

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202091884 (13) A1

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2020.10.16(51) Int. Cl. B01D 53/62 (2006.01)  
B01D 53/32 (2006.01)(22) Дата подачи заявки  
2019.02.12

## (54) СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНВЕРСИИ УГЛЕРОДА

(31) 62/629,163

(72) Изобретатель:

(32) 2018.02.12

Михалцеа Кристоф (NZ), Конрадо

(33) US

Роберт, Бурдакос Николас, Ли

(86) PCT/US2019/017667

Сюелян, Симпсон Шон (US)

(87) WO 2019/157507 2019.08.15

(74) Представитель:

(71) Заявитель:

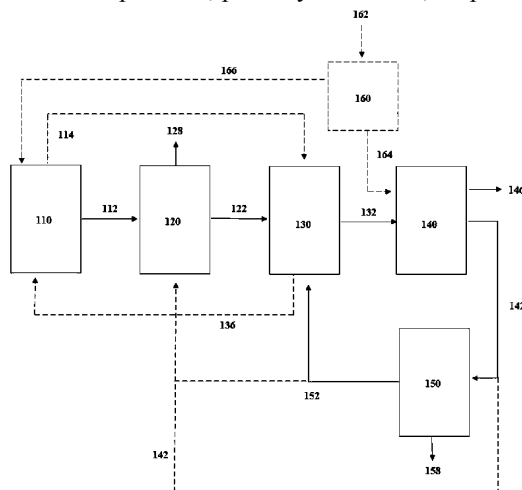
Хмара М.В., Новоселова С.В.,

ЛАНЦАТЕК, ИНК. (US)

Липатова И.И., Пантелеев А.С.,

Осипов К.В. (RU)

(57) В настоящем изобретении предложена интеграция процесса, расходующего CO, такого как процесс ферментации газа, с процессом электролиза CO<sub>2</sub>. В настоящем изобретении возможно использовать CO<sub>2</sub>-содержащий газообразный субстрат, полученный в промышленном процессе, и один или более модулей очистки для удаления по меньшей мере одного компонента из CO<sub>2</sub>-содержащего газообразного субстрата перед подачей газообразного субстрата в модуль электролиза CO<sub>2</sub>. Настоящее изобретение может дополнительно включать один или более модулей изменения давления, один или более модулей концентрирования CO<sub>2</sub>, один или более модулей выделения O<sub>2</sub> и/или модуль электролиза H<sub>2</sub>. Эффективность конверсии углерода увеличивается благодаря рециркуляции CO<sub>2</sub>, полученного в процессе, расходующем CO, в процесс электролиза CO<sub>2</sub>.



A1

202091884

202091884

A1

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНВЕРСИИ УГЛЕРОДА

### ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

Настоящее изобретение относится к процессам и способам повышения эффективности конверсии углерода. В частности, настоящее изобретение относится к комбинации процесса, расходующего монооксид углерода, с промышленным процессом, причем газ, образующийся в результате промышленного процесса, подвергают очистке и конверсии, а диоксид углерода, образующийся в процессе, расходующем монооксид углерода, рециркулируют для повышения выхода продукта.

### УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

На долю диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) приходится примерно 76% мировых выбросов парниковых газов, обусловленных деятельностью человека, а остальное составляет метан (16%), закись азота (6%) и фторсодержащие газы (2%) (по данным управления по охране окружающей среды США). Снижение выбросов парниковых газов, в частности, CO<sub>2</sub>, является жизненно необходимым для предотвращения прогрессирования глобального потепления и сопутствующих изменений климата и погоды.

Давно известно, что каталитические процессы, такие как процесс Фишера-Тропша, можно использовать для конверсии газов, содержащих CO<sub>2</sub>, монооксид углерода (CO) и/или водород (H<sub>2</sub>), в различные виды топлива и химических соединений. Однако недавно в качестве альтернативной платформы для биологического улавливания таких газов разработана газовая ферментация. В частности, показано, что C1-поглощающие микроорганизмы превращают газы, содержащие CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> и/или H<sub>2</sub>, в такие продукты, как этанол и 2,3-бутандиол.

Такие газы могут быть получены, например, из промышленных процессов, включая выбросы газов из процессов ферментации углеводов, ферментации газов, получения цемента, получения пульпы и бумаги, сталеварения, переработки нефти и сопутствующих процессов, получения нефтехимических продуктов, производства кокса, анаэробного или аэробного разложения, газификации, добычи природного газа, добычи нефти, металлургических процессов, производства и/или очистки алюминия, меди и/или сплавов железа, геологических месторождений, процессов Фишера-Тропша, получения метанола, пиролиза, парового риформинга метана, сухого риформинга метана, частичного окисления биогаза или природного газа и автотермического риформинга биогаза или природного газа.

Для оптимизации применения указанных газов в процессах, расходующих CO, таких как процессы ферментации с поглощением C1, может потребоваться комбинация

очистки и конверсии промышленного газа. Соответственно, сохраняется потребность в усовершенствованной интеграции промышленных процессов с процессами, расходующими СО, включая способы очистки и конверсии промышленных газов для оптимизации эффективности конверсии углерода.

5

## КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СУЩНОСТИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

На этом фоне настоящее изобретение обеспечивает определенные преимущества и достижения по сравнению с известным уровнем техники.

Несмотря на то, что настоящее изобретение, описанное в данном документе, не ограничено конкретными преимуществами или функциональными особенностями, в настоящем изобретении предложен способ повышения эффективности конверсии углерода, причем указанный способ включает подачу СО<sub>2</sub>-содержащего газообразного субстрата из промышленного процесса в первый модуль очистки для удаления по меньшей мере одного компонента из СО<sub>2</sub>-содержащего газообразного субстрата с получением первого потока газа очищенного СО<sub>2</sub>, подачу первого потока газа очищенного СО<sub>2</sub> в модуль электролиза СО<sub>2</sub> для конверсии по меньшей мере части первого потока газа очищенного СО<sub>2</sub> с получением потока с повышенным содержанием СО и первого потока с повышенным содержанием О<sub>2</sub>, и подачу по меньшей мере части потока с повышенным содержанием СО в процесс, расходующий СО.

10  
15  
20

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, СО<sub>2</sub>-содержащий газообразный субстрат из промышленного процесса сначала подают в модуль изменения давления с получением сжатого СО<sub>2</sub>-содержащего газового потока, и сжатый СО<sub>2</sub>-содержащий газовый поток подают в первый модуль очистки.

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, предложенный способ дополнительно включает одно или более из подачи по меньшей мере части первого потока с повышенным содержанием О<sub>2</sub> непосредственно в промышленный процесс и подачи по меньшей мере части первого потока с повышенным содержанием О<sub>2</sub> в модуль выделения О<sub>2</sub> с получением второго потока с повышенным содержанием О<sub>2</sub> и потока с пониженным содержанием О<sub>2</sub>.

25  
30

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, предложенный способ дополнительно включает одно или более из подачи по меньшей мере части второго потока с повышенным содержанием О<sub>2</sub> в промышленный процесс, подачи по меньшей мере части потока с пониженным содержанием О<sub>2</sub> в модуль электролиза СО<sub>2</sub>, и подачи по меньшей мере части потока с пониженным содержанием О<sub>2</sub> в процесс, расходующий СО.

35

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, предложенный способ дополнительно включает подачу по меньшей мере части  $\text{CO}_2$ -содержащего газообразного субстрата из промышленного процесса и/или по меньшей мере части первого потока газа очищенного  $\text{CO}_2$  в первый модуль концентрирования  $\text{CO}_2$  с получением первого концентрированного потока  $\text{CO}_2$  и первого потока с пониженным содержанием  $\text{CO}_2$ .

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, предложенный способ дополнительно включает подачу по меньшей мере части первого концентрированного потока  $\text{CO}_2$  в один или более из первого модуля очистки и модуля электролиза  $\text{CO}_2$ .

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, первый поток с пониженным содержанием  $\text{CO}_2$  содержит  $\text{CO}$  и/или  $\text{H}_2$ , и предложенный способ дополнительно включает подачу по меньшей мере части первого потока с пониженным содержанием  $\text{CO}_2$  в процесс, расходующий  $\text{CO}$ .

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, предложенный способ включает подачу по меньшей мере части потока с повышенным содержанием  $\text{CO}$  в модуль изменения давления с получением сжатого потока  $\text{CO}$  и подачу по меньшей мере части сжатого потока  $\text{CO}$  в процесс, расходующий  $\text{CO}$ .

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, предложенный способ дополнительно включает подачу водного субстрата в модуль электролиза  $\text{H}_2$  с получением потока с повышенным содержанием  $\text{H}_2$  и подачу по меньшей мере части потока с повышенным содержанием  $\text{H}_2$  в процесс, расходующий  $\text{CO}$ .

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, процесс, расходующий  $\text{CO}$ , обеспечивает получение хвостового газа, содержащего  $\text{CO}_2$ .

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, предложенный способ дополнительно включает одно или более из подачи по меньшей мере части хвостового газа, содержащего  $\text{CO}_2$ , в первый модуль очистки или во второй модуль очистки для удаления по меньшей мере одного компонента из хвостового газа с получением второго потока газа очищенного  $\text{CO}_2$ , и подачи по меньшей мере части хвостового газа, содержащего  $\text{CO}_2$ , во второй модуль концентрирования  $\text{CO}_2$  с получением второго концентрированного потока  $\text{CO}_2$  и второго потока с пониженным содержанием  $\text{CO}_2$ .

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, по меньшей мере часть хвостового газа, содержащего  $\text{CO}_2$ , подают в модуль изменения давления с получением сжатого потока хвостового газа, и сжатый поток хвостового газа подают в первый модуль очистки и/или во второй модуль очистки.

- В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, предложенный способ дополнительно включает подачу по меньшей мере части второго потока концентрированного  $\text{CO}_2$  в первый модуль очистки или во второй модуль очистки для удаления по меньшей мере одного компонента из хвостового газа с получением второго потока газа очищенного  $\text{CO}_2$ .
- В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, предложенный способ дополнительно включает подачу по меньшей мере части второго потока газа очищенного  $\text{CO}_2$  в модуль электролиза  $\text{CO}_2$ .
- В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, газообразный субстрат, содержащий  $\text{CO}_2$ , из промышленного процесса дополнительно содержит один или более из  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$ .
- В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, промышленный процесс выбран из группы, содержащей ферментацию углеводов, ферментацию газов, получение цемента, получение пульпы и бумаги, сталеварение, переработку нефти и сопутствующие процессы, получение нефтехимических продуктов, производство кокса, анаэробное или аэробное разложение, газификацию, добычу природного газа, добычу нефти, металлургические процессы, производство и/или очистку алюминия, меди и/или сплавов железа, геологические месторождения, процессы Фишера-Тропша, получение метанола, пиролиз, паровой риформинг метана, сухой риформинг метана, частичное окисление биогаза или природного газа и автотермический риформинг биогаза или природного газа.
- В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе,  $\text{CO}_2$ -содержащий газообразный субстрат получен из смеси по меньшей мере двух или более источников.
- В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, первый модуль очистки выбран из группы, состоящей из модуля гидролиза, модуля удаления кислых газов, модуля дезоксигенации, модуля каталитического гидрирования, модуля удаления твердых частиц, модуля удаления хлоридов, модуля удаления дегтя и модуля доочистки циановодорода.
- В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, по меньшей мере один компонент, удаляемый из  $\text{CO}_2$ -содержащего газообразного субстрата, выбран из группы, состоящей из соединений серы, ароматических соединений, алкинов, алкенов, алканов, олефинов, соединений азота, кислорода, фосфорсодержащих соединений, мелких частиц, твердых веществ, кислорода, галогенированных соединений, кремнийсодержащих соединений, карбониллов, металлов, спиртов, сложных эфиров, кетонов, пероксидов, альдегидов, простых эфиров, дегтей и нафталина.

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, процесс, расходуемый СО, представляет собой процесс ферментации, включающий выращивание по меньшей мере одного карбоксидотрофного микроорганизма. Карбоксидотрофный микроорганизм может представлять собой карбоксидотрофные бактерии.

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, карбоксидотрофные бактерии выбраны из группы, включающей *Moorella*, *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Acetobacterium*, *Eubacterium*, *Butyribacterium*, *Oxobacter*, *Methanosarcina*, и *Desulfotomaculum*. В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, карбоксидотрофные бактерии представляют собой *Clostridium autoethanogenum*.

В некоторых аспектах способа, описанного в настоящем документе, процесс ферментации обеспечивает получение продукта ферментации, выбранного из группы, состоящей из этанола, бутирата, 2,3-бутандиола, лактата, бутена, бутадиена, метилэтилкетона, этилена, ацетона, изопропанола, липидов, 3-гидроксипропионата, терпенов, жирных кислот, 2-бутанола, 1,2-пропандиола и 1-пропанола.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

На фиг. 1А, 1В и 1С представлена технологическая схема интеграции, на которой показана интеграция модуля очистки, модуля электролиза СО<sub>2</sub> и необязательного модуля электролиза Н<sub>2</sub> с процессом, расходуемым СО. На фиг. 1В дополнительно показан модуль изменения давления, установленный перед модулем очистки. На фиг. 1С дополнительно показан модуль изменения давления, установленный перед процессом, расходуемым СО.

На фиг. 2 представлена технологическая схема интеграции, на которой показана интеграция модуля очистки, модуля электролиза СО<sub>2</sub>, необязательного модуля выделения О<sub>2</sub> и необязательного модуля электролиза Н<sub>2</sub> с процессом, расходуемым СО.

На фиг. 3 представлена технологическая схема интеграции, на которой показана интеграция необязательного модуля концентрирования СО<sub>2</sub>, расположенного перед модулем очистки, модуля электролиза СО<sub>2</sub>, необязательного модуля электролиза Н<sub>2</sub> и необязательного модуля выделения О<sub>2</sub> с процессом, расходуемым СО.

На фиг. 4 представлена технологическая схема интеграции, на которой показана интеграция необязательного модуля концентрирования СО<sub>2</sub>, расположенного после модуля очистки, модуля электролиза СО<sub>2</sub>, необязательного модуля электролиза Н<sub>2</sub> и необязательного модуля выделения О<sub>2</sub> с процессом, расходуемым СО.

На фиг. 5 представлена технологическая схема интеграции, на которой показана интеграция модуля электролиза  $H_2$ , расположенного после необязательного модуля изменения давления, причем часть газа из модуля электролиза  $H_2$  смешивают с газом из модуля электролиза  $CO_2$  перед его подачей в процесс, расходующий  $CO$ .

- 5 На фиг. 6 представлена технологическая схема интеграции, на которой показана интеграция дополнительного модуля очистки, установленного после модуля электролиза  $CO_2$ .

## ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

10 Авторами настоящего изобретения установлено, что интеграция промышленного процесса, в котором образуется  $CO_2$ , с процессом, расходующим  $CO$ , а также с процессом очистки, который осуществляют до процесса электролиза  $CO_2$ , обеспечивает возможность достижения существенного преимущества для промышленного процесса, в котором образуется  $CO_2$ , и для процесса, расходующего  $CO$ , который может представлять собой процесс ферментации с поглощением  $C1$ .

15 Термин «промышленный процесс» относится к процессу получения, конверсии, очистки, риформинга, экстракции или окисления субстрата, включающему химические, физические, электрические и/или механические стадии. Иллюстративные промышленные процессы включают, но не ограничиваются ими, ферментацию углеводов, ферментацию газов, получение цемента, получение пульпы и бумаги, 20 сталеварение, переработку нефти и сопутствующие процессы, получение нефтехимических продуктов, производство кокса, анаэробное или аэробное разложение, газификацию (такую как газификация биомассы, жидких сточных потоков, потоков твердых отходов, бытовых стоков, ископаемых ресурсов, включая природный газ, уголь и нефть), добычу природного газа, добычу нефти, металлургические процессы, производство и/или очистку алюминия, меди и/или сплавов железа, геологические месторождения, процессы Фишера-Тропша, получение метанола, пироллиз, паровой риформинг метана, сухой риформинг метана, частичное окисление биогаза или природного газа и автотермический риформинг биогаза или природного газа. В таких вариантах реализации субстрат и/или источник  $C1$ -углерода можно 30 улавливать из промышленного процесса до его выброса в атмосферу с применением любого стандартного способа.

Термины «газ из промышленного процесса», «источник газа из промышленного процесса» и «газообразный субстрат из промышленного процесса» могут быть использованы взаимозаменяемо для обозначения отходящего газа промышленного 35 процесса, побочного продукта промышленного процесса, совместного продукта промышленного процесса, газа, возвращаемого в цикл промышленного процесса,

и/или газа, используемого на промышленном предприятии для рекуперации энергии. В некоторых вариантах реализации газ из промышленного процесса представляет собой хвостовой газ короткоциклового адсорбции (PSA). В некоторых вариантах реализации газ из промышленного процесса представляет собой газ, полученный в процессе экстракции CO<sub>2</sub>, который может включать аминную очистку или использование раствора карбонатгидразы.

«C1» относится к молекуле, содержащей один атом углерода, например, CO, CO<sub>2</sub>, метан (CH<sub>4</sub>) или метанол (CH<sub>3</sub>OH). «C1-оксигенат» относится к молекуле, содержащей один атом углерода, которая также содержит по меньшей мере один атом кислорода, например, CO, CO<sub>2</sub> или CH<sub>3</sub>OH. «Источник C1-углерода» относится к молекуле, содержащей один атом углерода, которая служит в качестве частичного или единственного источника углерода для микроорганизма согласно настоящему изобретению. Например, источник C1-углерода может содержать один или более из CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH или муравьиной кислоты (CH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Предпочтительно, источник C1-углерода содержит один или оба из CO и CO<sub>2</sub>. «C1-поглощающий микроорганизм» представляет собой микроорганизм, который может вырабатывать один или более продуктов из источника C1-углерода. Как правило, микроорганизм согласно настоящему изобретению представляет собой C1-поглощающие бактерии.

«Субстрат» относится к источнику углерода и/или энергии. Как правило, субстрат является газообразным и содержит источник C1-углерода, например, CO, CO<sub>2</sub> и/или CH<sub>4</sub>. Предпочтительно, субстрат содержит источник C1-углерода, представляющий собой CO или CO и CO<sub>2</sub>. Субстрат может дополнительно содержать другие неуглеродные компоненты, такие как H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> или электроны. В данном контексте «субстрат» может относиться к источнику углерода и/или энергии для микроорганизма согласно настоящему изобретению.

Термин «совместный субстрат» относится к субстрату, который, несмотря на то, что он необязательно является первичным источником энергии и вещества для синтеза продукта, может быть использован для синтеза продукта при его объединении с другим субстратом, таким как первичный субстрат.

«CO<sub>2</sub>-содержащий газообразный субстрат», «CO<sub>2</sub>-содержащий газ» или «CO<sub>2</sub>-содержащий газообразный источник» может включать любой газ, содержащий CO<sub>2</sub>. Газообразный субстрат обычно содержит значительную часть CO<sub>2</sub>, предпочтительно от по меньшей мере примерно 5% до примерно 100% CO<sub>2</sub> по объему. Кроме того, газообразный субстрат может содержать один или более из водорода (H<sub>2</sub>), кислорода (O<sub>2</sub>), азота (N<sub>2</sub>) и/или CH<sub>4</sub>. В данном контексте CO, H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> могут быть упомянуты как «газы с высоким содержанием энергии».



Термин «улавливание углерода» в данном контексте относится к поглощению углеродных соединений, включая  $\text{CO}_2$  и/или  $\text{CO}$ , из потока, содержащего  $\text{CO}_2$  и/или  $\text{CO}$ , и либо а) конверсию  $\text{CO}_2$  и/или  $\text{CO}$  в продукты, б) конверсию  $\text{CO}_2$  и/или  $\text{CO}$  в вещества, подходящие для длительного хранения, с) улавливание  $\text{CO}_2$  и/или  $\text{CO}$  веществами, подходящими для длительного хранения, либо d) комбинацию указанных процессов.

Термины «повышение эффективности», «повышенная эффективность» и т.п. относятся к увеличению скорости и/или выхода реакции, например, к увеличению скорости конверсии  $\text{CO}_2$  и/или  $\text{CO}$  в продукты, и/или к увеличению концентрации продукта. При использовании в отношении процесса ферментации, «повышение эффективности» включает, но не ограничивается ими, увеличение одного или более из показателей скорости роста микроорганизмов, катализирующих ферментацию, скорости роста и/или выработки продукта при повышенных концентрациях продукта, объема требуемого продукта, получаемого на единицу объема потребленного субстрата, скорости выработки или степени выработки требуемого продукта и относительного содержания выработанного требуемого продукта по сравнению с другими побочными продуктами ферментации.

«Реагент» в данном контексте относится к субстрату, который присутствует в химической реакции и расходуется во время реакции с образованием продукта. Реагент представляет собой исходный материал, который подвергается изменению в процессе химической реакции. В конкретных вариантах реализации реагент включает, но не ограничивается ими,  $\text{CO}$  и/или  $\text{H}_2$ . В конкретных вариантах реализации реагент представляет собой  $\text{CO}_2$ .

«Процесс, расходующий  $\text{CO}$ », относится к процессу, в котором реагентом является  $\text{CO}$ ;  $\text{CO}$  расходуется с образованием продукта. Неограничивающий пример процесса, расходующего  $\text{CO}$ , представляет собой процесс ферментации газа с поглощением  $\text{C}_1$ . Процесс, расходующий  $\text{CO}$ , может включать реакцию с образованием  $\text{CO}_2$ . Например, процесс, расходующий  $\text{CO}$ , может приводить к образованию по меньшей мере одного продукта, такого как продукт ферментации, а также  $\text{CO}_2$ . В другом примере процесс, расходующий  $\text{CO}$ , представляет собой получение уксусной кислоты, в котором  $\text{CO}$  приводят во взаимодействие с метанолом под давлением.

«Поток газа» относится к любому потоку субстрата, который можно подавать, например, из одного модуля в другой, из одного модуля в процесс, расходующий  $\text{CO}$ , и/или из одного модуля в устройство улавливания углерода.

Газовые потоки обычно не представляют собой чистый поток  $\text{CO}_2$  и имеют некоторое содержание по меньшей мере одного другого компонента. Например, каждый источник может иметь различное содержание  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и различные компоненты.

Вследствие непостоянства их содержания, газовый поток необходимо подвергать обработке перед его подачей в процесс, расходующий СО. Переработка газового потока включает удаление и/или конверсию различных компонентов, которые могут быть ингибиторами микробов и/или ингибиторами катализатора. Предпочтительно, ингибиторы катализатора удаляют и/или подвергают конверсии до подачи в модуль электролиза, а ингибиторы микробов удаляют и/или подвергают конверсии до подачи в процесс, расходующий СО. Кроме того, может потребоваться обработка газового потока на одной или более стадиях концентрирования, на которых увеличивают концентрацию СО и/или СО<sub>2</sub>. Предпочтительно, газовый поток подвергают стадии концентрирования для увеличения концентрации СО<sub>2</sub> перед подачей в модуль электролиза. Обнаружено, что более высокие концентрации СО<sub>2</sub>, подаваемого в модуль электролиза, обеспечивают более высокие концентрации СО, выходящего из модуля электролиза.

«Модуль очистки», «модуль удаления примесей», «модуль подготовки», «модуль переработки» и т.п. включают технологии, которые могут обеспечивать конверсию и/или удаление по меньшей мере одного компонента из потока газа. Неограничивающие примеры модулей очистки включают модули гидролиза, модули удаления кислых газов, модули дезоксигенации, модули каталитического гидрирования, модули удаления твердых частиц, модули удаления хлоридов, модули удаления дегтя и модули доочистки циановодорода.

Термины «компоненты», «примеси» и т.п. в данном контексте относятся к ингибиторам микробов и/или ингибиторам катализатора, которые могут находиться в потоке газа. В конкретных вариантах реализации такие компоненты включают, но не ограничиваются ими, соединения серы, ароматические соединения, алкины, алкены, алканы, олефины, соединения азота, фосфорсодержащие соединения, мелкие частицы, твердые вещества, кислород, галогенированные соединения, кремнийсодержащие соединения, карбонилы, металлы, спирты, сложные эфиры, кетоны, пероксиды, альдегиды, простые эфиры, дегти и нафталин. Предпочтительно, компонент, удаляемый в модуле очистки, не содержит СО<sub>2</sub>.

«Ингибиторы микробов» в данном контексте относятся к одному или более компонентам, которые замедляют или препятствуют конкретной химической реакции или иному процессу с участием микробов. В конкретных вариантах реализации ингибиторы микробов включают, но не ограничиваются ими, кислород (О<sub>2</sub>), циановодород (HCN), ацетилен (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) и ВТЕХ (бензол, толуол, этилбензол, ксиллол).

«Ингибитор катализатора», «ингибитор адсорбента» и т.п. в данном контексте относятся к одному или более веществам, которые снижают скорость или препятствуют химической реакции. В конкретных вариантах реализации ингибиторы

катализаторов могут включать, но не ограничиваются ими, сероводород ( $H_2S$ ) и карбонилсульфид ( $COS$ ).

В некоторых случаях на стадии ферментации получают, вводят и/или концентрируют по меньшей мере один удаляемый компонент. Один или более из таких компонентов могут присутствовать в газообразном субстрате после ферментации. Например, на стадии ферментации можно получать, вводить и/или концентрировать серу в форме  $H_2S$ . В конкретных вариантах реализации на стадии ферментации вводят сероводород. В различных вариантах реализации газообразный субстрат после ферментации содержит по меньшей мере часть сероводорода. Сероводород может быть ингибитором катализатора. Поэтому сероводород может замедлять действие определенных модулей электролиза. Для подачи в электролизер не ингибирующего газообразного субстрата после ферментации, может потребоваться удаление по меньшей мере части сероводорода или другого компонента, присутствующего в газообразном субстрате после ферментации, с помощью одного или более модулей очистки. В другом варианте реализации на стадии ферментации может быть получен ацетон, и в качестве модуля очистки может быть использован древесный уголь.

Термины «очищенный газ» и «поток очищенного газа» относятся к потоку газа, пропущенному через по меньшей мере один модуль очистки, из которого удален и/или в котором изменен один или более компонентов. Например, «поток очищенного газа  $CO_2$ » относится к  $CO_2$ -содержащему газу, пропущенному через один или более модулей очистки.

«Модуль концентрирования» и подобные термины относятся к технологии, которая может увеличивать содержание определенного компонента в газовом потоке. В конкретных вариантах реализации модуль концентрирования представляет собой модуль концентрирования  $CO_2$ , причем содержание  $CO_2$  в газовом потоке, выходящем из модуля концентрирования  $CO_2$ , выше по сравнению с содержанием  $CO_2$  в газовом потоке до его подачи в модуль концентрирования  $CO_2$ . В некоторых вариантах реализации в модуле концентрирования используют технологию дезоксигенации для удаления  $O_2$  из газового потока и увеличения содержания  $CO_2$  в указанном потоке газа. В некоторых вариантах реализации в модуле концентрирования  $CO_2$  используют технологию короткоциклового адсорбции (PSA) для удаления  $H_2$  из потока газа и увеличения содержания  $CO_2$  в указанном газовом потоке. В некоторых случаях процесс ферментации выполняет функцию модуля концентрирования  $CO_2$ . В некоторых вариантах реализации газовый поток из модуля концентрирования подают в установку улавливания и хранения углерода (CCS) или в установку увеличения нефтеотдачи (EOR).

Термины «модуль электролиза» и «электролизер» могут быть использованы взаимозаменяемо для обозначения установки, в которой используют электричество для осуществления несамопроизвольной реакции. Технологии электролиза известны в данной области техники. Иллюстративные процессы включают электролиз щелочного водного раствора, электролиз с протонной или анионообменной мембраной (PEM, AEM) и электролиз твердых оксидов (SOE) (Ursua *et al.*, *Proceedings of the IEEE* 100(2):410-426, 2012; Jhong *et al.*, *Current Opinion in Chemical Engineering* 2:191-199, 2013). Термин «фарадеевская эффективность» представляет собой значение, которое обозначает количество электронов, пропущенных через электролизер и перенесенных на восстановленный продукт, а не участвующих в побочных процессах. Модули SOE работают при повышенных температурах. Ниже термонеutralного напряжения модуля электролиза реакция электролиза является эндотермической. Выше термонеutralного напряжения модуля электролиза реакция электролиза является экзотермической. В некоторых вариантах реализации модуль электролиза эксплуатируют без избыточного давления. В некоторых вариантах реализации модуль электролиза эксплуатируют при давлении 5-10 бар.

«Модуль электролиза CO<sub>2</sub>» относится к установке, которая может обеспечивать расщепление CO<sub>2</sub> на CO и O<sub>2</sub>, и действует по следующей стехиометрической реакции:  $2\text{CO}_2 + \text{электричество} \rightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2$ . Использование различных катализаторов для восстановления CO<sub>2</sub> влияет на конечный продукт. Показано, что катализаторы, включая, но не ограничиваясь ими, катализаторы на основе Au, Ag, Zn, Pd и Ga, эффективны для получения CO из CO<sub>2</sub>. В некоторых вариантах реализации давление потока газа, выходящего из модуля электролиза CO<sub>2</sub>, составляет примерно 5-7 бар изб.

«Модуль электролиза H<sub>2</sub>», «модуль электролиза воды» и «модуль электролиза H<sub>2</sub>O» относится к установке, которая может обеспечивать расщепление H<sub>2</sub>O в форме пара на H<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>, и действует по следующей стехиометрической реакции:  $2\text{H}_2\text{O} + \text{электричество} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Модуль электролиза H<sub>2</sub>O обеспечивает восстановление протонов до H<sub>2</sub> и окисление O<sup>2-</sup> до O<sub>2</sub>. H<sub>2</sub>, получаемый электролизом, можно смешивать с C1-содержащим газообразным субстратом в качестве способа обеспечения дополнительного количества сырья и улучшения состава субстрата.

Модули электролиза H<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> имеют 2 выходных отверстия для газа. Одна сторона модуля электролиза, анод, содержит H<sub>2</sub> или CO (и другие газы, такие как непрореагировавшие водяные пары или непрореагировавший CO<sub>2</sub>). Вторая сторона, катод, содержит O<sub>2</sub> (и возможно другие газы). Состав сырья, пропускаемого в процессе электролиза, может определять наличие различных компонентов в потоке CO. Например, присутствие в сырье инертных компонентов, таких как CH<sub>4</sub> и/или N<sub>2</sub>,

может приводить к присутствию одного или более указанных компонентов в потоке с повышенным содержанием  $\text{CO}$ . Кроме того, в некоторых электролизерах  $\text{O}_2$ , образующийся на катоде, проходит через анодную сторону, где образуется  $\text{CO}$ , и/или  $\text{CO}$  пропускают через анодную сторону, что приводит к перекрестному загрязнению требуемых газообразных продуктов.

Термин «модуль выделения» использован для описания технологии, которая может обеспечивать разделение вещества на два или более компонентов. Например, «модуль выделения  $\text{O}_2$ » может быть использован для разделения  $\text{O}_2$ -содержащего газообразного субстрата на поток, содержащий, главным образом,  $\text{O}_2$  (также упоминаемый как «поток с повышенным содержанием  $\text{O}_2$ » или «газ, обогащенный  $\text{O}_2$ »), и поток, который, в основном, не содержит  $\text{O}_2$ , не содержит  $\text{O}_2$ , или содержит лишь следовые количества  $\text{O}_2$  (также упоминаемый как «поток с пониженным содержанием  $\text{O}_2$ » или «поток, обедненный  $\text{O}_2$ »).

В данном контексте термины «поток с повышенным содержанием», «обогащенный газ», «газ высокой чистоты» и подобные термины относятся к газовому потоку, имеющему более высокое содержание определенного компонента после пропускания через такой модуль, как модуль электролиза, по сравнению с содержанием указанного компонента в потоке, входящем в данный модуль. Например, «поток с повышенным содержанием  $\text{CO}$ » может быть получен при пропускании  $\text{CO}_2$ -содержащего газообразного субстрата через модуль электролиза  $\text{CO}_2$ . «Поток с повышенным содержанием  $\text{H}_2$ » может быть получен при пропускании водного газообразного субстрата через модуль электролиза  $\text{H}_2$ . «Поток с повышенным содержанием  $\text{O}_2$ » автоматически образуется на аноде в модуле электролиза  $\text{CO}_2$  или  $\text{H}_2$ ; «поток с повышенным содержанием  $\text{O}_2$ » также может быть получен при пропускании  $\text{O}_2$ -содержащего газообразного субстрата через модуль разделения  $\text{O}_2$ . «Поток с повышенным содержанием  $\text{CO}_2$ » может быть получен при пропускании  $\text{CO}_2$ -содержащего газообразного субстрата через модуль концентрирования  $\text{CO}_2$ .

В данном контексте термины «поток с пониженным содержанием», «обедненный газ» и подобные термины относятся к газовому потоку, имеющему более низкое содержание определенного компонента после пропускания через такой модуль, как модуль концентрирования или модуль разделения, по сравнению с содержанием указанного компонента в потоке, входящем в данный модуль. Например, поток с пониженным содержанием  $\text{O}_2$  может быть получен при пропускании  $\text{O}_2$ -содержащего газообразного субстрата через модуль разделения  $\text{O}_2$ . Поток с пониженным содержанием  $\text{O}_2$  может содержать непрореагировавший  $\text{CO}_2$  из модуля электролиза  $\text{CO}_2$ . Поток с пониженным содержанием  $\text{O}_2$  может содержать следовые количества  $\text{O}_2$  или может не содержать  $\text{O}_2$ . «Поток с пониженным содержанием  $\text{CO}_2$ » может быть

получен при пропускании  $\text{CO}_2$ -содержащего газообразного субстрата через модуль концентрирования  $\text{CO}_2$ . Поток с пониженным содержанием  $\text{CO}_2$  может содержать  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и/или такой компонент, как ингибитор микробов или ингибитор катализатора. Поток с пониженным содержанием  $\text{CO}_2$  может содержать следовые количества  $\text{CO}_2$  или может не содержать  $\text{CO}_2$ .

В конкретных вариантах реализации настоящего изобретения предложен интегрированный способ, в котором давление газового потока можно увеличивать и/или уменьшать. Термин «модуль изменения давления» относится к технологии, которая может обеспечивать создание (т.е. увеличение) или уменьшение давления газового потока. Давление газа можно увеличивать и/или уменьшать любыми подходящими способами, например, с помощью одного или более компрессоров и/или клапанов. В некоторых случаях газовый поток может иметь субоптимальное давление, или давление газового потока может быть выше оптимального и, следовательно, можно использовать клапан для снижения давления. Модуль изменения давления может быть расположен до или после любого модуля, описанного в настоящем документе. Например, модуль изменения давления можно использовать до модуля очистки, до модуля концентрирования, до модуля электролиза и/или до процесса, расходующего  $\text{CO}$ .

«Сжатый газовый поток» относится к газообразному субстрату, пропущенному через модуль изменения давления. «Сжатый газовый поток» также может быть использован для описания газового потока, который соответствует требованиям рабочего давления конкретного модуля.

Термины «газообразный субстрат после процесса, расходующего  $\text{CO}$ », «хвостовой газ после процесса, расходующего  $\text{CO}$ », «хвостовой газ» и т.п. могут быть использованы взаимозаменяемо для описания газа, прошедшего через процесс, расходующий  $\text{CO}$ . Газообразный субстрат после процесса, расходующего  $\text{CO}$ , может содержать непрореагировавший  $\text{CO}$ , непрореагировавший  $\text{H}_2$  и/или  $\text{CO}_2$ , образованный (или параллельно не расходуемый) в процессе, расходующем  $\text{CO}$ . Газообразный субстрат после процесса, расходующего  $\text{CO}$ , можно дополнительно подавать в один или более из модуля изменения давления, модуля очистки, модуля концентрирования  $\text{CO}_2$  и/или модуля электролиза. В некоторых вариантах реализации «газообразный субстрат после процесса, расходующего  $\text{CO}$ » представляет собой газообразный субстрат после ферментации.

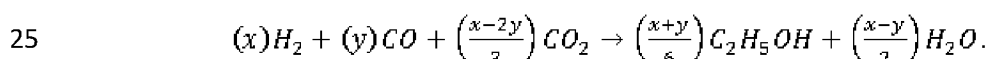
Термин «требуемый состав» использован для обозначения требуемого содержания и типа компонентов в веществе, таком как, например, газовый поток. Более конкретно, газ считают имеющим «требуемый состав», если он содержит определенный компонент (т.е.  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и/или  $\text{CO}_2$ ) и/или содержит определенный компонент в

определенном количестве, и/или не содержит определенный компонент (т.е. примесь, вредную для микроорганизмов), и/или не содержит определенный компонент в определенном количестве. Можно учитывать более одного компонента при определении того, имеет ли газовый поток требуемый состав.

5 Несмотря на то, что субстрат не обязательно содержит  $H_2$ , наличие  $H_2$  не должно оказывать неблагоприятное воздействие на образование продукта в соответствии со способами настоящего изобретения. В конкретных вариантах реализации изобретения наличие  $H_2$  приводит к улучшению общей эффективности выработки спирта. В одном варианте реализации субстрат содержит примерно 30% или менее  $H_2$  по объему, 20% или менее  $H_2$  по объему, примерно 15% или менее  $H_2$  по объему или  
10 примерно 10% или менее  $H_2$  по объему. В других вариантах реализации изобретения поток субстрата содержит низкие концентрации  $H_2$ , например, менее 5%, или менее 4%, или менее 3%, или менее 2%, или менее 1%, или по существу не содержит  $H_2$ .

Субстрат также может содержать некоторое количество  $CO$ , например, от примерно 1% до примерно 80%  $CO$  по объему, или от 15 до примерно 30%  $CO$  по объему. В одном из вариантов реализации субстрат содержит менее или ровно примерно 20%  $CO$  по объему. В конкретных вариантах реализации субстрат содержит менее или ровно примерно 15%  $CO$  по объему, менее или ровно примерно 10%  $CO$  по объему, менее или ровно примерно 5%  $CO$  по объему или по существу не содержит  $CO$ .

20 Состав субстрата может быть улучшен для обеспечения требуемого или оптимального соотношения  $H_2:CO:CO_2$ . Требуемое соотношение  $H_2:CO:CO_2$  зависит от требуемого продукта ферментации в процессе ферментации. Для этанола оптимальное соотношение  $H_2:CO:CO_2$  представляет собой:  $(x):(y):\left(\frac{x-2y}{3}\right)$ , где  $x > 2y$ , для удовлетворения стехиометрии получения этанола:

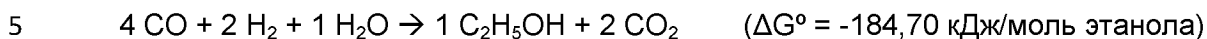
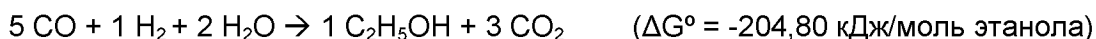


Эксплуатация процесса ферментации в присутствии  $H_2$  имеет дополнительное преимущество уменьшения количества  $CO_2$ , образующегося в процессе ферментации. Например, газообразный субстрат, содержащий минимальное количество  $H_2$ , обычно превращается в этанол и  $CO_2$  со следующей стехиометрией:  $6 CO + 3 H_2O \rightarrow C_2H_5OH + 4 CO_2$ . Поскольку количество  $H_2$ , используемого C1-поглощающими бактериями, увеличивается, то количество образующегося  $CO_2$  уменьшается, т.е.  $2 CO + 4 H_2 \rightarrow C_2H_5OH + H_2O$ .

Если  $CO$  является единственным источником углерода и энергии для выработки этанола, то часть углерода теряется на образование  $CO_2$  по уравнению:



При увеличении количества  $H_2$ , доступного в субстрате, уменьшается количество образующегося  $CO_2$ . При стехиометрическом соотношении 1:2 ( $CO/H_2$ ), образование  $CO_2$  полностью исключено.



Состав субстрата может существенно влиять на эффективность и/или стоимость реакции. Например, присутствие  $O_2$  может снижать эффективность процесса анаэробной ферментации. В зависимости от состава субстрата, может потребоваться обработка, очистка или фильтрация субстрата для удаления нежелательных примесей, таких как токсины, нежелательные компоненты или частицы пыли, и/или для увеличения концентрации требуемых компонентов. Кроме того, улавливание углерода может быть увеличено посредством рециркуляции  $CO_2$ , образующегося в процессе, расходуя  $CO$ , в модуль электролиза  $CO_2$  для увеличения выхода процесса, расходуя  $CO$ .  $CO_2$ , образующийся в процессе, расходуя  $CO$ , можно подвергать очистке до подачи в модуль электролиза  $CO_2$ .

В некоторых вариантах реализации процесс, расходуя  $CO$ , осуществляют в биореакторе. Термин «биореактор» включает устройство для ферментации, состоящее из одной или более емкостей и/или башен, или трубопроводов, которые включают смесительный реактор непрерывного действия (CSTR), реактор с иммобилизованными клетками (ICR), реактор с орошаемым слоем (TBR), барботажную колонну, газлифтный ферментер, статический смеситель, циркуляционный петлевой реактор, мембранный реактор, такой как полволоконный мембранный биореактор (HFMBR), или другую емкость или другое устройство, подходящее для контакта газа с жидкостью. Реактор предпочтительно выполнен с возможностью приема газообразного субстрата, содержащего  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  или их смеси. Реактор может содержать несколько реакторов (ступеней), расположенных параллельно или последовательно. Например, реактор может содержать первый реактор выращивания, в котором выращивают бактерии, и второй реактор ферментации, в который можно подавать ферментативный бульон из реактора выращивания, и в котором можно получать основную часть продуктов ферментации. Эксплуатация биореактора при повышенном давлении обеспечивает возможность увеличения скорости массопереноса газа из газовой фазы в жидкую фазу. Соответственно, обычно предпочтительно осуществлять выращивание/ферментацию при давлении выше атмосферного давления. Кроме того, поскольку данная скорость конверсии газа отчасти зависит от времени пребывания субстрата в реакторе, а



достижение требуемого времени пребывания определяет необходимый объем биореактора, то применение систем под давлением может значительно уменьшить необходимый объем биореактора и, следовательно, капитальные затраты на оборудование для выращивания/ферментации. Это, в свою очередь, означает, что время пребывания, определяемое как объем жидкости в биореакторе, деленный на скорость подачи газового потока, может быть сокращено, если биореакторы поддерживают при повышенном давлении, а не при атмосферном давлении. Оптимальные условия реакции отчасти зависят от конкретных используемых микроорганизмов. Однако, как правило, предпочтительно осуществлять ферментацию при давлении выше атмосферного давления. Кроме того, поскольку данная скорость конверсии газа отчасти зависит от времени пребывания субстрата в реакторе, а достижение требуемого времени удерживания, в свою очередь, определяет необходимый объем биореактора, то применение систем под давлением может значительно уменьшить необходимый объем биореактора и, следовательно, капитальные затраты на ферментативное оборудование.

Если из контекста не следует иное, то выражения «ферментация», «процесс ферментации», «реакция ферментации» и т.п. в данном контексте включают и фазу выращивания, и фазу биосинтеза газообразного субстрата. В некоторых вариантах реализации ферментацию проводят без углеводных субстратов, таких как сахар, крахмал, лигнин, целлюлоза или гемицеллюлоза.

Культуру обычно выдерживают в водной культуральной среде, которая содержит питательные вещества, витамины и/или минералы, достаточные для возможности роста микроорганизмов. «Питательная среда» «среда для выращивания» и «культуральная среда» использованы для описания среды для выращивания бактерий. Предпочтительно, водная культуральная среда представляет собой среду для выращивания анаэробных микроорганизмов, такую как минимальная питательная среда для анаэробных микроорганизмов. Подходящие среды хорошо известны в данной области техники. Термин «питательное вещество» включает любое вещество, которое может быть использовано для метаболизма микроорганизма. Иллюстративные питательные вещества включают калий, витамины В, следовые металлы и аминокислоты.

Термины «ферментативный бульон» и «бульон» включают смесь компонентов, включая питательную среду и культуру, или один или более микроорганизмов. Следует отметить, что термин «микроорганизм» и термин «бактерия» в данном контексте использованы взаимозаменяемо.

Микроорганизм согласно настоящему изобретению можно выращивать с использованием газового потока с получением одного или более продуктов.

Например, микроорганизм согласно настоящему изобретению может вырабатывать или может быть создан для выработки этанола (WO 2007/117157), ацетата (WO 2007/117157), бутанола (WO 2008/115080 и WO 2012/053905), бутирата (WO 2008/115080), 2,3-бутандиола (WO 2009/151342 и WO 2016/094334), лактата (WO 2011/112103), бутена (WO 2012/024522), бутадиена (WO 2012/024522), метилэтилкетона (2-бутанона) (WO 2012/024522 и WO 2013/185123), этилена (WO 2012/026833), ацетона (WO 2012/115527), изопропанола (WO 2012/115527), липидов (WO 2013/036147), 3-гидроксипропионата (3-HP) (WO 2013/180581), терпенов, включая изопрен (WO 2013/180584), жирных кислот (WO 2013/191567), 2-бутанола (WO 2013/185123), 1,2-пропандиола (WO 2014/036152), 1-пропанола (WO 2014/0369152), продуктов из хоризмата (WO 2016/191625), 3-гидоксибутирата (WO 2017/066498) и 1,3-бутандиола (WO 2017/0066498). Помимо одного или более целевых продуктов, микроорганизм согласно настоящему изобретению также может вырабатывать этанол, ацетат и/или 2,3-бутандиол. В некоторых вариантах реализации сама микробная биомасса может считаться продуктом. Такие продукты можно подвергать дополнительной конверсии с получением по меньшей мере одного компонента из дизеля, авиационного топлива и/или бензина. Кроме того, микробную биомассу можно подвергать дополнительной переработке с получением одноклеточного белка (SCP).

«Микроорганизм» представляет собой микроскопический организм, в частности, бактерии, археи, вирусы или грибки. Микроорганизм согласно настоящему изобретению обычно представляет собой бактерию. В данном контексте упоминание «микроорганизма» включает «бактерии».

«Родительский микроорганизм» представляет собой микроорганизм, используемый для получения микроорганизма согласно настоящему изобретению. Родительский микроорганизм может быть природным микроорганизмом (т.е. микроорганизмом дикого типа) или микроорганизмом, ранее подверженным модификации (т.е. мутантным или рекомбинантным микроорганизмом). Микроорганизм согласно настоящему изобретению может быть модифицирован для экспрессии или сверхэкспрессии одного или более ферментов, которые не экспрессируются или не сверхэкспрессируются в родительском микроорганизме. Аналогично, микроорганизм согласно настоящему изобретению может быть модифицирован так, что он содержит один или более генов, которые не содержатся в родительском микроорганизме. Микроорганизм согласно настоящему изобретению также может быть модифицирован так, чтобы он не экспрессировал или экспрессировал меньшее количество одного или более ферментов, которые экспрессируются в исходном микроорганизме. В одном варианте реализации родительский микроорганизм представляет собой

*Clostridium autoethanogenum*, *Clostridium ljungdahlii* или *Clostridium ragsdalei*. В предпочтительном варианте реализации родительский микроорганизм представляет собой *Clostridium autoethanogenum* LZ1561, внесенный 7 июня 2010 года в немецкую коллекцию микроорганизмов и клеточных культур (Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH (DSMZ)), расположенную по адресу Inhoffenstraß 7B, D-38124 Брауншвейг, Германия, 7 июня 2010 года в соответствии с Будапештским договором о международном признании депонирования микроорганизмов для целей патентной процедуры под номером доступа DSM23693. Указанный штамм описан в международной патентной заявке № PCT/NZ2011/000144, опубликованной как WO 2012/015317.

Термин «получена из» означает, что нуклеиновая кислота, белок или микроорганизм модифицирован или адаптирован из другой (т.е. родительской или дикого типа) нуклеиновой кислоты, белка или микроорганизма с образованием новой нуклеиновой кислоты, белка или микроорганизма. Такие модификации или адаптации обычно включают вставку, делецию, мутацию или замену нуклеиновых кислот или генов. В целом, микроорганизм согласно настоящему изобретению получают из родительского микроорганизма. В одном варианте реализации микроорганизм согласно настоящему изобретению получен из *Clostridium autoethanogenum*, *Clostridium ljungdahlii* или *Clostridium ragsdalei*. В предпочтительном варианте реализации микроорганизм согласно настоящему изобретению получен из *Clostridium autoethanogenum* LZ1561, который внесен в коллекцию DSMZ под номером доступа DSM23693.

Микроорганизм согласно настоящему изобретению можно дополнительно классифицировать по функциональным характеристикам. Например, микроорганизм согласно настоящему изобретению может представлять собой или может быть получен из C1-поглощающего микроорганизма, анахроба, ацетогена, этанологена, карбоксидотрофа и/или метанотрофа.

«Вуда-Льюндаля» относится к каскаду усвоения углерода Вуда-Льюндаля, как описано, например, в публикации Ragsdale, *Biochim Biophys Acta*, 1784: 1873-1898, 2008. «Микроорганизмы Вуда-Льюндаля» относятся, как можно ожидать, к микроорганизмам, имеющим каскад Вуда-Льюндаля. Как правило, микроорганизм согласно настоящему изобретению имеет нативный каскад Вуда-Льюндаля. В данном контексте каскад Вуда-Льюндаля может быть нативным, немодифицированным каскадом Вуда-Льюндаля, или он может быть каскадом Вуда-Льюндаля с определенной степенью генетической модификации (т.е. сверхэкспрессии, гетерологичной экспрессии, нокаута и т.д.), при условии, что он все еще действует для конверсии CO, CO<sub>2</sub> и/или H<sub>2</sub> в ацетил-CoA.

«Анаэроб» представляет собой микроорганизм, для роста которого не нужен  $O_2$ . Анаэроб может отрицательно реагировать или даже погибать, если содержание  $O_2$  превышает некоторый предел. Однако некоторые анаэробы могут переносить низкие концентрации  $O_2$  (т.е. 0,000001-5%  $O_2$ ). Как правило, микроорганизм согласно  
5 настоящему изобретению представляет собой анаэроб.

«Ацетогены» являются облигатно-анаэробными бактериями, которые используют каскад Вуда-Льюнгдаля в качестве основного механизма сохранения энергии и синтеза ацетил-СоА и производных продуктов ацетил-СоА, таких как ацетат (Ragsdale, *Biochim Biophys Acta*, 1784: 1873-1898, 2008). В частности, ацетогены используют  
10 каскад Вуда-Льюнгдаля в качестве (1) механизма для восстановительного синтеза ацетил-СоА из  $CO_2$ , (2) для акцептирования концевоего электрона, процесса сохранения энергии, (3) механизма усвоения (ассимиляции)  $CO_2$  в синтезе клеточного углерода (Drake, *Acetogenic Prokaryotes*, в: *The Prokaryotes*, 3<sup>e</sup> издание, с. 354, Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, 2006). Все природные ацетогены являются  $C_1$ -поглощающими,  
15 анаэробными, аутотрофными и неметанотрофными. Как правило, микроорганизм согласно настоящему изобретению представляет собой ацетоген.

«Этанологен» представляет собой микроорганизм, который вырабатывает или может вырабатывать этанол. Как правило, микроорганизм согласно настоящему изобретению представляет собой этанологен.

«Аутотроф» представляет собой микроорганизм, способный расти в отсутствие органического углерода. Вместо этого аутотрофы используют неорганические источники углерода, такие как СО и/или  $CO_2$ . Как правило, микроорганизм согласно  
20 настоящему изобретению представляет собой аутотроф.

«Карбоксидотроф» представляет собой микроорганизм, способный использовать СО в качестве единственного источника углерода и энергии. Как правило, микроорганизм согласно настоящему изобретению представляет собой карбоксидотроф.

«Метанотроф» представляет собой микроорганизм, способный использовать метан в качестве единственного источника углерода и энергии. В некоторых вариантах реализации микроорганизм согласно настоящему изобретению представляет собой  
30 метанотроф или получен из метанотрофа. В других вариантах реализации микроорганизм согласно настоящему изобретению не представляет собой метанотроф или не получен из метанотрофа.

В таблице 1 представлен иллюстративный список микроорганизмов и указаны их функциональные характеристики.

Таблица 1

	Вуда-Льюндаля	С1-поглощение	Анаэроб	Ацетоген	Этанологен	Аутоτροφ	Карбоксидотроф
<i>Acetobacterium woodii</i>	+	+	+	+	+/- <sup>1</sup>	+	-
<i>Alkalibaculum bacchii</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Blautia producta</i>	+	+	+	+	-	+	+
<i>Butyribacterium methylotrophicum</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Clostridium aceticum</i>	+	+	+	+	-	+	+
<i>Clostridium autoethanogenum</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Clostridium carboxidivorans</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Clostridium coskatii</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Clostridium drakei</i>	+	+	+	+	-	+	+
<i>Clostridium formicoaceticum</i>	+	+	+	+	-	+	+
<i>Clostridium ljungdahlii</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Clostridium magnum</i>	+	+	+	+	-	+	+/- <sup>2</sup>
<i>Clostridium ragsdalei</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Clostridium scatologenes</i>	+	+	+	+	-	+	+
<i>Eubacterium limosum</i>	+	+	+	+	-	+	+
<i>Moorella thermoautotrophica</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Moorella thermoacetica</i> (бывший <i>Clostridium thermoaceticum</i> )	+	+	+	+	- <sup>3</sup>	+	+
<i>Oxobacter pfennigii</i>	+	+	+	+	-	+	+
<i>Sporomusa ovata</i>	+	+	+	+	-	+	+/- <sup>4</sup>
<i>Sporomusa silvacetica</i>	+	+	+	+	-	+	+/- <sup>5</sup>
<i>Sporomusa sphaeroides</i>	+	+	+	+	-	+	+/- <sup>6</sup>
<i>Thermoanaerobacter kiuvi</i>	+	+	+	+	-	+	-

<sup>1</sup> *Acetobacterium woodii* может вырабатывать этанол из фруктозы, но не из газа.

<sup>2</sup> Не изучено, может ли *Clostridium magnum* расти на CO.

<sup>3</sup> Описано, что один штамм *Moorella thermoacetica*, *Moorella* sp. HUC22-1, вырабатывает этанол из газа.

<sup>4</sup> Не изучено, может ли *Sporomusa ovata* расти на CO.

<sup>5</sup> Не изучено, может ли *Sporomusa silvacetica* расти на CO.

<sup>6</sup> Не изучено, может ли *Sporomusa sphaeroides* расти на CO.

«Нативный продукт» представляет собой продукт, вырабатываемый генетически немодифицированным микроорганизмом. Например, этанол, ацетат и 2,3-бутандиол являются нативными продуктами *Clostridium autoethanogenum*, *Clostridium ljungdahlii* и *Clostridium ragsdalei*. «Ненативный продукт» представляет собой продукт, вырабатываемый генетически модифицированным микроорганизмом, но который не вырабатывается генетически немодифицированным микроорганизмом, из которого получен генетически модифицированный микроорганизм.

«Селективность» относится к отношению выработки целевого продукта к выработке всех продуктов ферментации, выработанных микроорганизмом. Микроорганизм согласно настоящему изобретению может быть сконструирован для выработки продуктов с определенной селективностью или с минимальной селективностью. В одном варианте реализации доля целевого продукта составляет по меньшей мере примерно 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 50% или 75% от всех продуктов ферментации, выработанных микроорганизмом согласно настоящему изобретению. В одном варианте реализации доля целевого продукта составляет по меньшей мере 10% от всех продуктов ферментации, выработанных микроорганизмом согласно настоящему изобретению, так что микроорганизм согласно настоящему изобретению имеет селективность в отношении целевого продукта по меньшей мере 10%. В другом варианте реализации доля целевого продукта составляет по меньшей мере 30% от всех продуктов ферментации, выработанных микроорганизмом согласно настоящему изобретению, так что микроорганизм согласно настоящему изобретению имеет селективность в отношении целевого продукта по меньшей мере 30%.

Выращивание/ферментацию желательно проводить в подходящих условиях для выработки целевого продукта. Как правило, выращивание/ферментацию проводят в анаэробных условиях. Условия реакции, которые следует учитывать, включают давление (или парциальное давление), температуру, скорость газового потока, скорость потока жидкости, рН среды, редокс потенциал среды, скорость перемешивания (при использовании смесительного реактора непрерывного действия), содержание инокулята, максимальные концентрации газообразного субстрата, чтобы содержание газа в жидкой фазе не стало лимитирующим, и максимальные концентрации продукта во избежание ингибирования процесса. В частности, можно регулировать скорость введения субстрата, чтобы концентрация газа в жидкой фазе не стала лимитирующей, поскольку продукты могут расходоваться культурой в условиях ограниченного содержания газа.

Целевые продукты можно выделять или очищать из ферментативного бульона любым способом или комбинацией способов, известных в данной области техники, включая, например, фракционную перегонку, выпаривание, испарение через полупроницаемую

мембрану, отпаривание газом, разделение фаз и экстракционную ферментацию, включая, например, жидкость-жидкостную экстракцию. В некоторых вариантах реализации целевые продукты выделяют из ферментативного бульона непрерывным удалением части бульона из биореактора, выделением микробных клеток из бульона (обычно фильтрованием) и выделением одного или более целевых продуктов из бульона. Спирты и/или ацетон можно выделять, например, перегонкой. Кислоты можно выделять, например, адсорбцией на активированном древесном угле. Выделенные микробные клетки предпочтительно возвращают в биореактор. Фильтрат, не содержащий клеток, который остается после удаления целевых продуктов, также предпочтительно возвращают в биореактор. В фильтрат, не содержащий клеток, можно добавлять дополнительные питательные вещества (такие как витамины B) для пополнения среды перед ее возвратом в биореактор.

На фиг. 1А представлен способ интеграции промышленного процесса 110, одного или более модулей 120 очистки, процесса 130 электролиза  $\text{CO}_2$ , необязательного процесса 160 электролиза  $\text{H}_2$  и процесса 140, расходующего  $\text{CO}$ .  $\text{CO}_2$ -содержащий газ из промышленного процесса 110 подают по трубе 112 в один или более модулей 120 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 128. Затем очищенный газ из одного или более модулей 120 очистки подают по трубе 122 в модуль 130 электролиза  $\text{CO}_2$  для конверсии по меньшей мере части газового потока. В некоторых вариантах реализации  $\text{CO}_2$ -содержащий газ из промышленного процесса 110 напрямую подают по трубе 114 в модуль 130 электролиза  $\text{CO}_2$  для конверсии по меньшей мере части газового потока; в этом варианте реализации такой компонент, как сера, может быть удален до его пропускания через промышленный процесс. Необязательно, по меньшей мере часть  $\text{O}_2$  можно подавать из модуля 130 электролиза  $\text{CO}_2$  в промышленный процесс 110 по трубе 136. По меньшей мере часть конвертированного газового потока пропускают по трубе 132 из модуля 130 электролиза  $\text{CO}_2$  в процесс 140, расходующий  $\text{CO}$ . В некоторых вариантах реализации водный субстрат подают по трубе 162 в модуль 160 электролиза  $\text{H}_2$  для конверсии по меньшей мере части водного субстрата, а поток с повышенным содержанием  $\text{H}_2$  подают по трубе 164 в процесс 140, расходующий  $\text{CO}$ . Необязательно, по меньшей мере часть  $\text{O}_2$  можно подавать из модуля 160 электролиза  $\text{H}_2$  в промышленный процесс 110 по трубе 166. Процесс 140, расходующий  $\text{CO}$ , обеспечивает получение по меньшей мере одного продукта 146 и газообразного субстрата после процесса, расходующего  $\text{CO}$ .

Процесс 140, расходующий  $\text{CO}$ , изображенный на фиг. 1А, может представлять собой процесс ферментации газа и может происходить в инокуляторе и/или в одном или более биореакторах. Например, процесс 140, расходующий  $\text{CO}$ , может представлять собой процесс ферментации газа в биореакторе, содержащем культуру по меньшей

мере одного C1-поглощающего микроорганизма. В тех вариантах реализации, в которых процесс 140, расходующий CO, представляет собой процесс ферментации газа, культуру можно ферментировать с получением одного или более продуктов 146 ферментации и газообразного субстрата после ферментации (газообразного субстрата после процесса, расходующего CO).

В некоторых вариантах реализации процесс 140, расходующий CO, представленный на фиг. 1А, включает реакционную стадию получения CO<sub>2</sub>. В тех вариантах реализации, в которых газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, содержит CO<sub>2</sub>, по меньшей мере часть указанного газообразного субстрата после процесса, расходующего CO, подают по трубе 142 в один или более модулей 150 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 158. Очищенный газовый поток, содержащий CO<sub>2</sub>, затем подают по трубе 152 в модуль 130 электролиза CO<sub>2</sub> для конверсии по меньшей мере части газового потока. В конкретных вариантах реализации газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, подают по трубе 142 в те же один или более модулей 120 очистки, в которые подают CO<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 110. В различных вариантах реализации газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, можно подавать в один или более модулей 120 очистки, в которые подают CO<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 110, и в один или более модулей 150 очистки. Установлено, что такой процесс очистки и электролиза газообразного субстрата после процесса, расходующего CO, увеличивает эффективность улавливания углерода.

В конкретных вариантах реализации по меньшей мере один компонент, удаляемый в модуле 150 очистки, изображенном на фиг. 1А, получают, вводят и/или концентрируют в процессе 140, расходующем CO, таком как процесс ферментации газа. В различных вариантах реализации один или более компонентов, полученных, введенных и/или концентрированных на стадии ферментации, содержат серу. В некоторых случаях серу, такую как сероводород, вводят в процесс 140, расходующий CO. Обнаружено, что такая сера снижает эффективность модуля 130 электролиза CO<sub>2</sub>. Обнаружено, что модуль 150 очистки эффективен для снижения количества серы в газообразном субстрате после процесса, расходующего CO, перед подачей газообразного субстрата после процесса, расходующего CO, в модуль 130 электролиза CO<sub>2</sub>. Обнаружено, что применение модуля 150 очистки до модуля 130 электролиза CO<sub>2</sub> увеличивает эффективность модуля 130 электролиза CO<sub>2</sub>.

Авторами настоящего изобретения установлено, что побочный продукт электролиза CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>, кислород O<sub>2</sub> может обеспечивать дополнительное преимущество для промышленного процесса получения C1. Несмотря на то, что процессы ферментации согласно настоящему изобретению являются анаэробными процессами, авторами



настоящего изобретения обнаружено, что побочный продукт процесса получения CO, кислород O<sub>2</sub>, такой как O<sub>2</sub>, проходящий по трубе 136 на фиг. 1A, можно использовать в промышленном процессе получения C1. Побочный продукт процесса электролиза CO<sub>2</sub>, кислород O<sub>2</sub> высокой степени чистоты можно интегрировать в промышленный процесс и преимущественно возмещать затраты, а в некоторых случаях обеспечивать синергию, что дополнительно снижает затраты указанного промышленного процесса, а также последующей ферментации газа.

Как правило, промышленные процессы, описанные в настоящем документе, обеспечивают получение требуемого O<sub>2</sub> разделением воздуха. Получение O<sub>2</sub> разделением воздуха является энергоемким процессом, включающим криогенное отделение O<sub>2</sub> от N<sub>2</sub> для достижения наивысшей чистоты. Получение O<sub>2</sub> электролизом CO<sub>2</sub> и/или H<sub>2</sub> и замена O<sub>2</sub>, полученного разделением воздуха, может обеспечивать возмещение до 5% затрат на электричество в промышленном процессе.

Для некоторых промышленных процессов, в которых получают C1 с участием реакций частичного окисления, необходима подача O<sub>2</sub>. Иллюстративные промышленные процессы включают реакции в основной сталеплавильной печи (BOF), процессы сталеварения COREX или FINEX, процессы в доменной печи (BF), процессы получения ферросплавов, процессы получения диоксида титана и процессы газификации. Процессы газификации включают, но не ограничиваются ими, газификацию твердых бытовых отходов, газификацию биомассы, газификацию нефтяного кокса и газификацию угля. В одном или более из указанных промышленных процессов O<sub>2</sub> из процесса электролиза CO<sub>2</sub> можно использовать для возмещения или полной замены O<sub>2</sub>, обычно обеспечиваемого разделением воздуха.

Как показано на фиг. 1B и 1C, способ интеграции промышленного процесса, одного или более модулей очистки, процесса электролиза CO<sub>2</sub>, необязательного процесса электролиза H<sub>2</sub> и процесса, расходующего CO, может дополнительно включать интеграцию одного или более модулей 170 изменения давления. Например, как показано на фиг. 1B, по меньшей мере часть CO<sub>2</sub>-содержащего газа из промышленного процесса 110 подают по трубе 112 в модуль 170 изменения давления с получением сжатого CO<sub>2</sub>-содержащего газового потока. Затем по меньшей мере часть сжатого CO<sub>2</sub>-содержащего газового потока подают по трубе 172 в модуль 120 очистки. По меньшей мере часть газообразного субстрата после процесса, расходующего CO, также можно подавать по трубе 142 в модуль 170 изменения давления с получением сжатого хвостового газа. Затем по меньшей мере часть сжатого хвостового газа подают по трубе 172 в модуль 150 очистки и/или в модуль 120 очистки. Как показано на фиг. 1C, по меньшей мере часть потока конвертированного газа подают по трубе 132 из модуля 130 электролиза CO<sub>2</sub> в модуль 170 изменения

давления с получением сжатого СО-содержащего газового потока, который по трубе 172 подают в процесс 140, расходующий СО.

На фиг. 2 представлен способ интеграции промышленного процесса 210, модуля 220 очистки, модуля 230 электролиза  $\text{CO}_2$ , необязательного процесса 270 электролиза  $\text{H}_2$ , процесса 240, расходующего СО, и необязательного модуля 260 выделения  $\text{O}_2$ .  $\text{CO}_2$ -содержащий газ из промышленного процесса 210 подают по трубе 212 в один или более модулей 220 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 228. Затем очищенный газ из одного или более модулей 220 очистки подают по трубе 222 в модуль 230 электролиза  $\text{CO}_2$  для конверсии по меньшей мере части газового потока. Необязательно, по меньшей мере часть  $\text{O}_2$  можно подавать из модуля 230  $\text{CO}_2$  в промышленный процесс 210 по трубе 236. По меньшей мере часть потока конвертированного газа подают из модуля 230 электролиза  $\text{CO}_2$  в процесс 240, расходующий СО, по трубе 232 с получением продукта 246 и газообразного субстрата после процесса, расходующего СО. В некоторых вариантах реализации водный субстрат подают по трубе 272 в модуль 270 электролиза  $\text{H}_2$  для конверсии по меньшей мере части водного субстрата, а поток с повышенным содержанием  $\text{H}_2$  подают по трубе 274 в процесс 240, расходующий СО. Необязательно, по меньшей мере часть  $\text{O}_2$  можно подавать из модуля 270 электролиза  $\text{H}_2$  в промышленный процесс 210 по трубе 276.

В конкретных вариантах реализации предложенный процесс включает модуль 260 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 230 электролиза  $\text{CO}_2$  для выделения по меньшей мере части  $\text{O}_2$  из газового потока. В тех вариантах реализации, в которых используют модуль 260 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 230 электролиза  $\text{CO}_2$ , по меньшей мере часть газового потока подают из модуля 230 электролиза  $\text{CO}_2$  в модуль 260 выделения  $\text{O}_2$  по трубе 234. В тех вариантах реализации, которые содержат модуль 260 выделения  $\text{O}_2$ , по меньшей мере часть  $\text{O}_2$ , выделенного из газового потока из модуля 260 выделения  $\text{O}_2$  (поток с повышенным содержанием  $\text{O}_2$ ) можно подавать в промышленный процесс 210 по трубе 264. В тех вариантах реализации, в которых используют модуль 260 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 230 электролиза  $\text{CO}_2$ , по меньшей мере часть потока с пониженным содержанием  $\text{O}_2$  подают из модуля 260 выделения  $\text{O}_2$  в процесс 240, расходующий СО, по трубе 262. В некоторых вариантах реализации, в которых используют модуль 260 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 230 электролиза  $\text{CO}_2$ , по меньшей мере часть потока с пониженным содержанием  $\text{O}_2$  подают из модуля 260 выделения  $\text{O}_2$  обратно в модуль 230 электролиза  $\text{CO}_2$  по трубе 266. В тех вариантах реализации, в которых не используют модуль 260 выделения  $\text{O}_2$ , часть газового потока можно подавать из модуля 230 электролиза  $\text{CO}_2$  в промышленный процесс 210 по трубе 236.

В некоторых вариантах реализации процесс 240, расходуемый СО, представленный на фиг. 2, включает реакционную стадию получения СО<sub>2</sub>. В тех вариантах реализации, в которых газообразный субстрат после процесса, расходуемого СО, содержит СО<sub>2</sub>, по меньшей мере часть указанного газообразного субстрата после процесса, расходуемого СО, подают по трубе 242 в один или более модулей 250 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 258. Затем очищенный газовый поток подают по трубе 252 в модуль 230 электролиза СО<sub>2</sub> для конверсии по меньшей мере части газового потока. В конкретных вариантах реализации газообразный субстрат после процесса, расходуемого СО, подают по трубе 242 в те же один или более модулей 220 очистки, в которые подают СО<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 210. В различных вариантах реализации газообразный субстрат после процесса, расходуемого СО, можно подавать в один или более модулей 220 очистки, в которые подают СО<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 210, и в один или более модулей 250 очистки.

Процесс 240, расходуемый СО, изображенный на фиг. 2, может представлять собой процесс ферментации газа и может происходить в инокуляторе и/или в одном или более биореакторах. Например, процесс 240, расходуемый СО, может представлять собой процесс ферментации газа в биореакторе, содержащем культуру по меньшей мере одного С1-поглощающего микроорганизма. В тех вариантах реализации, в которых процесс 240, расходуемый СО, представляет собой процесс ферментации газа, культуру можно ферментировать с получением одного или более продуктов 246 ферментации и газообразного субстрата после ферментации (газообразного субстрата после процесса, расходуемого СО).

Установлено, что условие высокой чистоты потока СО<sub>2</sub> (потока с повышенным содержанием СО<sub>2</sub>), подаваемого в процесс электролиза СО<sub>2</sub>, увеличивает эффективность (улавливание углерода) процесса, расходуемого СО. Для увеличения концентрации СО<sub>2</sub> в потоке в указанный процесс можно внедрять один или более модулей концентрирования СО<sub>2</sub>. Предпочтительно, поток после электролиза имеет концентрацию СО 20-90%.

На фиг. 3 представлен способ интеграции промышленного процесса 310 с необязательным модулем 370 концентрирования СО<sub>2</sub>, модулем 320 очистки, модулем 330 электролиза СО<sub>2</sub>, необязательным модулем 380 электролиза Н<sub>2</sub>, процессом 340, расходуемым СО, и необязательным модулем 360 выделения О<sub>2</sub>, в соответствии с одним аспектом настоящего изобретения. В тех вариантах реализации, в которые не включен модуль 370 концентрирования СО<sub>2</sub>, СО<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 310 подают по трубе 312 в модуль 320 очистки. В тех вариантах реализации, в которые включен модуль 370 концентрирования СО<sub>2</sub>, СО<sub>2</sub>-содержащий газ из

промышленного процесса 310 подают по трубе 314 в модуль 370 концентрирования  $\text{CO}_2$  для увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  в газовом потоке и для удаления одного или более компонентов 374. Газовый поток концентрированного  $\text{CO}_2$  подают по трубе 372 в один или более модулей 320 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 328. Очищенный газ из одного или более модулей 320 очистки затем подают по трубе 322 в модуль 330 электролиза  $\text{CO}_2$  для конверсии по меньшей мере части газового потока. По меньшей мере часть конвертированного газового потока подают из модуля 330 электролиза  $\text{CO}_2$  в процесс 340, расходующий  $\text{CO}$ , по трубе 332. В некоторых вариантах реализации компонент 374 представляет собой  $\text{CO}$  и/или  $\text{H}_2$ , который подают по трубе 376 в процесс 340, расходующий  $\text{CO}$ . В некоторых вариантах реализации водный субстрат подают по трубе 382 в модуль 380 электролиза  $\text{H}_2$  для конверсии по меньшей мере части водного субстрата, а поток с повышенным содержанием  $\text{H}_2$  подают по трубе 384 в процесс 340, расходующий  $\text{CO}$ . Необязательно, по меньшей мере часть  $\text{O}_2$  можно подавать из модуля 380 электролиза  $\text{H}_2$  в промышленный процесс 310 по трубе 386.

По меньшей мере часть газового потока из модуля 330 электролиза  $\text{CO}_2$  можно подавать в промышленный процесс 310 по трубе 336. В конкретных вариантах реализации предложенный процесс включает модуль 360 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 330 электролиза  $\text{CO}_2$ , где газовый поток подают из модуля 330 электролиза  $\text{CO}_2$  в модуль 360 выделения  $\text{O}_2$  по трубе 334 для выделения по меньшей мере части  $\text{O}_2$  из газового потока. В тех вариантах реализации, в которых используют модуль 360 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 330 электролиза  $\text{CO}_2$ , по меньшей мере часть удаленного  $\text{O}_2$  (поток с повышенным содержанием  $\text{O}_2$ ) подают из модуля 360 выделения  $\text{O}_2$  в промышленный процесс 310 по трубе 364. В тех вариантах реализации, в которых используют модуль 360 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 330 электролиза  $\text{CO}_2$ , по меньшей мере часть потока с пониженным содержанием  $\text{O}_2$  подают из модуля 360 выделения  $\text{O}_2$  в процесс 340, расходующий  $\text{CO}$ , по трубе 362. В некоторых вариантах реализации, в которых используют модуль 360 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 330 электролиза  $\text{CO}_2$ , по меньшей мере часть потока с пониженным содержанием  $\text{O}_2$  подают из модуля 260 выделения  $\text{O}_2$  обратно в модуль 330 электролиза  $\text{CO}_2$  по трубе 366. В тех вариантах реализации, в которых не используют модуль 360 выделения  $\text{O}_2$ , часть газового потока можно подавать из модуля 330 электролиза  $\text{CO}_2$  в промышленный процесс 310 по трубе 336.

Обнаружено, что процесс концентрирования  $\text{CO}_2$  в газовом потоке до одного или более модулей 320 очистки обеспечивает уменьшение содержания нежелательных газов, увеличивая эффективность процесса, расходующего  $\text{CO}$ , такого как процесс ферментации. Количество  $\text{O}_2$ , образующегося на анодной стороне модуля электролиза, составляет 50% от количества  $\text{CO}_2$ , образующегося на катоде модуля

электролиза. Полученный  $O_2$  можно использовать для повышения эффективности промышленного процесса 310, причем по меньшей мере часть газового потока после электролиза подают в промышленный процесс 310.

5 В некоторых вариантах реализации процесс 340, расходующий  $CO$ , представленный на фиг. 3, включает реакционную стадию получения  $CO_2$ . В тех вариантах реализации, в которых газообразный субстрат после процесса, расходующего  $CO$ , содержит  $CO_2$ , указанный газообразный субстрат после процесса, расходующего  $CO$ , подают по трубе 342 в один или более модулей 350 очистки для удаления и/или конверсии  
10 одного или более компонентов 358. Затем очищенный газовый поток подают по трубе 352 в модуль 330 электролиза  $CO_2$  для конверсии по меньшей мере части газового потока. В конкретных вариантах реализации газообразный субстрат после процесса, расходующего  $CO$ , подают по трубе 342 в один или более модулей 320 очистки, в которые подают  $CO_2$ -содержащий газ из промышленного процесса 310. В различных вариантах реализации газообразный субстрат после процесса, расходующего  $CO$ ,  
15 можно подавать в один или более модулей 320 очистки, в которые подают  $CO_2$ -содержащий газ из промышленного процесса 310, и в один или более модулей 350 очистки.

Процесс 340, расходующий  $CO$ , изображенный на фиг. 3, может представлять собой процесс ферментации газа и может происходить в инокуляторе и/или в одном или  
20 более биореакторах. Например, процесс, расходующий  $CO$ , может представлять собой процесс ферментации газа в биореакторе, содержащем культуру по меньшей мере одного  $C1$ -поглощающего микроорганизма. В процессе 340, расходующем  $CO$ , культуру ферментируют с получением одного или более продуктов 346 ферментации и газообразного субстрата после процесса, расходующего  $CO$ .

25 В конкретных вариантах реализации модуль концентрирования  $CO_2$  может быть расположен после модуля очистки. На фиг. 4 представлен способ интеграции промышленного процесса 410 с модулем 420 очистки, необязательным модулем 470 концентрирования  $CO_2$ , модулем 430 электролиза  $CO_2$ , необязательным модулем 480 электролиза  $H_2$ , процессом 440, расходующим  $CO$ , и необязательным модулем 460  
30 выделения  $O_2$ , в соответствии с одним аспектом настоящего изобретения. В тех вариантах реализации, в которые не включен необязательный модуль 470 концентрирования  $CO_2$ ,  $CO_2$ -содержащий газ из промышленного процесса 410 подают из модуля 420 очистки в модуль 430 электролиза  $CO_2$  по трубе 422. В тех вариантах реализации, в которые включен необязательный модуль 470 концентрирования  $CO_2$ ,  
35  $CO_2$ -содержащий газ из промышленного процесса 410 подают по трубе 412 в один или более модулей 420 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 428. Затем очищенный поток подают по трубе 424 в необязательный

модуль 470 концентрирования  $\text{CO}_2$  для увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  в газовом потоке и для удаления одного или более компонентов 474. Газовый поток концентрированного  $\text{CO}_2$  затем подают по трубе 472 в модуль 430 электролиза  $\text{CO}_2$  для конверсии по меньшей мере части газового потока. По меньшей мере часть конвертированного газового потока можно подавать из модуля 430 электролиза  $\text{CO}_2$  в процесс 440, расходующий  $\text{CO}$ , по трубе 432. В некоторых вариантах реализации компонент 474 представляет собой  $\text{CO}$  и/или  $\text{H}_2$ , который подают по трубе 476 в процесс 440, расходующий  $\text{CO}$ . В некоторых вариантах реализации водный субстрат подают по трубе 482 в модуль 480 электролиза  $\text{H}_2$  для конверсии по меньшей мере части водного субстрата, а поток с повышенным содержанием  $\text{H}_2$  подают по трубе 484 в процесс 440, расходующий  $\text{CO}$ . Необязательно, по меньшей мере часть  $\text{O}_2$  можно подавать из модуля 480 электролиза  $\text{H}_2$  в промышленный процесс 410 по трубе 486.

По меньшей мере часть газового потока из модуля 430 электролиза  $\text{CO}_2$  можно подавать в промышленный процесс 410 по трубе 436. В конкретных вариантах реализации указанный процесс включает модуль 460 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 430 электролиза  $\text{CO}_2$  для выделения по меньшей мере части  $\text{O}_2$  из газового потока. В тех вариантах реализации, которые включают модуль 460 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 430 электролиза  $\text{CO}_2$ , газовый поток подают по трубе 434 из модуля 430 электролиза  $\text{CO}_2$  в модуль 460 выделения  $\text{O}_2$ . В тех вариантах реализации, которых используют модуль 460 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 430 электролиза  $\text{CO}_2$ , по меньшей мере часть газового потока подают из модуля 460 выделения  $\text{O}_2$  в промышленный процесс 410 по трубе 464. В тех вариантах реализации, в которых используют модуль 460 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 430 электролиза  $\text{CO}_2$ , по меньшей мере часть потока с пониженным содержанием  $\text{O}_2$  подают из модуля 460 выделения  $\text{O}_2$  в процесс, расходующий  $\text{CO}$ , по трубе 462. В некоторых вариантах реализации, в которых используют модуль 460 выделения  $\text{O}_2$  после модуля 430 электролиза  $\text{CO}_2$ , по меньшей мере часть потока с пониженным содержанием  $\text{O}_2$  подают из модуля 460 выделения  $\text{O}_2$  обратно в модуль 430 электролиза  $\text{CO}_2$  по трубе 466. В тех вариантах реализации, в которых не используют модуль 460 выделения  $\text{O}_2$ , часть газового потока можно подавать из модуля 430 электролиза  $\text{CO}_2$  в промышленный процесс 410 по трубе 436.

В некоторых вариантах реализации процесс 440, расходующий  $\text{CO}$ , представленный на фиг. 4, включает реакционную стадию получения  $\text{CO}_2$ . В тех вариантах реализации, в которых газообразный субстрат после процесса, расходующего  $\text{CO}$ , содержит  $\text{CO}_2$ , по меньшей мере часть указанного газообразного субстрата после процесса, расходующего  $\text{CO}$ , подают по трубе 442 в один или более модулей 450 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 458. Затем очищенный газовый поток подают по трубе 452 в модуль 430 электролиза  $\text{CO}_2$  для конверсии по меньшей мере части газового потока. В конкретных вариантах реализации

газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, подают по трубе 442 в те же один или более модулей 420 очистки, в которые подают CO<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 410. В различных вариантах реализации газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, можно подавать в один или более модулей 420 очистки, в которые подают CO<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 410, и в один или более модулей 450 очистки.

Процесс 440, расходующий CO, изображенный на фиг. 4, может представлять собой процесс ферментации газа и может происходить в инокуляторе и/или в одном или более биореакторах. Например, процесс 440, расходующий CO, может представлять собой процесс ферментации газа в биореакторе, содержащем культуру по меньшей мере одного C1-поглощающего микроорганизма. В тех вариантах реализации, в которых процесс 440, расходующий CO, представляет собой процесс ферментации газа, культуру можно ферментировать с получением одного или более продуктов 446 ферментации и газообразного субстрата после ферментации (газообразного субстрата после процесса, расходующего CO).

На фиг. 5 представлен способ интеграции промышленного процесса 510 с модулем 520 очистки, необязательным модулем 570 концентрирования CO<sub>2</sub>, модулем 530 электролиза CO<sub>2</sub>, процессом 540, расходующим CO, необязательным модулем 560 выделения O<sub>2</sub>, необязательным модулем 580 изменения давления и необязательным модулем 1500 электролиза H<sub>2</sub>, в соответствии с одним аспектом настоящего изобретения. CO<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 510 подают по трубе 512 в один или более модулей 520 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 528. Очищенный газ из одного или более модулей 520 очистки затем подают по трубе 522 в модуль 530 электролиза CO<sub>2</sub> для конверсии по меньшей мере части газового потока. В тех вариантах реализации, в которых осуществляют смешивание H<sub>2</sub>, модуль 1500 гидролиза-электролиза может обеспечивать подачу газового потока с повышенным содержанием H<sub>2</sub>, по трубе 1502, для его смешивания с потоком конвертированного газа перед его подачей в процесс 540, расходующий CO.

В конкретных вариантах реализации настоящего изобретения предложен один или более модулей 580 изменения давления для повышения давления конвертированного газа из модуля 530 электролиза CO<sub>2</sub>. В тех вариантах реализации, в которых используют модуль 580 изменения давления после модуля 530 электролиза CO<sub>2</sub>, по меньшей мере часть газового потока подают из модуля 530 электролиза CO<sub>2</sub> в модуль 580 изменения давления по трубе 532. Модуль 580 изменения давления обеспечивает повышение давления газового потока и подачу газового потока в процесс 540, расходующий CO, по трубе 582.

В различных вариантах реализации модуль 1500 электролиза  $H_2$  внедрен в модуль 560 выделения  $O_2$  и/или в модуль 580 изменения давления. В различных вариантах реализации водяной субстрат подают по трубе 1506 в модуль 1500 электролиза  $H_2$ , а модуль 1500 электролиза  $H_2$  может обеспечивать подачу газового потока с повышенным содержанием  $H_2$  по трубе 1502 для его смешивания с потоком конвертированного газа перед введением указанного газового потока в процесс 540, расходуемый  $CO$ . В конкретных вариантах реализации труба 1502 для подачи газового потока с повышенным содержанием  $H_2$  соединена с трубой 582 для подачи сжатого потока с повышенным содержанием  $CO$  для обеспечения смешивания указанных потоков. В различных вариантах реализации модуль 1500 электролиза  $H_2$  обеспечивает подачу газового потока с повышенным содержанием  $H_2$  непосредственно в процесс 540, расходуемый  $CO$ , по трубе 1504. Необязательно, по меньшей мере часть  $O_2$  можно подавать из модуля 1500 электролиза  $H_2$  в промышленный процесс 510 по трубе 1508.

В некоторых вариантах реализации настоящее изобретение обеспечивает интеграцию промышленного процесса 510, необязательного модуля 570 концентрирования  $CO_2$ , модуля 520 очистки, модуля 530 электролиза  $CO_2$ , необязательного модуля 560 выделения  $O_2$ , необязательного модуля 580 изменения давления, модуля 1500 электролиза  $H_2$  и процесса 540, расходуемого  $CO$ , в соответствии с одним аспектом настоящего изобретения.  $CO_2$ -содержащий газ из промышленного процесса 510 подают по трубе 514 в необязательный модуль 570 концентрирования  $CO_2$  для повышения концентрации  $CO_2$  в газовом потоке и для удаления одного или более компонентов 574. Необязательный модуль 570 концентрирования  $CO_2$  обеспечивает подачу газа в модуль 520 очистки по трубе 572 для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 528. Затем очищенный поток подают по трубе 524 в необязательный модуль 570 концентрирования  $CO_2$  для повышения концентрации  $CO_2$  в газовом потоке и для удаления одного или более компонентов 574. Необязательный модуль 570 концентрирования  $CO_2$  обеспечивает подачу газа по трубе 572 в модуль 530 электролиза  $CO_2$  для конверсии по меньшей мере части газового потока. По меньшей мере часть потока конвертированного газа можно подавать в необязательный модуль 560 выделения  $O_2$  по трубе 534 для выделения по меньшей мере части  $O_2$  из газового потока. По меньшей мере часть газового потока с повышенным содержанием  $O_2$  можно подавать из необязательного модуля 560 выделения  $O_2$  в промышленный процесс 510 по трубе 564. По меньшей мере часть газового потока с повышенным содержанием  $O_2$  можно подавать из модуля 530 электролиза  $CO_2$  в промышленный процесс 510 по трубе 536. По меньшей мере часть газового потока с пониженным содержанием  $O_2$  можно подавать из необязательного модуля 560 выделения  $O_2$  в необязательный модуль 580 изменения давления по



трубе 562. Газовый поток из необязательного модуля 580 изменения давления по трубе 582 подают в процесс 540, расходующий CO. Указанный газовый поток можно смешивать с газовым потоком с повышенным содержанием H<sub>2</sub> перед его подачей в процесс 540, расходующий CO. Предпочтительно, газовый поток с повышенным содержанием H<sub>2</sub> подают из модуля 1500 электролиза H<sub>2</sub> по трубе 1502.

Процесс 540, расходующий CO, изображенный на фиг. 5, обеспечивает получение продукта 546. Процесс, расходующий CO, может представлять собой процесс ферментации газа и может происходить в инокуляторе и/или в одном или более биореакторах. Например, процесс, расходующий CO, может включать ферментацию культуры с получением одного или более продуктов 546 ферментации и газообразного субстрата после ферментации (газообразного субстрата после процесса, расходующего CO). Газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, можно подавать по трубе 542 в модуль 550 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 558. В тех вариантах реализации, в которых используют модуль 570 концентрирования CO<sub>2</sub> после процесса, расходующего CO, указанный газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, можно подавать по трубе 544 в необязательный модуль 570 концентрирования CO<sub>2</sub> для повышения концентрации CO<sub>2</sub> в газовом потоке и для удаления одного или более компонентов 574. Необязательный модуль 570 концентрирования CO<sub>2</sub> может обеспечивать подачу газообразного субстрата после процесса, расходующего CO, в модуль 550 очистки по трубе 572 для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 558. Затем очищенный газовый поток можно подавать по трубе 552 в модуль 530 электролиза CO<sub>2</sub> для конверсии по меньшей мере части газового потока. В конкретных вариантах реализации газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, подают по трубе 542 в те же один или более модулей 520 очистки, в которые подают CO<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 510. В различных вариантах реализации газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, можно подавать в один или более модулей 520 очистки, в которые подают CO<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 510, и в один или более модулей 550 очистки.

Настоящее изобретение, в целом, обеспечивает возможность удаления компонентов из газового потока, которые могут неблагоприятно влиять на следующие процессы, например, на следующий процесс ферментации, и/или на следующие модули. В конкретных вариантах реализации настоящего изобретения предложены один или более дополнительных модулей очистки между различными модулями для предотвращения возникновения таких неблагоприятных эффектов.

В разных случаях конверсия  $\text{CO}_2$ -содержащего газообразного субстрата в модуле электролиза  $\text{CO}_2$  приводит к получению одного или более компонентов, проходящих через модуль 630 электролиза  $\text{CO}_2$ . В различных вариантах реализации это приводит к присутствию одного или более компонентов в потоке с повышенным содержанием  $\text{CO}$ . В некоторых случаях указанный компонент содержит части конвертированного  $\text{O}_2$ . В различных вариантах реализации дополнительный модуль очистки представляет собой модуль дезоксигенации для удаления  $\text{O}_2$  из потока с повышенным содержанием  $\text{CO}$ .

На фиг. 6 представлена интеграция модуля 630 электролиза  $\text{CO}_2$ , необязательного модуля 660 выделения  $\text{O}_2$ , необязательного модуля 680 изменения давления с дополнительным модулем 690 очистки. В некоторых случаях дополнительный модуль 690 очистки используют после модуля 630 электролиза  $\text{CO}_2$ . В тех вариантах реализации, в которых используют дополнительный модуль 690 очистки после модуля 630 электролиза  $\text{CO}_2$ , по меньшей мере часть газового потока подают из модуля 630 электролиза  $\text{CO}_2$  в дополнительный модуль 690 очистки по трубе 632. Дополнительный модуль 690 очистки обеспечивает удаление и/или конверсию одного или более компонентов 698 в газовом потоке. Кроме того, при использовании необязательного модуля 660 выделения  $\text{O}_2$ , указанный модуль 660 выделения  $\text{O}_2$  обеспечивает подачу газового потока по трубе 662 в дополнительный модуль 690 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 698. Затем очищенный поток подают по трубе 692 в необязательный модуль 680 изменения давления.

В некоторых вариантах реализации настоящее изобретение обеспечивает интеграцию промышленного процесса 610, необязательного модуля 670 концентрирования  $\text{CO}_2$ , модуля 620 очистки, модуля 630 электролиза  $\text{CO}_2$ , дополнительного модуля 690 очистки, необязательного модуля 660 выделения  $\text{O}_2$ , необязательного модуля 680 изменения давления, необязательного модуля 1600 электролиза  $\text{H}_2$  и процесса 640, расходующего  $\text{CO}$ , в соответствии с одним аспектом настоящего изобретения. В тех вариантах реализации, которые не включают необязательный модуль 670 концентрирования  $\text{CO}_2$  между промышленным процессом 610 и модулем 620 очистки,  $\text{CO}_2$ -содержащий газ из промышленного процесса 610 подают по трубе 612 в модуль 620 очистки. В тех вариантах реализации, которые включают необязательный модуль 670 концентрирования  $\text{CO}_2$  между промышленным процессом 610 и модулем 620 очистки,  $\text{CO}_2$ -содержащий газ из промышленного процесса 610 подают по трубе 614 в необязательный модуль 670 концентрирования  $\text{CO}_2$  для повышения концентрации  $\text{CO}_2$  в газовом потоке и для удаления одного или более компонентов 674. Необязательный модуль 670 концентрирования  $\text{CO}_2$  обеспечивает подачу газа в модуль 620 очистки по трубе 672 для удаления и/или конверсии одного или более

компонентов 628. В тех вариантах реализации, которые не включают модуль 670 концентрирования  $\text{CO}_2$  между модулем 620 очистки и модулем 630 электролиза  $\text{CO}_2$ , очищенный поток подают по трубе 622 из модуля 620 очистки в модуль 630 электролиза  $\text{CO}_2$ . В тех вариантах реализации, которые включают модуль 670 концентрирования  $\text{CO}_2$  между модулем 620 очистки и модулем 630 электролиза  $\text{CO}_2$ , очищенный поток затем подают по трубе 624 в необязательный модуль 670 концентрирования  $\text{CO}_2$  для повышения концентрации  $\text{CO}_2$  в газовом потоке и для удаления одного или более компонентов 674. Необязательный модуль 670 концентрирования  $\text{CO}_2$  обеспечивает подачу газа по трубе 672 в модуль 630 электролиза  $\text{CO}_2$  для конверсии по меньшей мере части газового потока. По меньшей мере часть газового потока с повышенным содержанием  $\text{O}_2$  можно подавать из модуля 630 электролиза  $\text{CO}_2$  в промышленный процесс 610 по трубе 636. По меньшей мере часть газового потока с повышенным содержанием  $\text{CO}$  можно подавать по трубе 632 в дополнительный модуль 690 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 698. По меньшей мере часть очищенного газового потока можно подавать по трубе 634 в необязательный модуль 660 выделения  $\text{O}_2$  для выделения по меньшей мере части  $\text{O}_2$  из газового потока. По меньшей мере часть газового потока с повышенным содержанием  $\text{O}_2$  можно подавать по трубе 664 из необязательного модуля 660 выделения  $\text{O}_2$  в промышленный процесс 610. По меньшей мере часть газового потока можно подавать из необязательного модуля 660 выделения  $\text{O}_2$  по трубе 662 в дополнительный модуль 690 очистки для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 698. По меньшей мере часть газового потока можно подавать из дополнительного модуля 690 очистки по трубе 692 в необязательный модуль 680 изменения давления. Газовый поток из необязательного модуля 680 изменения давления подают по трубе 682 в процесс 640, расходующий  $\text{CO}$ . Указанный газовый поток можно смешивать с газовым потоком с повышенным содержанием  $\text{H}_2$  перед его подачей в процесс 640, расходующий  $\text{CO}$ . Предпочтительно, водный субстрат подают по трубе 1606 в модуль 1600 электролиза  $\text{H}_2$ , а газовый поток с повышенным содержанием  $\text{H}_2$  подают из модуля 1600 электролиза  $\text{H}_2$  по трубе 1602. В различных вариантах реализации модуль 1600 электролиза  $\text{H}_2$  обеспечивает подачу газового потока с повышенным содержанием  $\text{H}_2$  непосредственно в процесс 640, расходующий  $\text{CO}$ , по трубе 1604. В некоторых вариантах реализации  $\text{O}_2$ , полученный в модуле 1600 электролиза  $\text{H}_2$ , подают по трубе 1608 в промышленный процесс 610.

Процесс 640, расходующий  $\text{CO}$ , изображенный на фиг. 6, может обеспечивать получение продукта 646. Процесс, расходующий  $\text{CO}$ , может представлять собой процесс ферментации газа и может происходить в инокуляторе и/или в одном или более биореакторах. Например, процесс, расходующий  $\text{CO}$ , может включать

ферментацию культуры с получением одного или более продуктов 646 ферментации и газообразного субстрата после ферментации (газообразного субстрата после процесса, расходующего CO). Газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, подают по трубе 644 в необязательный модуль 670 концентрирования CO<sub>2</sub> для повышения концентрации CO<sub>2</sub> в газовом потоке и для удаления одного или более компонентов 674. Необязательный модуль 670 концентрирования CO<sub>2</sub> обеспечивает подачу газообразного субстрата после процесса, расходующего CO, в модуль 650 очистки по трубе 672 для удаления и/или конверсии одного или более компонентов 658. Затем очищенный газовый поток подают по трубе 652 в модуль 630 электролиза CO<sub>2</sub> для конверсии по меньшей мере части газового потока. В конкретных вариантах реализации газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, подают по трубе 642 в те же один или более модулей 620 очистки, в которые подают CO<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 610. В различных вариантах реализации газообразный субстрат после процесса, расходующего CO, можно подавать в один или более модулей 620 очистки, в которые подают CO<sub>2</sub>-содержащий газ из промышленного процесса 610, и в один или более модулей 650 очистки.

В различных вариантах реализации настоящего изобретения предложен интегрированный процесс, включающий электролиз, причем энергия, подаваемая для процесса электролиза, по меньшей мере частично получена из возобновляемого источника энергии.

Несмотря на то, что субстрат обычно является газообразным, субстрат также может быть обеспечен в альтернативных формах. Например, субстрат может быть растворен в жидкости, насыщенной CO-содержащим газом, с помощью генератора дисперсии микропузырьков. В качестве дополнительного пример, субстрат может быть адсорбирован на твердой подложке.

C1-поглощающий микроорганизм в биореакторе, как правило, представляет собой карбоксидотрофную бактерию. В конкретных вариантах реализации карбоксидотрофные бактерии выбраны из группы, включающей *Moorella*, *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Acetobacterium*, *Eubacterium*, *Butyribacterium*, *Oxobacter*, *Methanosarcina*, *Methanosarcina* и *Desulfotomaculum*. В различных вариантах реализации карбоксидотрофные бактерии представляют собой *Clostridium autoethanogenum*.

Все ссылки, включая публикации, патентные заявки и патенты, цитируемые в настоящем документе, включены в настоящий документ посредством ссылки в той же степени, как если бы каждая ссылка была отдельно и специально указана как включенная посредством ссылки и была представлена в настоящем документе в полном объеме. Упоминание любого известного уровня техники в данном описании не

является и не должно рассматриваться как признание того, что известный уровень техники образует часть широко известных общих знаний в области в области науки.

5 Термины в единственном числе, используемые в контексте описания настоящего изобретения (особенно в контексте следующей формулы изобретения) следует толковать как включающие единственное и множественное число, если в настоящем документе не указано иное, или очевидно не опровергается контекстом. Термины «включающий», «имеющий» и «содержащий» следует толковать как не ограничивающие термины (то есть, означающие «включая, но не ограничиваясь ими»), если не указано иное. Термин «состоящий по существу из» ограничивает  
10 объем композиции, процесса или способа до конкретных материалов или стадий или до таких материалов и стадий, которые не оказывают существенного влияния на базовые и новые характеристики композиции, процесса или способа. Использование альтернативы (т.е. «или») следует понимать как обозначение одного, обоих или любой комбинации предложенных вариантов. В данном контексте термин «примерно»  
15 означает  $\pm 20\%$  от указанного диапазона, значения или структуры, если не указано иное.

Перечисление диапазонов значений в данном документе предназначено лишь для краткости отдельного упоминания каждого отдельного значения, входящего в указанный диапазон, если не указано иное, и каждое отдельное значение включено в  
20 данное описание, как если бы оно было специально перечислено в данном документе. Например, любой диапазон концентраций, диапазон процентов, диапазон соотношений, диапазон целых чисел, диапазон размеров или диапазон толщины следует понимать как включающий значение любого целого числа в указанном диапазоне и, если это уместно, его долей (например, одной десятой и одной сотой  
25 целого числа), если не указано иное.

Все способы, описанные в данном документе, могут быть выполнены в любом подходящем порядке, если в данном документе не указано иное, или если очевидно не опровергается контекстом. Применение любого или всех примеров или иллюстративной формулировки (т.е. «такой как»), представленных в настоящем  
30 документе, предназначено только для лучшего освещения настоящего изобретения и не ориентировано на ограничение рамок настоящего изобретения, если не заявлено иное. Никакие формулировки данного описания не следует толковать как указывающие на незаявленный элемент, существенный для практического осуществления данного изобретения.

35 В настоящем документе описаны предпочтительные варианты реализации настоящего изобретения. Вариации этих предпочтительных вариантов реализации станут понятными специалистам в данной области при прочтении представленного

выше описания. Авторы настоящего изобретения ожидают, что опытные специалисты осуществят такие вариации надлежащим образом, и авторы изобретения полагают, что настоящее изобретение может быть осуществлено на практике другим способом, чем конкретно описано в настоящем документе. Соответственно, настоящее изобретение включает все модификации и эквиваленты предмета обсуждения, изложенного в формуле изобретения, прилагаемой к этому документу, насколько допускается применимыми правовыми нормами. Кроме того, любая комбинация вышеописанных элементов во всех их возможных вариантах охватывается изобретением, если иное не указано в настоящем документе или явно не противоречит контексту.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ повышения эффективности конверсии углерода, включающий:
  - a. подачу  $\text{CO}_2$ -содержащего газообразного субстрата из промышленного процесса в первый модуль очистки для удаления по меньшей мере одного компонента из  $\text{CO}_2$ -содержащего газообразного субстрата с получением первого газового потока очищенного  $\text{CO}_2$ ;
  - b. подачу первого газового потока очищенного  $\text{CO}_2$  в модуль электролиза  $\text{CO}_2$  для конверсии по меньшей мере части первого газового потока очищенного  $\text{CO}_2$  с получением потока с повышенным содержанием  $\text{CO}$  и первого потока с повышенным содержанием  $\text{O}_2$ ; и
  - c. подачу по меньшей мере части потока с повышенным содержанием  $\text{CO}$  в процесс, расходующий  $\text{CO}$ .
  
2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что  $\text{CO}_2$ -содержащий газообразный субстрат из промышленного процесса сначала подают в модуль изменения давления с получением сжатого  $\text{CO}_2$ -содержащего газового потока, и сжатый  $\text{CO}_2$ -содержащий газовый поток подают в первый модуль очистки.
  
3. Способ по п. 1, дополнительно включающий одно или более из:
  - a. подачи по меньшей мере части первого потока с повышенным содержанием  $\text{O}_2$  непосредственно в промышленный процесс; и
  - b. подачи по меньшей мере части первого потока с повышенным содержанием  $\text{O}_2$  в модуль выделения  $\text{O}_2$  с получением второго потока с повышенным содержанием  $\text{O}_2$  и потока с пониженным содержанием  $\text{O}_2$ .
  
4. Способ по п. 3, дополнительно включающий одно или более из:
  - a. подачи по меньшей мере части второго потока с повышенным содержанием  $\text{O}_2$  в промышленный процесс;
  - b. подачи по меньшей мере части потока с пониженным содержанием  $\text{O}_2$  в модуль электролиза  $\text{CO}_2$ ; и
  - c. подачи по меньшей мере части потока с пониженным содержанием  $\text{O}_2$  в процесс, расходующий  $\text{CO}$ .
  
5. Способ по п. 1, дополнительно включающий подачу по меньшей мере части  $\text{CO}_2$ -содержащего газообразного субстрата из промышленного процесса и/или по меньшей мере части первого потока газа очищенного  $\text{CO}_2$  в первый модуль концентрирования  $\text{CO}_2$  с получением первого концентрированного потока  $\text{CO}_2$  и первого потока с пониженным содержанием  $\text{CO}_2$ .

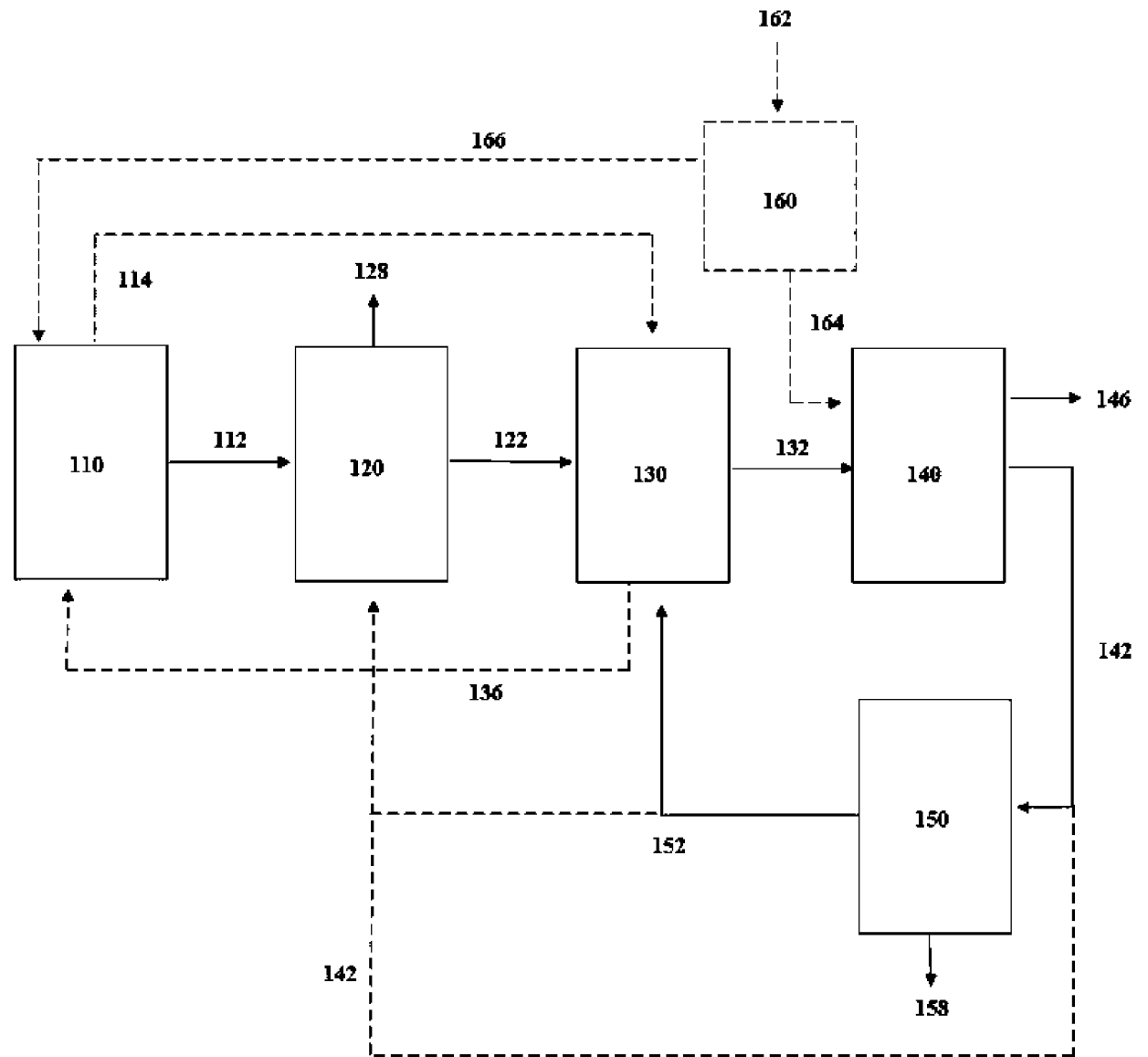
6. Способ по п. 5, дополнительно включающий подачу по меньшей мере части первого концентрированного потока  $\text{CO}_2$  в один или более из первого модуля очистки и модуля электролиза  $\text{CO}_2$ .
7. Способ по п. 5, отличающийся тем, что первый поток с пониженным содержанием  $\text{CO}_2$  содержит  $\text{CO}$  и/или  $\text{H}_2$ , и указанный способ дополнительно включает подачу по меньшей мере части первого потока с пониженным содержанием  $\text{CO}_2$  в процесс, расходующий  $\text{CO}$ .
8. Способ по п. 1, включающий подачу по меньшей мере части потока с повышенным содержанием  $\text{CO}$  в модуль изменения давления с получением сжатого потока  $\text{CO}$  и подачу по меньшей мере части сжатого потока  $\text{CO}$  в процесс, расходующий  $\text{CO}$ .
9. Способ по п. 1, дополнительно включающий подачу водного субстрата в модуль электролиза  $\text{H}_2$  с получением потока с повышенным содержанием  $\text{H}_2$  и подачу по меньшей мере части потока с повышенным содержанием  $\text{H}_2$  в процесс, расходующий  $\text{CO}$ .
10. Способ по п. 1, отличающийся тем, что процесс, расходующий  $\text{CO}$ , обеспечивает получение хвостового газа, содержащего  $\text{CO}_2$ .
11. Способ по п. 10, дополнительно включающий одно или более из:
  - a. подачи по меньшей мере части хвостового газа, содержащего  $\text{CO}_2$ , в первый модуль очистки или во второй модуль очистки для удаления по меньшей мере одного компонента из хвостового газа с получением второго газового потока очищенного  $\text{CO}_2$ ; и
  - b. подачи по меньшей мере части хвостового газа, содержащего  $\text{CO}_2$ , во второй модуль концентрирования  $\text{CO}_2$  с получением второго потока концентрированного  $\text{CO}_2$  и второго потока с пониженным содержанием  $\text{CO}_2$ .
12. Способ по п. 11, отличающийся тем, что по меньшей мере часть хвостового газа, содержащего  $\text{CO}_2$ , подают в модуль изменения давления с получением сжатого потока хвостового газа, и сжатый поток хвостового газа подают в первый модуль очистки и/или во второй модуль очистки.
13. Способ по п. 11, дополнительно включающий подачу по меньшей мере части второго потока концентрированного  $\text{CO}_2$  в первый модуль очистки или во второй



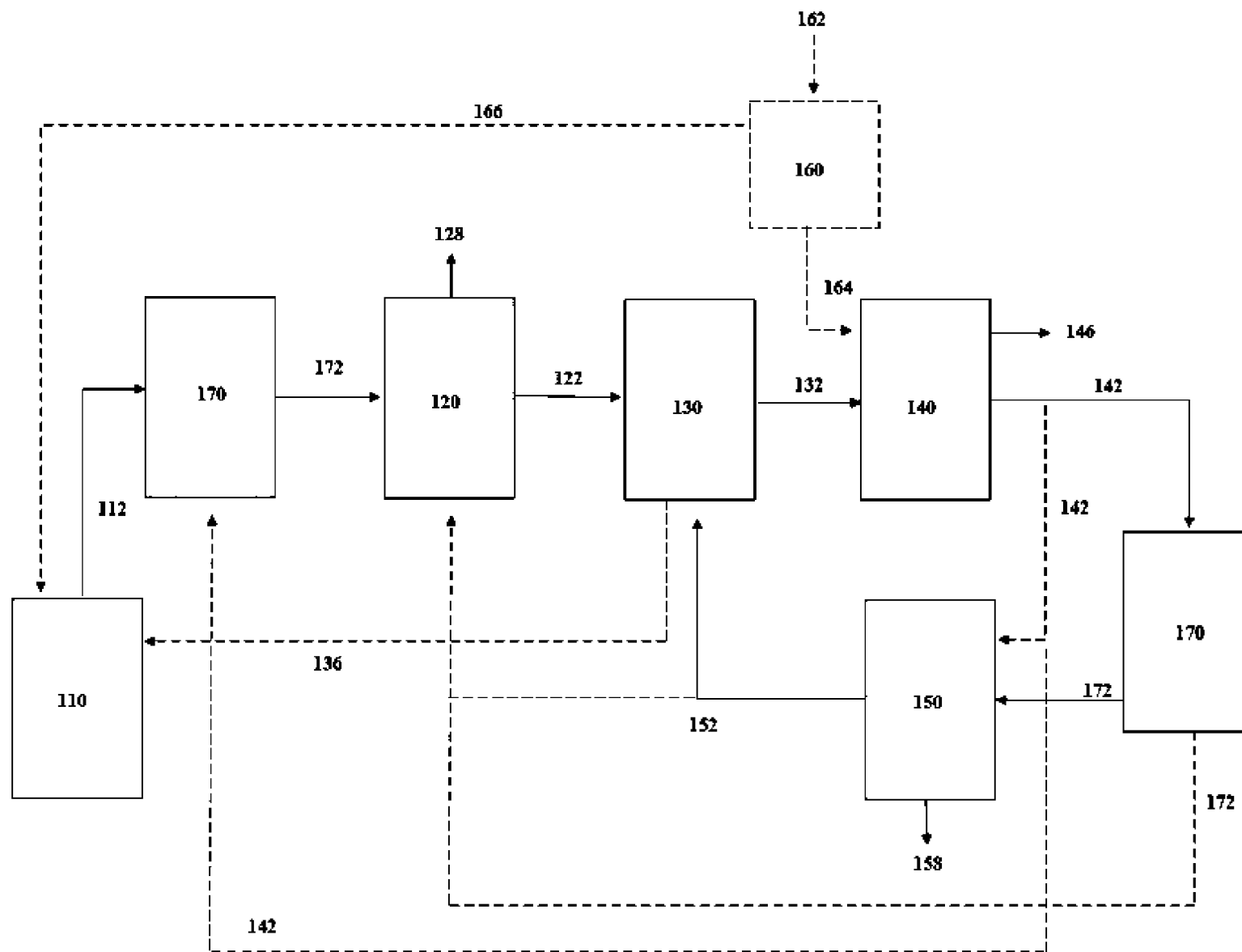
модуль очистки для удаления по меньшей мере одного компонента из хвостового газа с получением второго потока газа очищенного  $\text{CO}_2$ .

14. Способ по п. 13, дополнительно включающий подачу по меньшей мере части второго потока газа очищенного  $\text{CO}_2$  в модуль электролиза  $\text{CO}_2$ .
15. Способ по п. 1, отличающийся тем, что газообразный субстрат, содержащий  $\text{CO}_2$ , из промышленного процесса дополнительно содержит один или более из  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$ .
16. Способ по п. 1, отличающийся тем, что промышленный процесс выбран из группы, содержащей ферментацию углеводов, ферментацию газов, получение цемента, получение пульпы и бумаги, сталеварение, переработку нефти и сопутствующие процессы, получение нефтехимических продуктов, производство кокса, анаэробное или аэробное разложение, газификацию, добычу природного газа, добычу нефти, металлургические процессы, производство и/или очистку алюминия, меди и/или сплавов железа, геологические месторождения, процессы Фишера-Тропша, получение метанола, пиролиз, паровой риформинг метана, сухой риформинг метана, частичное окисление биогаза или природного газа и автотермический риформинг биогаза или природного газа.
17. Способ по п. 1, отличающийся тем, что первый модуль очистки выбран из группы, состоящей из модуля гидролиза, модуля удаления кислых газов, модуля дезоксигенации, модуля каталитического гидрирования, модуля удаления твердых частиц, модуля удаления хлоридов, модуля удаления дегтя и модуля доочистки циановодорода.
18. Способ по п. 1, отличающийся тем, что по меньшей мере один компонент, удаляемый из  $\text{CO}_2$ -содержащего газообразного субстрата, выбран из группы, состоящей из соединений серы, ароматических соединений, алкинов, алкенов, алканов, олефинов, соединений азота, кислорода, фосфорсодержащих соединений, мелких частиц, твердых веществ, кислорода, галогенированных соединений, кремнийсодержащих соединений, карбониллов, металлов, спиртов, сложных эфиров, кетонов, пероксидов, альдегидов, простых эфиров, дегтей и нафталина.

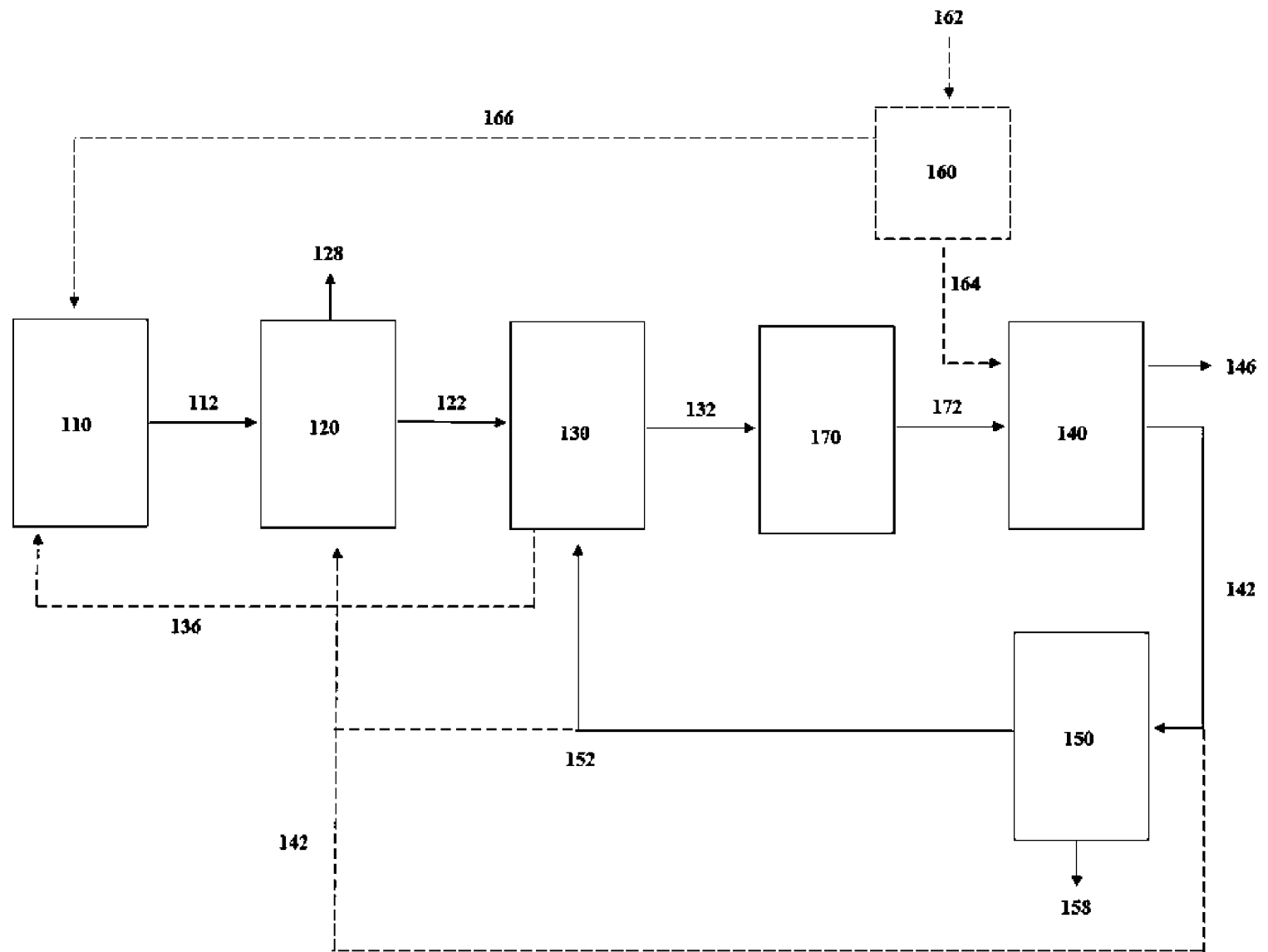
19. Способ по п. 1, отличающийся тем, что процесс, расходующий СО, представляет собой процесс ферментации, включающий выращивание по меньшей мере одного карбоксидотрофного микроорганизма.
20. Способ по п. 19, отличающийся тем, что процесс ферментации обеспечивает получение продукта ферментации, выбранного из группы, состоящей из этанола, бутирата, 2,3-бутандиола, лактата, бутена, бутадиена, метилэтилкетона, этилена, ацетона, изопропанола, липидов, 3-гидроксипропионата, терпенов, жирных кислот, 2-бутанола, 1,2-пропандиола и 1-пропанола.



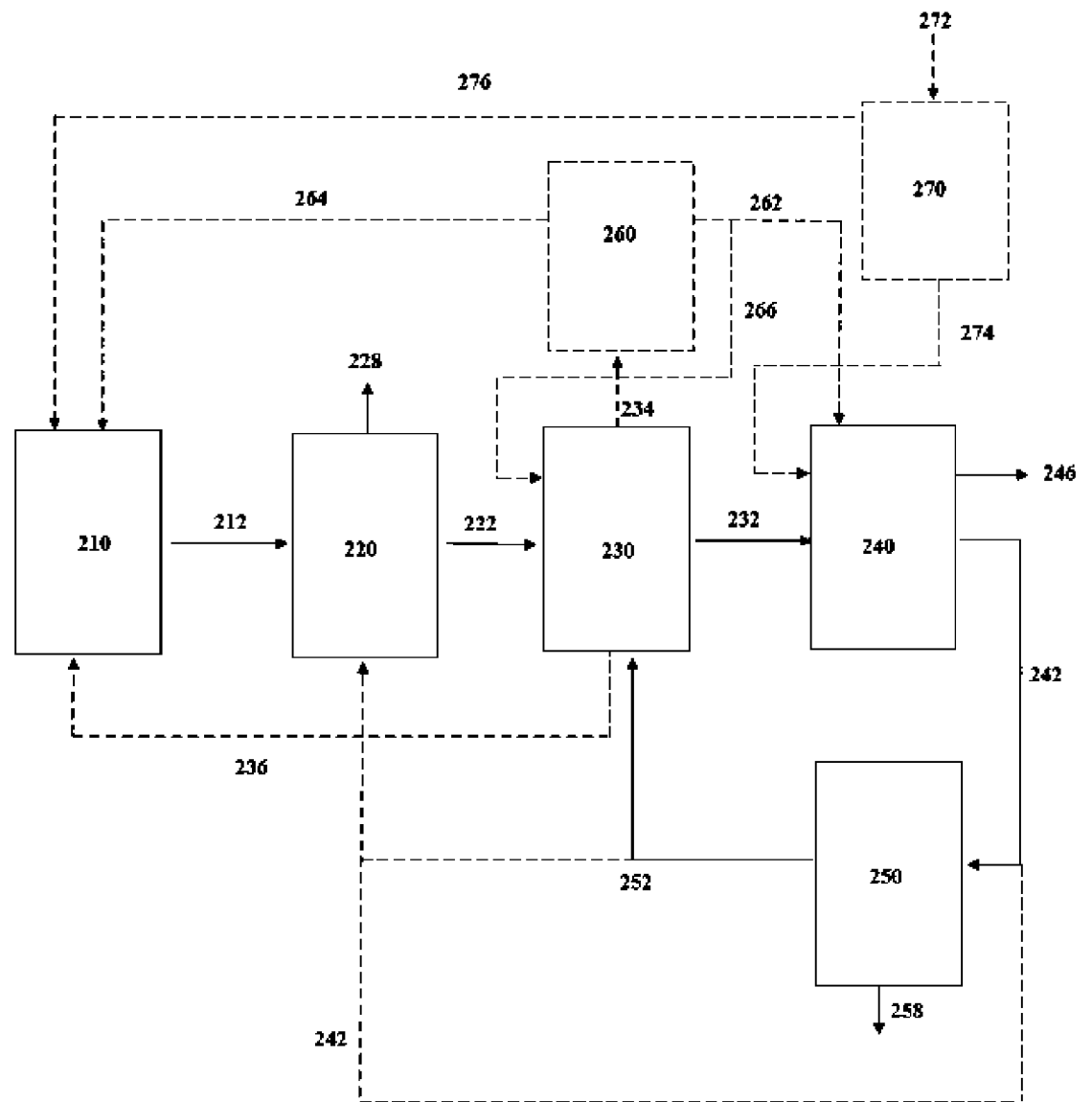
Фигура 1А



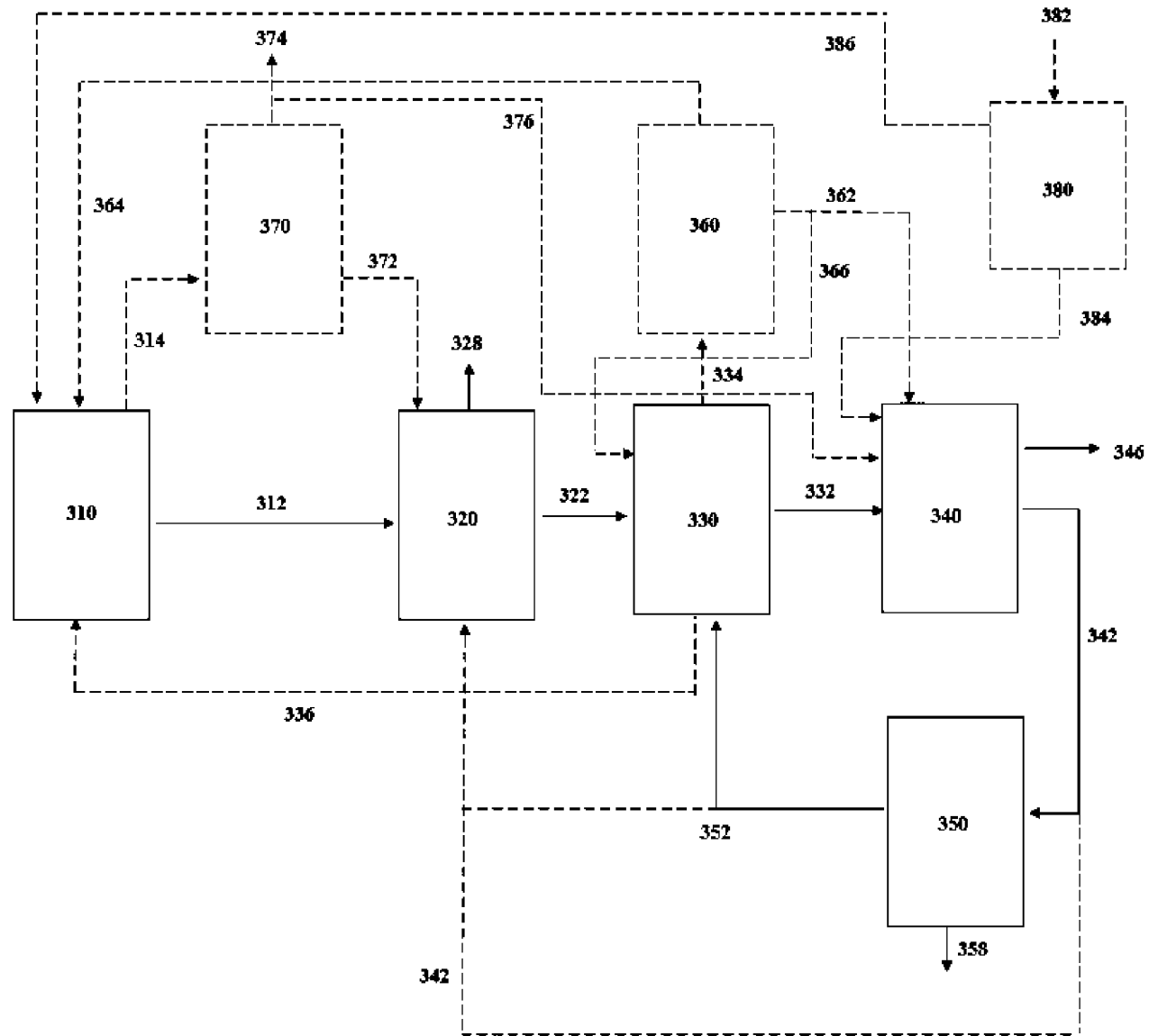
Фигура 1В



Фигура 1С

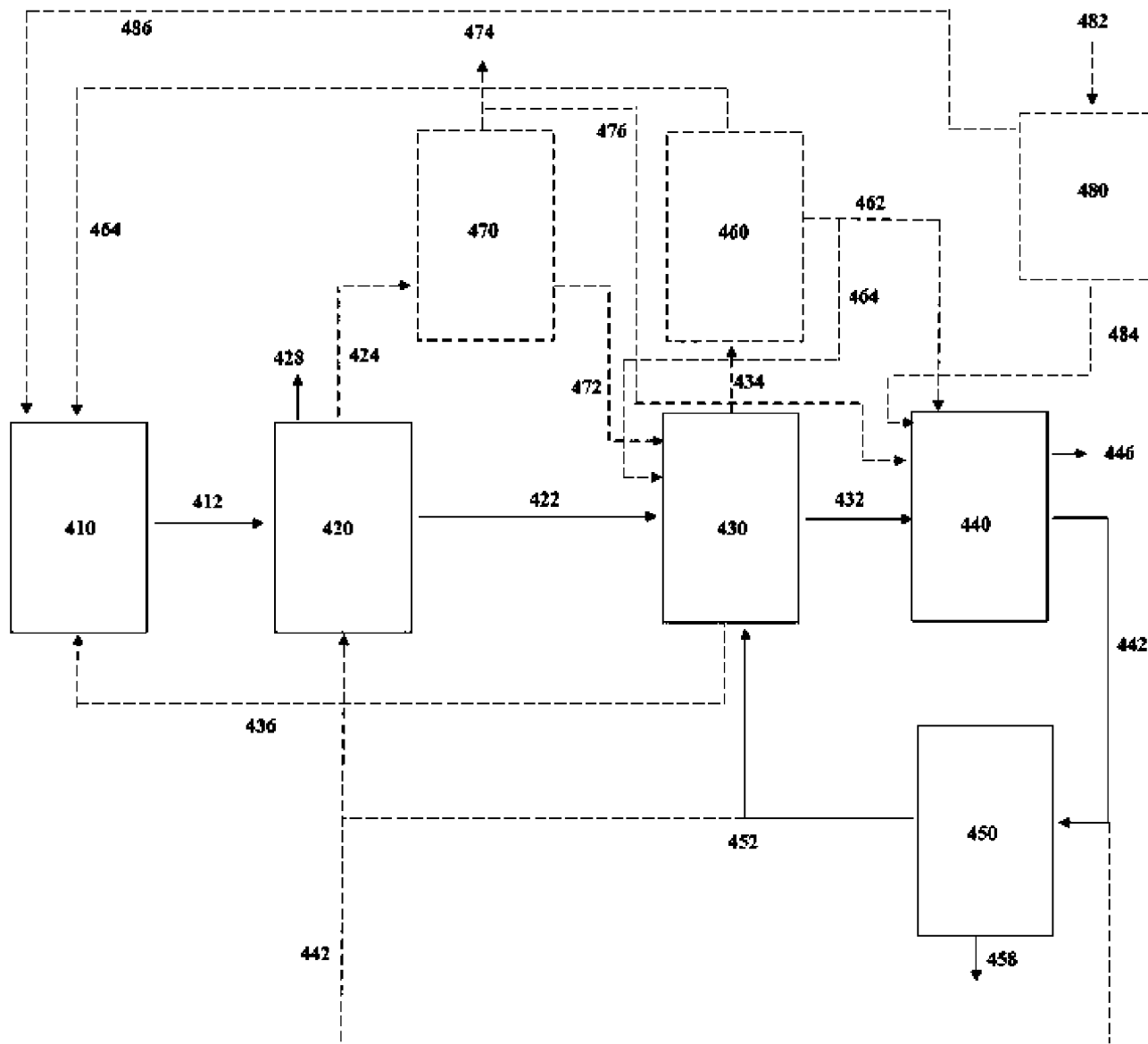


Фигура 2



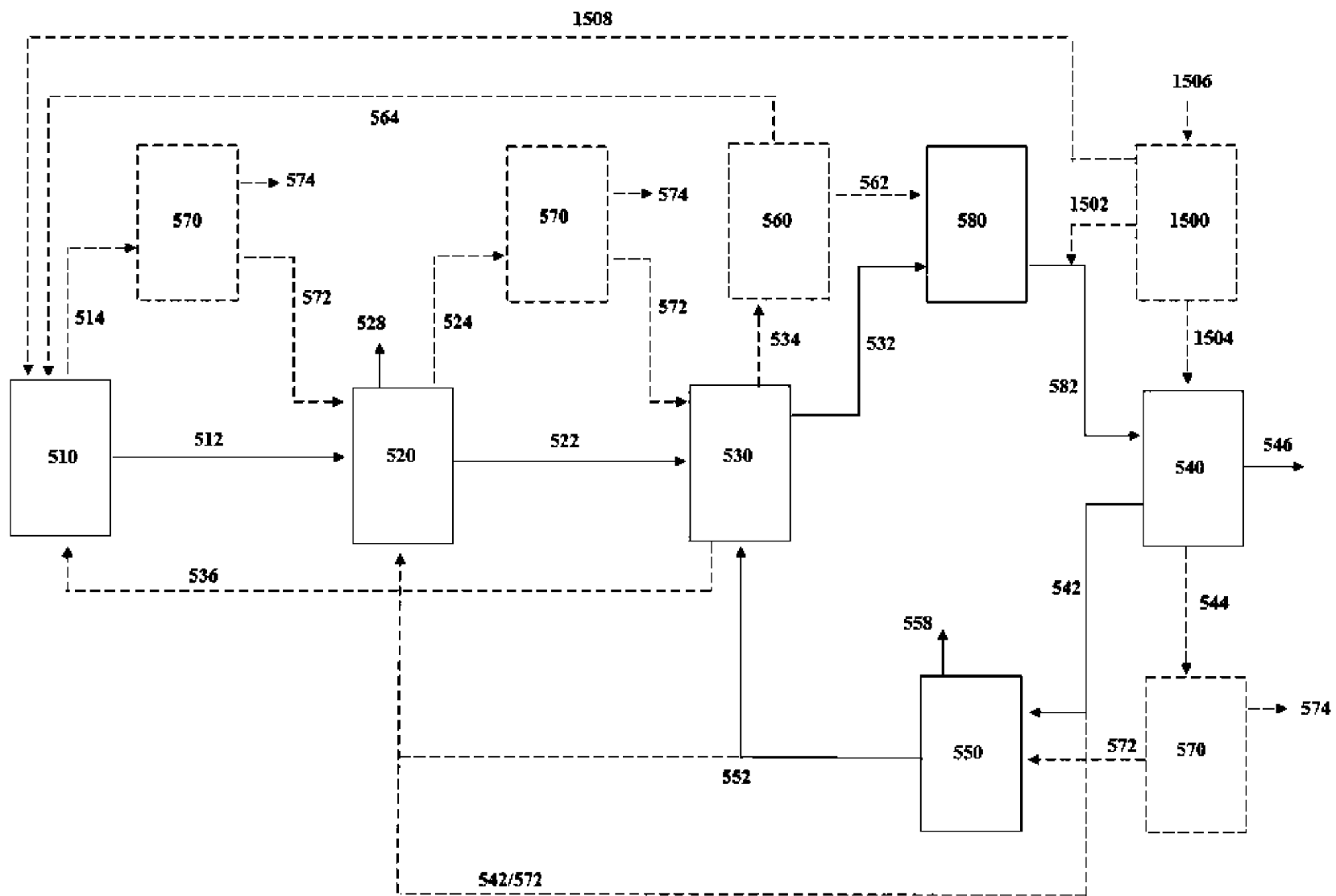
5

Фигура 3

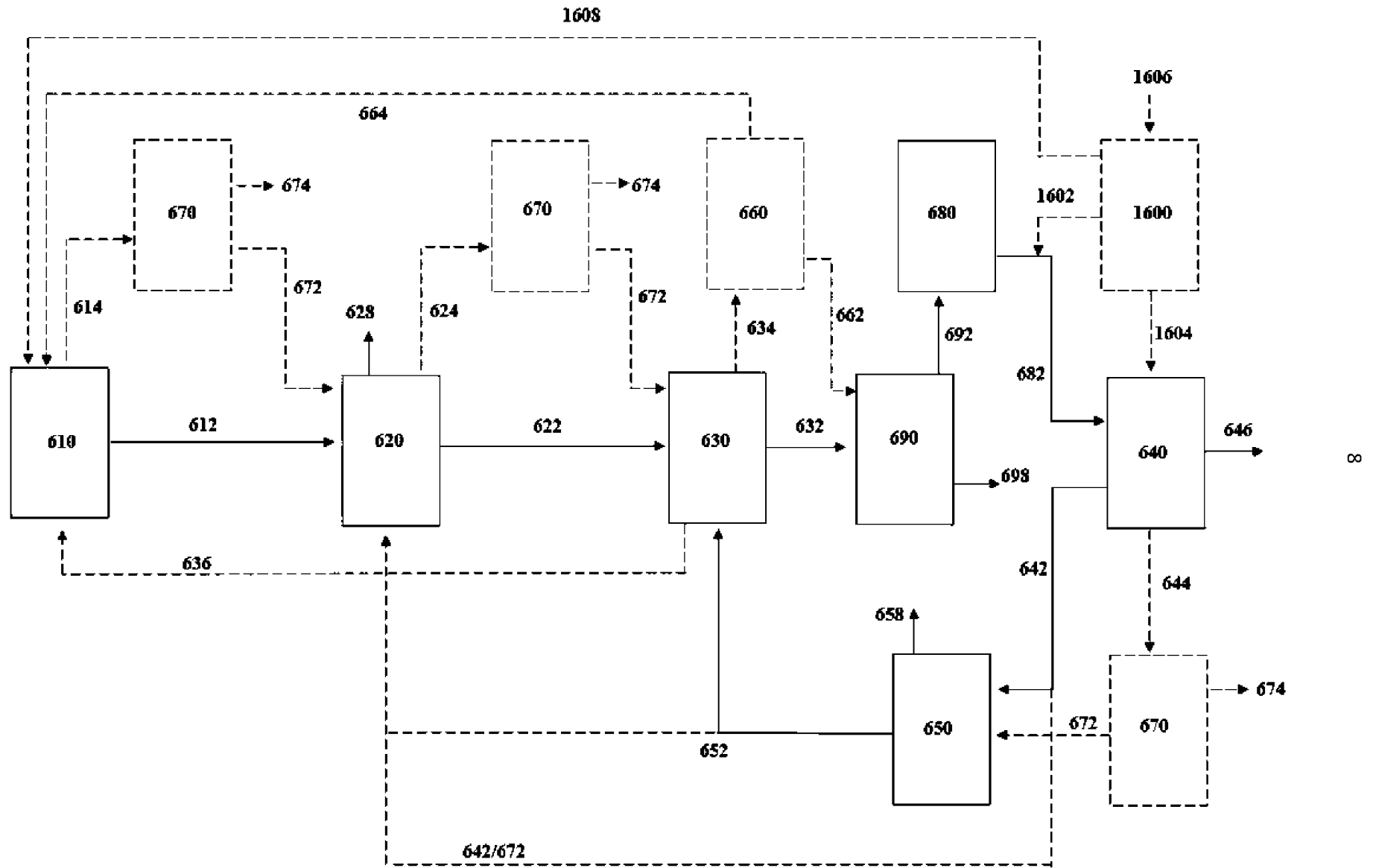


Фигура 4





Фигура 5



Фигура б