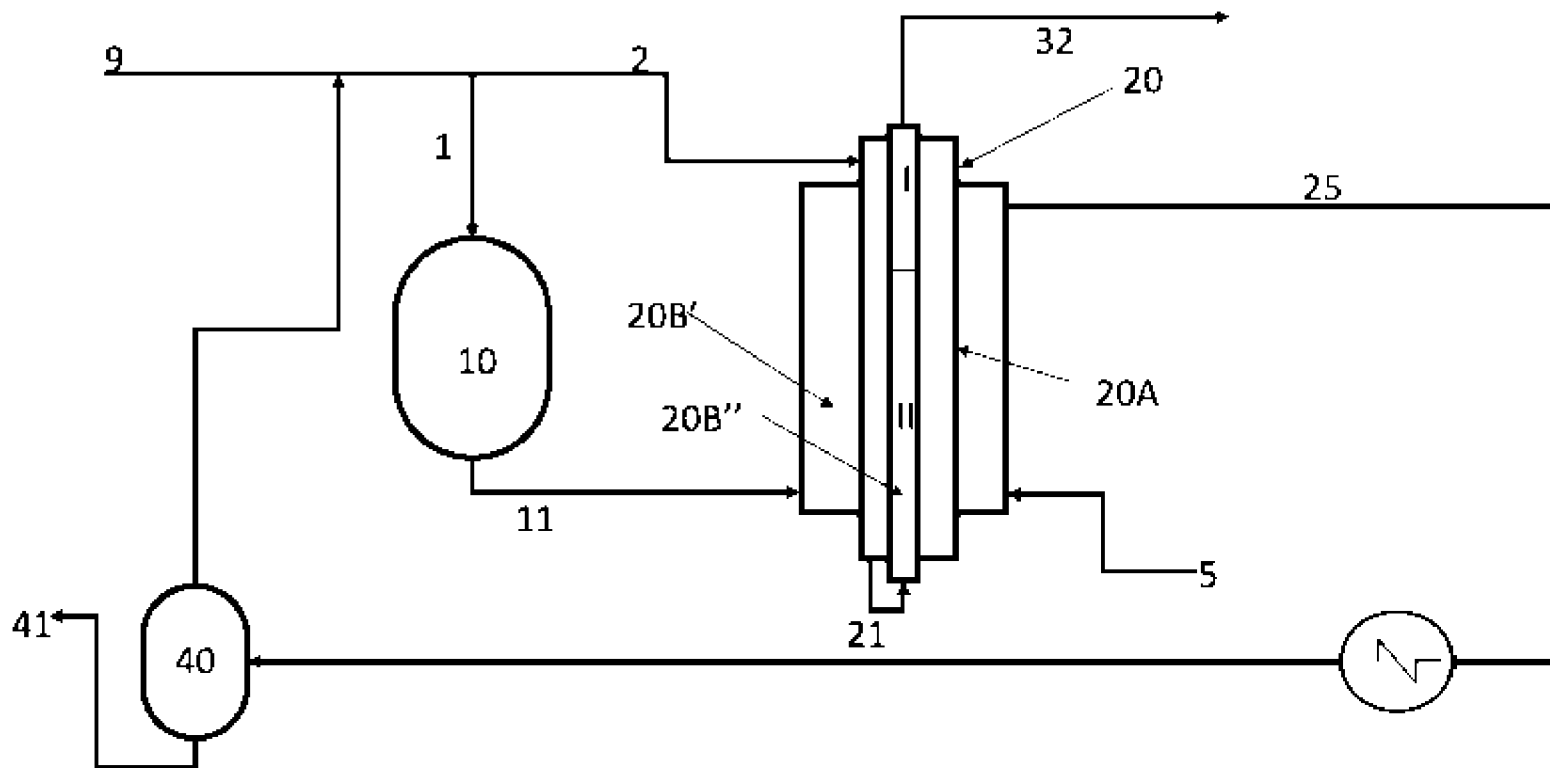
Фиг. 5



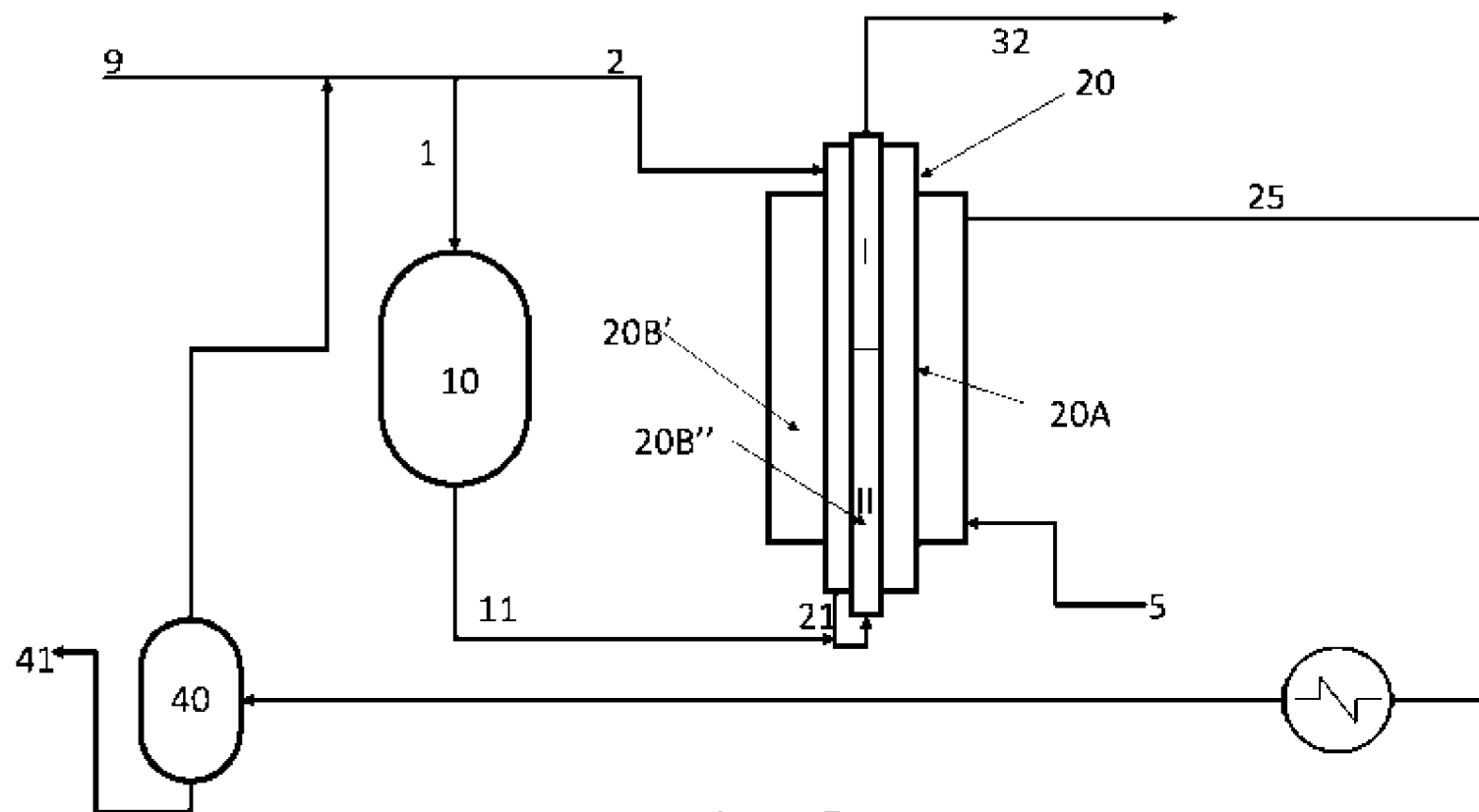
Фиг. 6



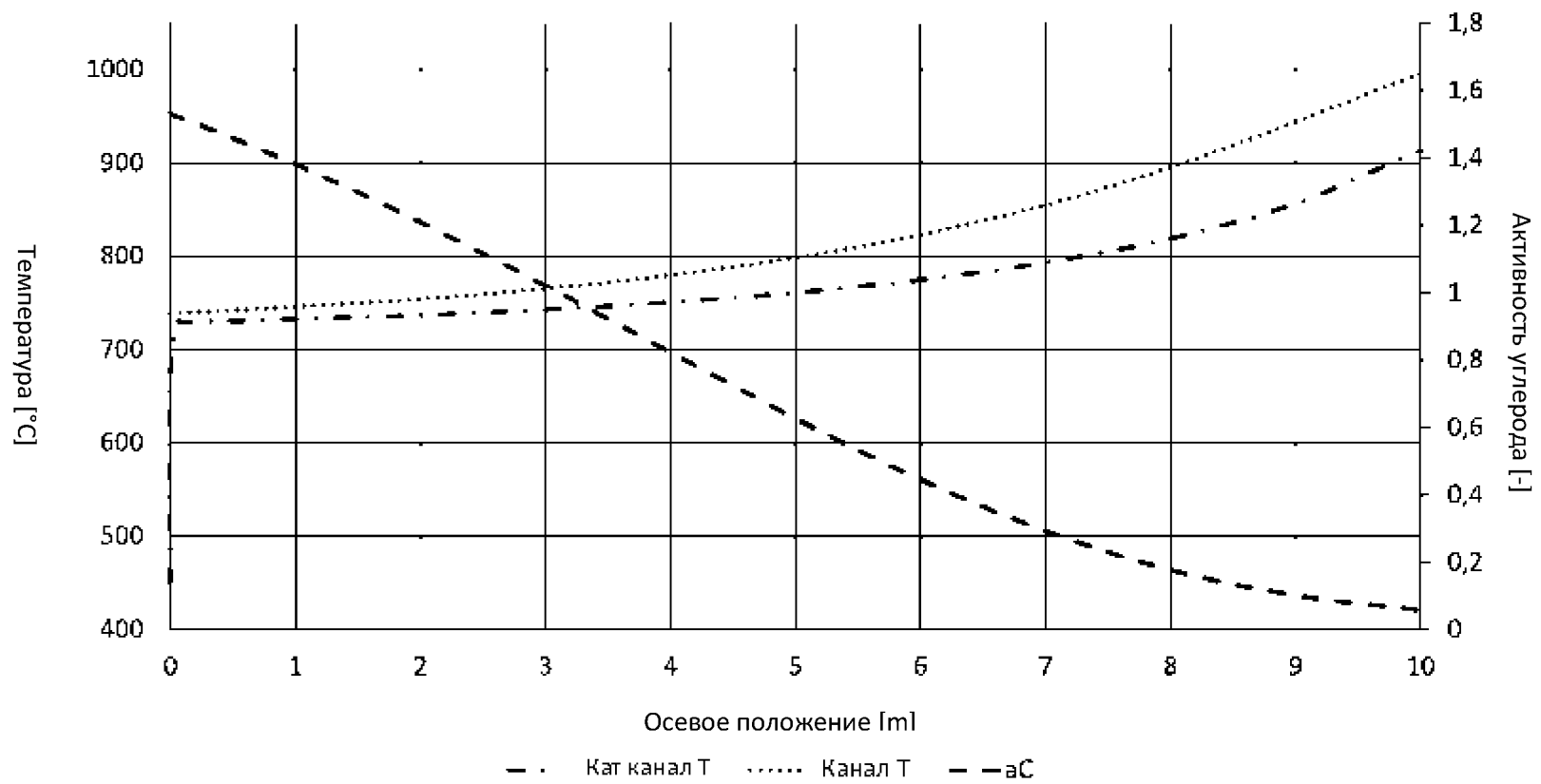
Фиг. 7



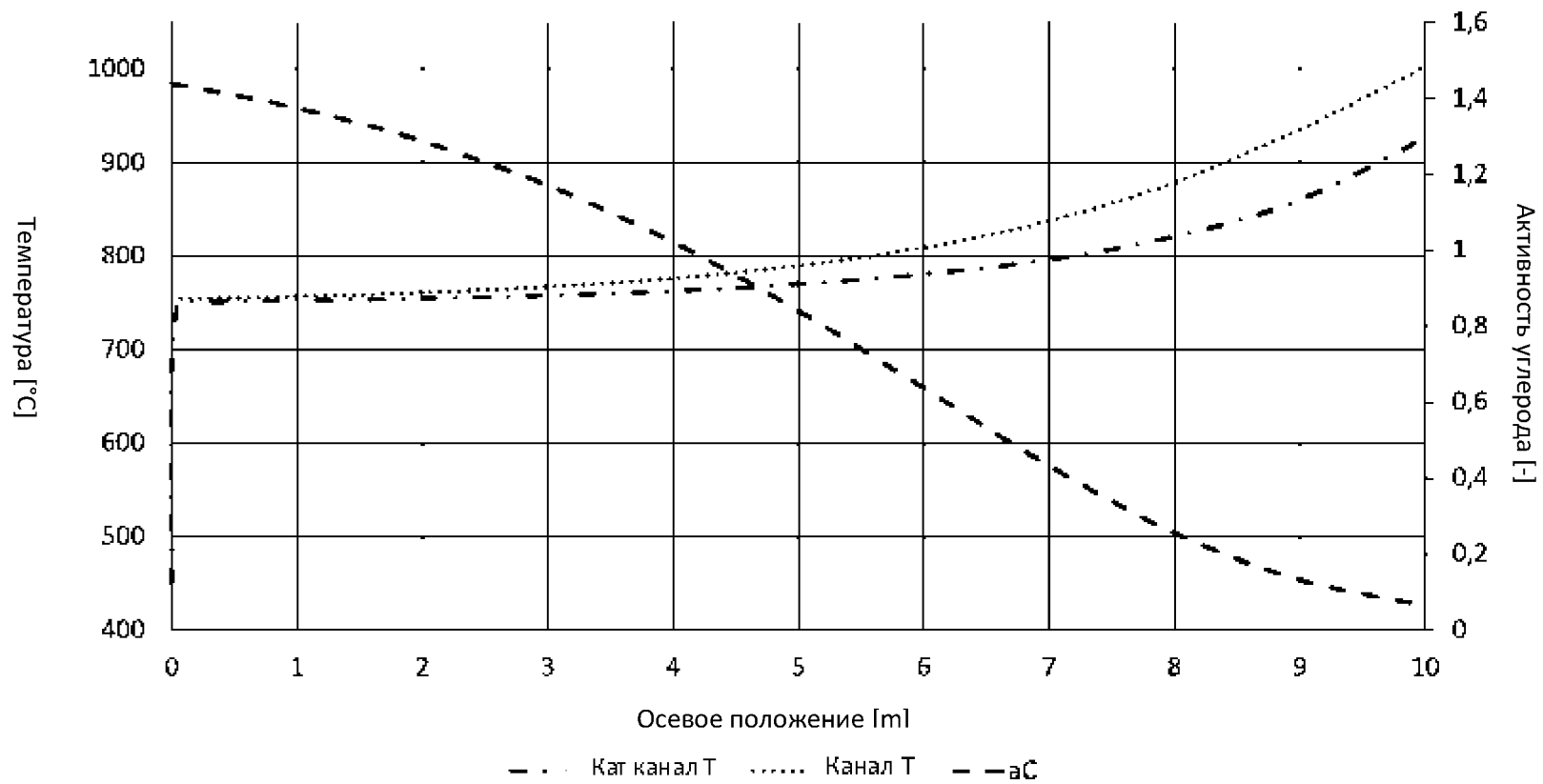
Фиг. 7А



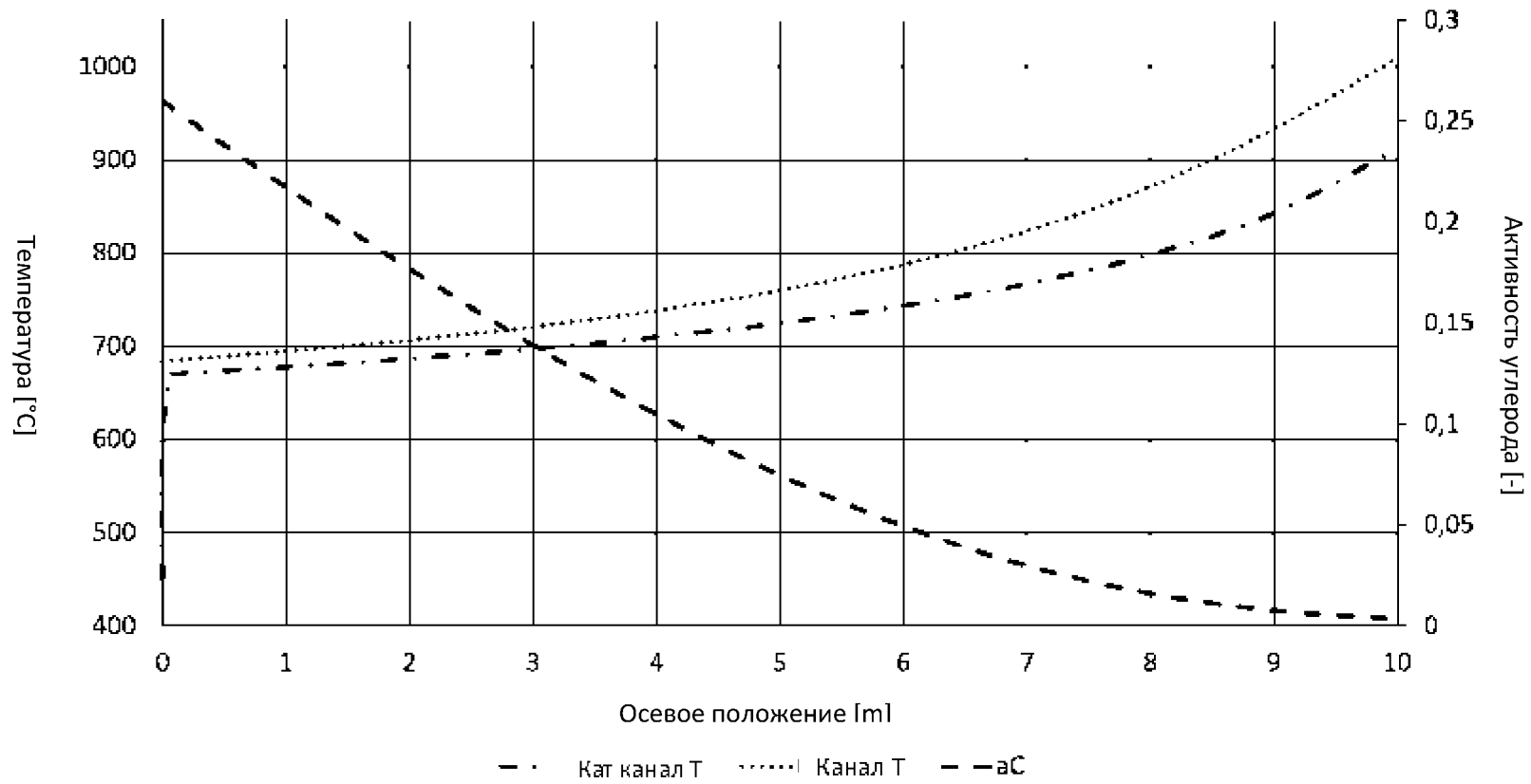
Фиг. 7В



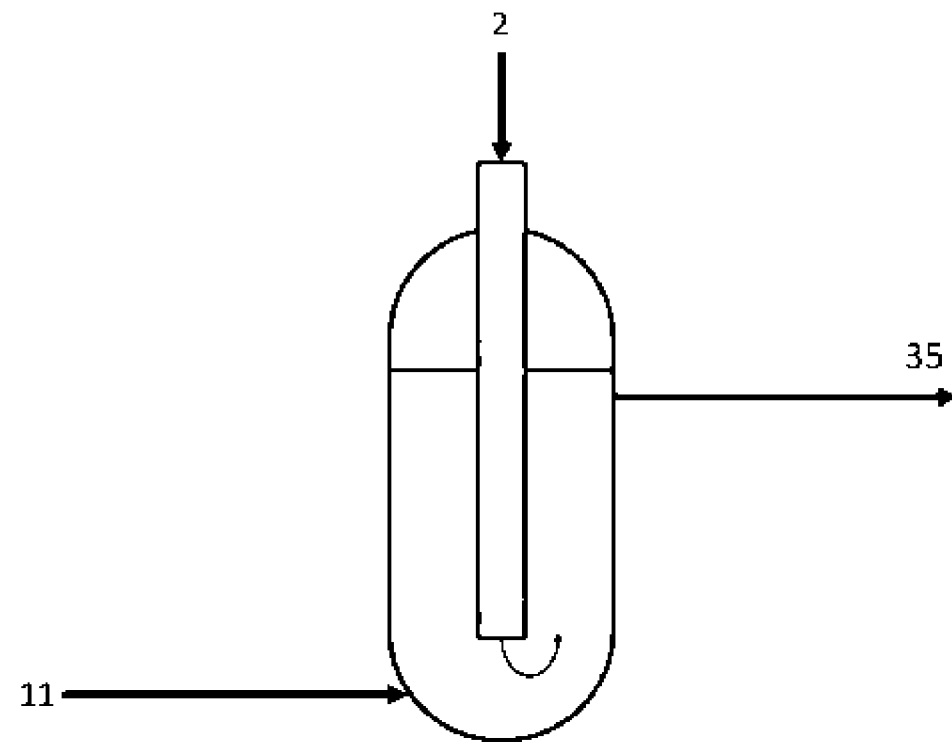
Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11