

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **046115**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2024.02.07**

(21) Номер заявки  
**202192655**

(22) Дата подачи заявки  
**2020.06.15**

(51) Int. Cl. **C12P 7/14** (2006.01)  
**C12P 7/16** (2006.01)  
**C12N 1/20** (2006.01)

---

(54) **СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗА**

---

(31) **62/872,869**

(32) **2019.07.11**

(33) **US**

(43) **2022.04.08**

(86) **PCT/US2020/037729**

(87) **WO 2021/006995 2021.01.14**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ЛАНЦАТЕК, ИНК. (US)**

(72) Изобретатель:  
**Гао Аллан Хейминг, Конрадо Роберт  
Джон, Бернасек Себастиан Михаль,  
Шульц Майкл Энтони (US)**

(74) Представитель:  
**Хмара М.В. (RU)**

(56) **US-A1-20120301934  
WO-A1-2019051069  
WO-A2-2012054798  
US-A1-20140370559  
WO-A2-2012058508**

(57) Изобретение обеспечивает оптимальное использование газа в процессе ферментации, при котором выделяют различные компоненты в газовом потоке для повышения эффективности микроорганизмов. Изобретение позволяет адаптировать состав газа, используемого в процессе ферментации, для усовершенствования производства различных продуктов. Изобретение позволяет применять такое управляемое разделение и использование газа для производства различных продуктов в двух параллельных процессах ферментации. Изобретение также позволяет применять такое управляемое разделение и использование газа для производства одного продукта в первом процессе ферментации, который может быть преобразован в другой продукт во втором процессе ферментации. Изобретение дополнительно способно смягчать ингибирование культуры.

**B1**

**046115**

**046115  
B1**

### **Перекрестная ссылка на родственную заявку**

Настоящая заявка испрашивает приоритет по предварительной заявке США № 62/872,869, поданной 11 июля 2019 г., содержание которой включено в настоящий документ посредством ссылки.

#### **Область техники**

Настоящее изобретение относится к способам оптимизации использования газа в процессе ферментации. В частности, настоящее изобретение относится к управляемому разделению и использованию различных компонентов в газовом потоке, чтобы максимизировать получение конкретных продуктов и общую эффективность улавливания углерода в указанном процессе.

#### **Уровень техники**

На долю углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) приходится около 76% глобальных выбросов парниковых газов, выделяющихся в результате деятельности человека, при этом остаток составляют метан (16%), оксид азота (6%) и фторированные газы (2%) (по данным Управления по охране окружающей среды США). Снижение выбросов парниковых газов, в частности,  $\text{CO}_2$ , является жизненно необходимым для предотвращения прогрессирования глобального потепления и сопутствующих изменений климата и погоды. Преобразование таких газовых выбросов в один или более видов топлива или химических веществ является одним из возможных решений для сокращения выбросов.

Давно известно, что каталитические процессы, такие как процесс Фишера-Тропша, можно использовать для преобразования газов, содержащих диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), монооксид углерода ( $\text{CO}$ ) и/или водород ( $\text{H}_2$ ), в разнообразные топлива и химические вещества. Однако в последнее время ферментация газов стала альтернативной платформой для биологического связывания таких газов. В частности, показано, что C1-фиксирующие микроорганизмы превращают газы, содержащие  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и/или  $\text{H}_2$ , в такие продукты, как этанол и 2,3-бутандиол.

Такие газы могут быть получены, например, из промышленных процессов, включая газ из ферментации углеводов, газ от производства цемента, целлюлозы и бумаги, производства стали, переработки нефти и связанных процессов, производства нефтехимических продуктов, производства кокса, анаэробного или аэробного сбраживания, синтез-газ (полученный из источников, включая, но не ограничиваясь ими, биомассу, потоки жидких отходов, потоки твердых отходов, муниципальные потоки, ископаемые ресурсы, включая природный газ, уголь и нефть), от добычи природного газа, добычи нефти, металлургических процессов для производства и/или очистки алюминия, меди и/или ферросплавов, геологических коллекторов и каталитических процессов (полученных из источников пара, включая, но не ограничиваясь ими, паровую конверсию метана, паровую конверсию нефти, газификацию нефтяного кокса, регенерацию катализатора - крекинг жидкого катализатора, регенерацию катализатора - риформинг нефти и сухой риформинг метана).

Ферментация газа обладает рядом преимуществ по сравнению с синтезом Фишера-Тропша. Во-первых, в синтезе Фишера-Тропша используются высокие температуры (150-350°C), повышенные давления (30 бар) и гетерогенные катализаторы, такие как кобальт, рутений и железо. Для сравнения, ферментация газа происходит при температуре 37°C и может проводиться при атмосферном давлении, что дает значительную экономию энергии и затрат по сравнению с синтезом Фишера-Тропша. Кроме того, синтез Фишера-Тропша требует относительно фиксированного соотношения  $\text{H}_2:\text{CO}$  в синтез-газе около 2:1, тогда как ферментация газа способна получать и использовать широкий диапазон субстратов с различными соотношениями  $\text{H}_2:\text{CO}$ .

В зависимости от источника газового потока и работы промышленного источника, расположенного выше по потоку, соотношение  $\text{H}_2:\text{CO}$  может сильно различаться. Хотя ферментация газа способна получать и использовать широкий спектр субстратов с изменяющимися соотношениями  $\text{H}_2:\text{CO}$ , некоторые композиции газа могут быть более идеальными, чем другие, для изготовления конкретных желаемых продуктов. Например, конкретные продукты могут быть оптимальным способом получены из газовых потоков с более низкими соотношениями  $\text{H}_2:\text{CO}$ .

Однако независимо от того, каким может быть желаемый продукт, одной из основных задач процесса ферментации газа является максимальное увеличение общего улавливания углерода, достигаемого этим процессом. В зависимости от соотношения  $\text{H}_2:\text{CO}$  в газовом потоке в процессе ферментации в качестве побочного продукта может вырабатываться  $\text{CO}_2$  в процессе образования продукта ферментации. Преобразование монооксида углерода в диоксид углерода можно рассматривать как снижение эффективности улавливания углерода, поскольку в идеальном случае монооксид углерода следует преобразовывать в топливо и/или химическое вещество одного или более видов вместо диоксида углерода.

Соответственно существует потребность в способе, который позволяет изменять состав газа таким образом, чтобы газ был оптимизирован для производства конкретных продуктов, при этом максимизируя общую эффективность процесса улавливания углерода.

#### **Краткое описание сущности изобретения**

Настоящее изобретение обеспечивает способ оптимизации использования газа в процессе ферментации. В частности, указанный способ позволяет изменять состав газа таким образом, чтобы газ был оптимизирован для производства конкретных продуктов в одном или более процессах ферментации, а также максимизировал общую эффективность процесса улавливания углерода. В конкретных вариантах ре-

ализации изобретения используют два процесса ферментации, параллельных друг другу. Предпочтительно, когда используют два процесса ферментации, поток газа разделяют на поток, обогащенный водородом, и поток, обедненный водородом, с использованием по меньшей мере одного модуля выделения. По меньшей мере часть обогащенного водородом потока ферментируют в первом процессе ферментации с использованием по меньшей мере первого реактора, содержащего жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более С1-фиксирующих микроорганизмов, для получения первого продукта ферментации. По меньшей мере часть обедненного водородом потока ферментируют во втором процессе ферментации с использованием по меньшей мере второго реактора, содержащего жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более С1-фиксирующих микроорганизмов, для получения второго продукта ферментации. В конкретных случаях первый продукт ферментации и второй продукт ферментации являются разными продуктами. Например, в одном варианте реализации первый продукт ферментации представляет собой этанол, а второй продукт ферментации представляет собой 2,3-бутандиол.

В некоторых случаях соотношение  $H_2:CO$  газа, обогащенного водородом, составляет 5:1 или больше чем 5:1. В различных вариантах реализации соотношение  $H_2:CO$  в обогащенном водородом газе составляет от 2:1 до 5:1. Например, соотношение  $H_2:CO$  в обогащенном водородом газе может находиться в диапазоне от 2:1 до 3:1, от 2,5:1 до 3,5:1, от 3:1 до 4:1, от 3,5:1 до 4,5:1, от 2:1 до 4:1, от 2,5:1 до 4,5:1 или от 2,5:1 до 5:1. Предпочтительно газ, обогащенный водородом, имеет более высокое соотношение  $H_2:CO$ , чем газ, обедненный водородом.

Предпочтительно в первом процессе ферментации используют обогащенный водородом газ для получения по меньшей мере одного продукта ферментации, выбранного из группы, состоящей из этанола, ацетата, моноэтиленгликоля (МЭГ), 1,2-пропандиола, ацетона, изопропанола, лактата, 1,3-бутандиола, 2-бутанола, 2-гидроксиизомасляной кислоты, 3-гидроксибутирата, метилэтилкетона (МЕК), терпенов, включая изопрен, адипиновую кислоту, 1-гексанол и 1-октанол.

В некоторых случаях соотношение  $H_2:CO$  газа, обедненного водородом, составляет 0,1:1 или меньше. В различных вариантах осуществления соотношение  $H_2:CO$  в обедненном водородом газе находится в диапазоне от 0,1:1 до 2:1. Например, соотношение  $H_2:CO$  в обедненном водородом газе может находиться в диапазоне от 0,05:1 до 1,5:1, от 0,05:1 до 2:1, от 0,2:1 до 1,5:1, от 0,2:1 до 2:1, от 0,5:1 до 1,5:1 или от 0,5:1 до 2:1. Предпочтительно обедненный водородом газ имеет более низкое соотношение  $H_2:CO$ , чем обогащенный водородом газ.

Предпочтительно второй процесс ферментации использует обедненный водородом газ для получения по меньшей мере одного продукта ферментации, выбранного из группы, состоящей из этанола, ацетата, моноэтиленгликоля (МЭГ), 1,2-пропандиол-3-гидроксипропионата, ацетона, изопропанола, лактата, 1,3-бутандиола, 2-бутанола, 2-гидроксиизомасляной кислоты, 3-гидроксибутирата, метилэтилкетона (МЕК), изоамилового спирта, терпенов, включая изопрен, адипиновую кислоту, 1-гексанол, 1-октанол и продукты на основе хоризматов. В некоторых случаях более выгодно производить конкретные продукты с потоком, обедненным водородом, а не с потоком, обогащенным водородом. Например, продукты, полученные из 3-гидроксипропионата, изоамилового спирта и/или хоризмата, предпочтительно получают с использованием обедненного водородом потока вместо обогащенного водородом потока.

В различных случаях, когда в настоящем изобретении используют два процесса ферментации, газ и жидкая питательная среда могут протекать параллельно как первому процессу ферментации, так и второму процессу ферментации.

В некоторых случаях модуль выделения водорода состоит по меньшей мере из одного процесса адсорбции при переменном давлении. В различных вариантах реализации модуль выделения водорода может включать в себя по меньшей мере один метод выделения, выбранный из группы, состоящей из адсорбции с переменным давлением, адсорбции с колебанием температуры, мембранного выделения или любого другого метода выделения газа, используемого для регулирования состава газа путем селективного удаления одного или более из  $CO$ ,  $H_2$  и/или  $CO_2$ . Предпочтительно указанный модуль выделения водорода способен выделять по меньшей мере семьдесят пять процентов (75%) водорода из газового потока для получения потока газа, обогащенного водородом, и потока газа, обедненного водородом. В некоторых случаях модуль выделения водорода выделяет по меньшей мере девяносто пять процентов (95%) водорода из газового потока для получения газового потока, обогащенного водородом, и газового потока, обедненного водородом. В различных случаях как поток газа, обогащенного водородом, так и поток газа, обедненного водородом, содержат некоторое количество монооксида углерода и/или диоксида углерода.

Предпочтительно указанный газовый поток поступает из одного или более промышленных источников, выбранных из группы, состоящей из ферментации углеводов, газовой ферментации, производства цемента, производства целлюлозы и бумаги, производства стали, нефтепереработки и связанных с ними процессов, производства нефтехимических продуктов, производства кокса, анаэробного или аэробного разложения, газификации, добычи природного газа, добычи нефти, металлургических процессов для производства и/или очистки алюминия, меди и/или ферросплавов, геологических месторождений и каталитических процессов. В некоторых случаях по меньшей мере часть газа получена из процесса конверсии метана. Такой процесс конверсии метана предпочтительно преобразует по меньшей мере часть ме-

тансодержащего газа в газовый поток, содержащий по меньшей мере часть монооксида углерода и водорода. В некоторых вариантах реализации метан получают из предприятий по производству ископаемого топлива, свалок и/или очистных сооружений.

В различных вариантах реализации по меньшей мере часть газового потока состоит из топочного газа доменной печи металлургического процесса.

Оптимизация газа также может включать смешивание одного или более дополнительных газов для получения подходящего соотношения  $H_2:CO$ . Например, этот дополнительный газ может быть получен из одного или более процессов электролиза (включая оба процесса электролиза для получения водорода из воды и/или электролиза для получения монооксида углерода из диоксида углерода), промышленного источника, процесса конверсии метана и/или отходящего газа из процесса ферментации. Однако в различных вариантах реализации настоящего изобретения не используется смешивание одного или более дополнительных газов, а вместо этого используется только выделение компонентов из газового потока с помощью модуля выделения водорода.

В некоторых случаях по меньшей мере часть отходящего газа, образующегося в первом процессе ферментации, рециркулируют в поток, обогащенный водородом.

В некоторых случаях по меньшей мере часть отходящего газа, образующегося во втором процессе ферментации, рециркулируют в обедненный водородом поток.

Для обеспечения идеального смешивания отходящего газа из процесса ферментации с газом из промышленного источника по меньшей мере часть отходящего газа может быть пропущена через по меньшей мере один модуль выделения водорода. В некоторых случаях по меньшей мере часть отходящего газа, образующегося в первом процессе ферментации, пропускают через процесс адсорбции при переменном давлении перед ее рециркулированием в поток, обогащенный водородом. В некоторых случаях по меньшей мере часть отходящего газа, образующегося во втором процессе ферментации, пропускают через процесс адсорбции при переменном давлении перед ее рециркулированием в поток, обедненный водородом.

Предпочтительно в процессах ферментации используют по меньшей мере один C1-фиксирующий микроорганизм. В некоторых случаях как в первом процессе ферментации, так и во втором процессе ферментации используются одни и те же виды C1-фиксирующих микроорганизмов. Еще в одних вариантах реализации в первом процессе ферментации используют иные виды микроорганизмов, чем во втором процессе ферментации. Предпочтительно указанный C1-фиксирующий микроорганизм (микроорганизмы), используемый в указанных процессах ферментации, выбран из группы, состоящей из *Moorella*, *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Acetobacterium*, *Eubacterium*, *Butyrivacterium*, *Oxobacter*, *Methanosarcina* и *Desulfotomaculum*. В некоторых случаях как в первом процессе ферментации, так и во втором процессе ферментации используется C1-фиксирующий микроорганизм из рода *Clostridium*. Таким микроорганизмом, используемым в первом и втором процессах ферментации, предпочтительно является *Clostridium autoethanogenum*.

В конкретных вариантах реализации настоящего изобретения используются два последовательных процесса ферментации. Предпочтительно, когда два процесса ферментации используются последовательно друг с другом, поток газа разделяют на поток, обогащенный водородом, и поток, обедненный водородом, с использованием по меньшей мере одного модуля выделения водорода. По меньшей мере часть обогащенного водородом потока ферментируется в первом процессе ферментации с использованием по меньшей мере одного реактора, содержащего жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более C1-фиксирующих микроорганизмов, для получения первого продукта ферментации. По меньшей мере часть обедненного водородом потока подвергается ферментации во втором процессе ферментации, содержащем культуру одного или более C1-фиксирующих микроорганизмов, для получения второго продукта ферментации. Когда два процесса ферментации происходят последовательно друг с другом, предпочтительно по меньшей мере часть первого продукта ферментации передается во второй процесс ферментации для получения второго продукта ферментации.

В некоторых случаях первым продуктом ферментации является уксусная кислота. Предпочтительно, когда процессы ферментации идут последовательно, по меньшей мере часть уксусной кислоты из первого процесса ферментации превращается в этанол во втором процессе ферментации.

В конкретных вариантах реализации настоящее изобретение охватывает один процесс ферментации, в котором рециркулируют по меньшей мере часть потока отходящего газа для оптимизации состава потока газа для получения продукта ферментации. Такой процесс ферментации предпочтительно ферментирует по меньшей мере часть газового потока из промышленного источника с использованием по меньшей мере одного реактора, содержащего жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более C1-фиксирующих микроорганизмов, для получения продукта ферментации и потока отходящего газа. По меньшей мере часть потока отходящего газа может быть рециркулирована в биореактор, что в некоторых случаях может снизить и/или смягчить потенциальное ингибирование указанной культуры.

В некоторых случаях по меньшей мере часть отходящего газа проходит через процесс адсорбции при переменном давлении перед ее рециркулированием в биореактор.

Использование процесса адсорбции при переменном давлении предпочтительно удаляет по мень-

шей мере один компонент, выбранный из группы, состоящей из диоксида углерода, неорганических углеводов, смол, органического азота и органической и неорганической серы, из потока отходящего газа для создания потока осветленного отходящего газа.

Предпочтительно процесс адсорбции при переменном давлении одновременно удаляет по меньшей мере часть по меньшей мере двух компонентов, выбранных из группы, состоящей из диоксида углерода, неорганических углеводов, смол, органического азота и органической и неорганической серы, из потока отходящего газа для создания потока осветленного отходящего газа.

В различных случаях общий газовый поток, направляемый в процесс ферментации, состоит из комбинации газового потока из промышленного источника и по меньшей мере части осветленного отходящего газа.

Осветленный отходящий газ предпочтительно содержит более высокие пропорции метана и азота по сравнению с составом газа из промышленного источника.

В некоторых вариантах реализации, в которых осветленный отходящий газ рециркулирует в процесс ферментации, рециркуляция осветленного отходящего газа в биореактор процесса ферментации увеличивает общий состав метана и азота в общем потоке газа по меньшей мере на пятнадцать процентов (15%). В некоторых случаях рециркуляция по меньшей мере части осветленного отходящего газа в биореактор увеличивает общий состав метана и азота в общем потоке газа по меньшей мере на пятьдесят процентов (50%). В некоторых случаях рециркуляция по меньшей мере части осветленного отходящего газа в биореактор увеличивает общий состав метана и азота в общем газовом потоке на величину в диапазоне от десяти до двадцати процентов (10-20%), от пятнадцати до тридцати процентов (15-30%), от двадцати пяти до тридцати пяти процентов (25-35%), от тридцати до сорока пяти процентов (30-45%) или от пятнадцати до пятидесяти процентов (15-50%). Предпочтительно рециркуляция по меньшей мере части осветленного отходящего газа в биореактор снижает и/или смягчает потенциальное ингибирование культуры.

В различных случаях в процессе ферментации используют по меньшей мере часть общего потока газа, для получения одного или более топлив или химических веществ. По меньшей мере один из продуктов, полученных в процессе ферментации, может быть выбран из группы, состоящей из этанола, ацетата, моноэтиленгликоля (МЭГ), 1,2-пропандиола, 1-пропанола, 3-гидроксипропионата, ацетона, изопропанола, лактата, 1,3-бутандиола, 2-бутанола, 2-гидроксиизомасляной кислоты, 3-гидроксипропионата, метилэтилкетона (МЕК), изоамилового спирта, терпенов, включая изопрен, адипиновую кислоту, 1-гексанол, 1-октанол и продукты на основе хоризмата.

Один или более процессов ферментации как часть производства одного или нескольких видов топлива или химических веществ производят микробную биомассу. По меньшей мере часть микробной биомассы, получаемой в одном или более процессах ферментации, может быть преобразована в белок одноклеточных (SCP; single cell protein).

Одно или более видов топлива или химических веществ в некоторых вариантах реализации могут быть отправлены в процессы вторичного преобразования. В различных случаях в процессе вторичного преобразования дополнительно преобразуют по меньшей мере часть одного или более видов топлива или химических веществ по меньшей мере в один компонент дизельного топлива, топлива для реактивных двигателей, бензина, пропилена, нейлона 6-6, резины и/или смол.

#### **Краткое описание чертежей**

На фиг. 1 показана технологическая схема интеграции процессов, изображающая параллельные процессы ферментации, производящие отдельные продукты из оптимизированных газовых потоков, в соответствии с одним аспектом изобретения.

На фиг. 2 показана технологическая схема интеграции процессов, изображающая протекание оптимизированных газовых потоков в последовательные процессы ферментации, в соответствии с одним аспектом изобретения.

На фиг. 3 показана технологическая схема интеграции процессов, изображающая использование рециркулированного отходящего газа из процесса ферментации в сочетании с резервуаром для хранения газа и парогенератором, генератором электроэнергии и/или процессом сушки сырья в соответствии с одним аспектом изобретения.

#### **Подробное описание изобретения**

Авторы изобретения установили, что путем управления составом газа, подаваемого в один или более процессов ферментации, можно повысить селективность в отношении требуемого продукта. Авторы изобретения обнаружили, что одним из механизмов управления составом является использование двух процессов ферментации рядом друг с другом.

Определения.

Если не указано иное, следующие термины, используемые в данном описании, имеют приведенные ниже значения.

Термины "ферментация", "ферментация газа" и т.п. следует интерпретировать как процесс, при котором вводят один или более субстратов, таких как синтез-газ, получаемый посредством газификации, и получают один или более продуктов путем использования одного или более C1-фиксирующих микроор-

ганизмов. Предпочтительно процесс ферментации включает использование одного или более биореакторов. Процесс ферментации можно описать либо как "периодический", либо как "непрерывный". "Периодическую ферментацию" используют для описания процесса ферментации, при котором биореактор заполняют сырьем, например источником углерода, вместе с микроорганизмами, причем продукты остаются в биореакторе до завершения ферментации. В "периодическом" процессе после завершения ферментации продукты извлекают, а биореактор очищают перед запуском следующей "порции". "Непрерывную ферментацию" используют для описания процесса ферментации, причем указанный процесс ферментации продлевается на более длительные периоды времени, а продукт и/или метаболит извлекают во время ферментации. Предпочтительно процесс ферментации является непрерывным.

Если из контекста не следует иное, выражения "ферментация", "процесс ферментации" или "реакция ферментации" и т.п. в данном документе включают как фазу выращивания, так и фазу биосинтеза газообразного субстрата.

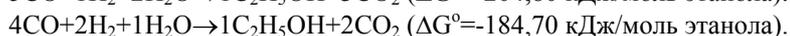
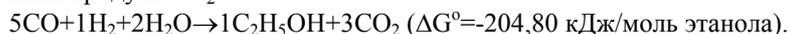
В некоторых вариантах реализации изобретения ферментацию проводят при отсутствии углеводных субстратов, таких как сахар, крахмал, лигнин, целлюлоза или гемицеллюлоза.

Термины "повышение эффективности", "повышенная эффективность" и т.п., когда они используются в отношении процесса ферментации, включают помимо прочего увеличение одной или более скоростей роста микроорганизмов, катализирующих ферментацию, роста и/или скорости получения продукта при повышенных концентрациях продукта, увеличение объема требуемого продукта, полученного на объем потребляемого субстрата, увеличение скорости получения или уровня получения требуемого продукта, увеличение относительного содержания требуемого полученного продукта по сравнению с другими побочными продуктами ферментации, снижение количества воды, потребляемой в процессе, и снижение количества энергии, используемой в процессе.

В конкретных вариантах реализации наличие водорода приводит к повышению общей эффективности получения этанола в процессе ферментации.

Осуществление процесса ферментации в присутствии водорода имеет дополнительное преимущество, заключающееся в уменьшении количества  $\text{CO}_2$ , получаемого в процессе ферментации. Например, газообразный субстрат, содержащий минимальное количество  $\text{H}_2$ , обычно превращается в этанол и  $\text{CO}_2$  со следующей стехиометрией:  $[\text{6CO} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 4\text{CO}_2]$ . По мере увеличения количества водорода, используемого C1-фиксирующими бактериями, количество получаемого  $\text{CO}_2$  уменьшается [например,  $2\text{CO} + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ ].

При стехиометрическом соотношении 2:1 ( $\text{H}_2$ :CO), образование  $\text{CO}_2$  полностью исключено. Как показано ниже, при различных стехиометрических соотношениях  $\text{H}_2$ :CO различные количества углерода не используются надлежащим образом и вместо того, чтобы превращаться в этанол, они превращаются в побочный продукт  $\text{CO}_2$ .



Термин "поток" относится к любому субстрату, который можно направлять, например, из одного процесса в другой, из одного модуля в другой и/или из одного процесса в устройство улавливания углерода.

Термин "поток, обогащенный водородом" означает газовый поток, в котором относительное содержание водорода выше, чем в "потоке, обедненном водородом". В различных случаях поток, обогащенный водородом, имеет стехиометрическое соотношение  $\text{H}_2$ :CO, составляющее по меньшей мере 2:1, в то время как поток, обедненный водородом, имеет стехиометрическое соотношение  $\text{H}_2$ :CO меньше 2:1.

Термины "осветленный газ", "осветленный поток" и т.п. относятся к потоку газа, который был пропущен через по меньшей мере один модуль выделения водорода.

"Модуль выделения водорода" использует по меньшей мере один метод выделения, выбранный из группы, состоящей из адсорбции с переменным давлением, адсорбции с колебанием температуры, мембранного выделения или любого другого метода выделения газа, используемого для регулирования состава газа путем селективного удаления одного или более из CO,  $\text{H}_2$  и/или  $\text{CO}_2$ . Предпочтительно модуль выделения водорода включает в себя по меньшей мере один процесс адсорбции при переменном давлении. В различных случаях модуль выделения водорода используется для одновременного удаления по меньшей мере двух компонентов, выбранных из группы, состоящей из диоксида углерода, неорганических углеводородов, смол, органического азота и органической и неорганической серы.

Используемый в данном документе термин "улавливание углерода" относится к удалению соединений углерода, включая  $\text{CO}_2$  и/или CO, из потока, содержащего  $\text{CO}_2$  и/или CO, и либо

превращению  $\text{CO}_2$  и/или CO в продукты; либо

превращению  $\text{CO}_2$  и/или CO в вещество, пригодное для долгосрочного хранения; или

улавливание  $\text{CO}_2$  и/или CO в веществах, подходящих для долгосрочного хранения; либо

комбинации этих процессов.

Термин "биореактор", "реактор" и т.п. включает в себя устройство, которое можно использовать в

процессе ферментации. Биореактор может состоять из одного или более резервуаров и/или конструкций башенного типа или трубопроводов и включает в себя реактор непрерывного действия с перемешиванием (CSTR), реактор с иммобилизованными клетками (ICR), реактор с орошаемым слоем (TBR), барботажную колонну, газлифтный ферментер, статический смеситель, циркуляционный петлевой реактор, мембранный реактор, такой как мембранный биореактор с полыми волокнами (HFM BR), или другой аппарат или другое устройство, подходящее для контакта газа с жидкостью. Биореактор предпочтительно приспособлен для получения газообразного субстрата, содержащего CO или CO<sub>2</sub>, или H<sub>2</sub>, или их смеси. Процесс ферментации может содержать множество реакторов (ступеней), соединенных параллельно либо последовательно. Например, процесс ферментации 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.

Термин "ферментационный бульон" или "бульон" охватывает смесь компонентов, включая питательную среду и культуру, или один или более микроорганизмов. Предпочтительно в процессе ферментации используют ферментационный бульон для ферментации потока газ с образованием одного или более продуктов.

Культуру, как правило, поддерживают в водной культуральной среде, содержащей питательные вещества, витамины и/или минералы в достаточном количестве для роста микроорганизмов. Водная питательная среда предпочтительно представляет собой среду для анаэробного микробного роста, такую как минимальная среда для анаэробного микробного роста.

Термин "питательные среды" или "питательная среда" используют для описания среды бактериального роста. Предпочтительно в процессе ферментации используют питательную среду внутри биореактора. Как правило, этот термин относится к среде, содержащей питательные вещества и другие компоненты, подходящие для роста микробной культуры. Термин "питательное вещество" включает в себя любое вещество, которое может быть использовано в метаболическом пути микроорганизма. Примеры питательных веществ включают калий, витамины группы B, металлические микроэлементы и аминокислоты.

Используемый в данном документе термин "кислота" включает в себя как карбоновые кислоты, так и связанный с ними карбоксилат-анион, такой как смесь свободной уксусной кислоты и ацетата, присутствующая в ферментационном бульоне, как описано в данном документе. Соотношение молекулярной кислоты и карбоксилата в ферментационном бульоне зависит от pH системы. Кроме того, термин "ацетат" включает в себя как соль уксусной кислоты, так и смесь молекулярной или свободной уксусной кислоты и соли уксусной кислоты, такую как смесь соли уксусной кислоты и свободной уксусной кислоты, присутствующую в ферментационном бульоне, как описано в настоящем документе.

Термин требуемый состав" используется для обозначения желаемого уровня и типов компонентов в веществе, таком как, например, газовый поток. В частности, считается, что газ имеет "требуемый состав", если он содержит конкретный компонент (например, CO, H<sub>2</sub> и/или CO<sub>2</sub>) и/или содержит конкретный компонент в конкретной пропорции, и/или не содержит конкретный компонент (например, компонент, вредный для микроорганизмов), и/или не содержит конкретный компонент в конкретной пропорции. Можно учитывать более одного компонента при определении того, имеет ли газовый поток требуемый состав.

"Микроорганизм" представляет собой микроскопический организм, в частности, бактерию, архею, вирус или грибок. Микроорганизм согласно настоящему изобретению обычно представляет собой бактерию. Подразумевается, что используемый в данном документе термин "микроорганизм" включает в себя "бактерию". Следует отметить, что термин "микроорганизм" и термин "бактерии" используются взаимозаменяемо по всему документу.

"Родительский микроорганизм" представляет собой микроорганизм, используемый для получения микроорганизма по данному изобретению. Родительский микроорганизм может представлять собой встречающийся в природе микроорганизм (например, микроорганизм дикого типа) или микроорганизм, который был предварительно модифицирован (например, мутантный или рекомбинантный микроорганизм). Микроорганизм согласно настоящему изобретению может быть модифицирован для экспрессии или сверхэкспрессии одного или более ферментов, которые не были экспрессированы или сверхэкспрессированы в родительском микроорганизме. Подобным образом микроорганизм согласно настоящему изобретению может быть модифицирован, чтобы содержать один или более генов, которые не содержались в родительском микроорганизме. Микроорганизм согласно настоящему изобретению также может быть модифицирован, чтобы не экспрессировать или экспрессировать более низкие количества одного или более ферментов, которые были экспрессированы в родительском микроорганизме. В одном варианте реализации изобретения родительский микроорганизм представляет собой *Clostridium autoethanogenum*, *Clostridium ljungdahlii* или *Clostridium ragsdalei*. В предпочтительном варианте реализации изобретения родительский микроорганизм представляет собой *Clostridium autoethanogenum* LZ1561, который был депонирован 7 июня 2010 г. в Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH (Немецкой коллекции микроорганизмов и клеточных культур (DSMZ)), расположенной по адресу Inhof-

fenstra β 7B, D-38124 Braunschweig, Германия, в соответствии с условиями Будапештского договора и присвоенным регистрационным номером DSM23693. Этот штамм описан в международной заявке на патент № PCT/NZ2011/000144, опубликованной как WO 2012/015317.

Термин "происходит из" означает, что нуклеиновая кислота, белок или микроорганизм модифицированы или адаптированы из другой (например, исходной или дикого типа) нуклеиновой кислоты, белка или микроорганизма с целью получения новой нуклеиновой кислоты, белка или микроорганизма. Такие модификации или адаптации обычно включают в себя вставку, делецию, мутацию или замену нуклеиновых кислот или генов. Как правило, микроорганизм согласно данному изобретению происходит от родительского микроорганизма. В одном варианте реализации изобретения микроорганизм согласно настоящему изобретению происходит от *Clostridium autoethanogenum*, *Clostridium ljungdahlii* или *Clostridium ragsdalei*. В предпочтительном варианте реализации изобретения микроорганизм согласно настоящему изобретению происходит от *Clostridium autoethanogenum* LZ1561, который депонирован под регистрационным номером DSMZ DSM23693.

Термин "путь Вуда-Льонгдала" относится к пути фиксации углерода Вуда-Льонгдала, описанному, например, в Ragsdale, *Biochim Biophys Acta*, 1784:1873-1898, 2008. "Микроорганизмы Вуда-Льонгдала", как и ожидалось, относятся к микроорганизмам, содержащим путь Вуда-Льонгдала. Как правило, микроорганизм согласно настоящему изобретению содержит нативный путь Вуда-Льонгдала. В данном документе путь Вуда-Льонгдала может быть нативным, немодифицированным путем Вуда-Льонгдала, или может быть путем Вуда-Льонгдала с некоторой степенью генетической модификации (например, сверхэкспрессией, гетерологичной экспрессией, нокаутом и т.д.), пока его используют для преобразования CO, CO<sub>2</sub> и/или H<sub>2</sub> в ацетил-КоА.

"C1" относится к молекуле, содержащей один атом углерода, например, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> или CH<sub>3</sub>OH. "C1-оксигенат" относится к одноуглеродной молекуле, 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 одноуглеродной молекуле, которая служит частичным или единственным источником углерода для микроорганизма согласно настоящему изобретению. Так, например, источник C1-углерода может содержать одно или более соединений, выбранных из CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH или CH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Источник C1-углерода предпочтительно содержит одно или оба соединения CO и CO<sub>2</sub>. "C1-фиксирующий микроорганизм" представляет собой микроорганизм, способный продуцировать одно или более продуктов из источника C1-углерода. Как правило, микроорганизм согласно настоящему изобретению представляет собой C1-фиксирующую бактерию.

"Анаэроб" представляет собой микроорганизм, не требующий кислорода для роста. Анаэроб может реагировать отрицательно или даже погибнуть в присутствии кислорода выше определенного порогового значения. Однако некоторые анаэробы способны переносить низкие уровни кислорода (например, 0,000001-5% кислорода). Как правило, микроорганизм согласно настоящему изобретению представляет собой анаэроб.

"Ацетогены" представляют собой облигатно-анаэробные бактерии, использующие путь Вуда-Льонгдала в качестве их основного механизма для сохранения энергии и синтеза ацетил-КоА и продуктов, полученных из ацетил-КоА, таких как ацетат (Ragsdale, *Biochim Biophys Acta*, 1784:1873-1898, 2008). В частности, ацетогены используют путь Вуда-Льонгдала в качестве

- (1) механизма восстановительного синтеза ацетил-КоА из CO<sub>2</sub>;
- (2) терминального процесса акцептирования электронов, сохранения энергии;
- (3) механизма связывания (ассимиляции) CO<sub>2</sub> в синтезе клеточного углерода (Drake, *Acetogenic Prokaryotes*, In: *The Prokaryotes*, 3rd edition, p. 354, New York, NY, 2006).

Все ацетогены природного происхождения являются C1-связывающими, анаэробными, автотрофными и неметанотрофными. Как правило, микроорганизм согласно настоящему изобретению представляет собой ацетоген.

"Этанологен" представляет собой микроорганизм, который продуцирует или способен продуцировать этанол. Как правило, микроорганизм согласно настоящему изобретению представляет собой этанологен.

"Автотроф" представляет собой микроорганизм, способный расти в отсутствие органического углерода. Вместо этого автотрофы используют неорганические источники углерода, такие как CO и/или CO<sub>2</sub>. Как правило, микроорганизм согласно настоящему изобретению представляет собой автотроф.

"Карбоксидотроф" представляет собой микроорганизм, способный использовать CO 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 изобретения микроорганизм согласно данному изобретению представляет собой метанотроф или происходит от метанотрофа. Еще в одних вариантах реализации изобретения микроорганизм согласно настоящему изобретению не представляет собой метанотроф или не происходит от метанотрофа.

Термин "субстрат" относится к источнику углерода и/или энергии для микроорганизма согласно

настоящему изобретению. Как правило, субстрат является газообразным и содержит C1-источник углерода, например CO, CO<sub>2</sub> и/или CH<sub>4</sub>. Субстрат предпочтительно содержит источник C1-углерода в виде CO или CO+CO<sub>2</sub>. Субстрат может дополнительно содержать другие неуглеродные компоненты, такие как H<sub>2</sub> или N<sub>2</sub>.

Состав субстрата может оказывать значительное влияние на эффективность и/или стоимость реакции. Так, например, присутствие кислорода (O<sub>2</sub>) может понизить эффективность процесса анаэробной ферментации. В зависимости от состава субстрата может быть желательной обработка, очистка или фильтрация субстрата для удаления нежелательных примесей, например, токсинов, нежелательных компонентов или частиц пыли, и/или для увеличения концентрации желаемых компонентов.

Микроорганизм согласно настоящему изобретению можно культивировать для получения одного или более продуктов. Например, микроорганизм согласно настоящему изобретению может продуцировать или может быть генетически сконструирован для продуцирования этанола (WO 2007/117157), ацетата (WO 2007/117157), 1-бутанола (WO 2008/115080, WO 2012/053905 и WO 2017/0066498), бутирата (WO 2008/115080), 2,3-бутандиола (WO 2009/151342 и WO 2016/094334), лактата (WO 2011/112103), бутена (WO 2012/024522), бутадиина (WO 2012/024522), метилэтилкетона (МЕК) (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 и WO 2017/0066498), 1-гексанола (WO 2017/0066498), 1-октанола (WO 2017/0066498), продуктов, полученных из хоризмата (WO 2016/191625), 3-гидоксибутирата (WO 2017/066498), 1,3-бутандиола (WO 2017/0066498), 2-гидроксиизобутирата или 2-гидроксиизомасляной кислоты (WO 2017/0066498), изобутилена (WO 2017/0066498), адипиновой кислоты (WO 2017/0066498), 1,3-гександиола (WO 2017/0066498), 3-метил-2-бутанола (WO 2017/0066498), 2-бутен-1-ола (WO 2017/0066498), изовалерата (WO 2017/0066498), изоамилового спирта (WO 2017/0066498) и моноэтиленгликоля (WO 2019/126400). В конкретных вариантах реализации изобретения саму микробную биомассу можно рассматривать как продукт. Один или более продуктов могут быть дополнительно преобразованы для производства по меньшей мере одного компонента дизельного топлива, реактивного топлива и/или бензина. Кроме того, микробная биомасса может быть подвергнута дальнейшей переработке для получения по меньшей мере части белка одноклеточных (SCP).

Термин "белок одноклеточных" (SCP) относится к микробной биомассе, которая может быть использована в богатых белками пищевых продуктах для людей и/или животных, часто заменяя традиционные источники белковых добавок, такие как соевая мука или рыбная мука. Для получения белка одноклеточных или другого продукта способ может включать дополнительные этапы выделения, переработки или обработки. Так, например, способ может включать стерилизацию микробной биомассы, центрифугирование микробной биомассы и/или сушку микробной биомассы. В некоторых вариантах реализации изобретения микробную биомассу сушат с использованием распылительной сушки или лопастной сушки. Способ также может включать уменьшение содержания нуклеиновой кислоты в микробной биомассе с использованием любого способа, известного в данной области техники, поскольку потребление рациона с высоким содержанием нуклеиновой кислоты может привести к накоплению продуктов распада нуклеиновой кислоты и/или желудочно-кишечному расстройству. Белок одноклеточных может быть подходящим для кормления животных, таких как домашний скот или домашние животные. В частности, корм для животных может быть подходящим для кормления одного или более мясных животных, молочного скота, свиней, овец, коз, лошадей, мулов, ослов, оленей, буйволов/бизонов, лам, альпак, северных оленей, верблюдов, бантенгов, гаялов, яки, курей, индюков, уток, гусей, перепелов, цесарок, сквопов/голубей, рыбы, креветок, ракообразных, котов, собак и грызунов. Композиция корма для животных может быть адаптирована к потребностям в питании различных животных. Кроме того, способ может включать смешивание или комбинирование микробной биомассы с одним или более наполнителями.

Термин "наполнитель" может относиться к любому веществу, которое может быть добавлено в микробную биомассу для улучшения или изменения формы, свойств или питательной ценности корма для животных. Так, например, наполнитель может содержать один или более углеводов, клетчатки, жиров, белков, витаминов, минералов, воды, вкусовых добавок, подсластителей, антиоксидантов, ферментов, консервантов, пробиотиков или антибиотиков. В некоторых вариантах реализации изобретения наполнителем может быть сено, солома, силос, злаки, масла или жиры или другой растительный материал. Наполнителем может быть любой кормовой ингредиент, указанный в Chiba, Section 18: Diet Formulation and Common Feed Ingredients, Animal Nutrition Handbook, 3rd revision, p. 575-633, 2014.

Термин "селективность" относится к отношению продуцирования целевого продукта к продуцированию всех продуктов ферментации, продуцируемых микроорганизмом. Микроорганизм по изобретению может быть сконструирован для продуцирования продуктов с конкретной селективностью или с минимальной селективностью. В одном варианте реализации настоящего изобретения целевой продукт составляет по меньшей мере 5, 10, 15, 20, 30, 50, 75 или 85% всех продуктов ферментации, произведенных микроорганизмом по изобретению. В одном варианте реализации настоящего изобретения целевой продукт составляет по меньшей мере 10% от всех продуктов ферментации, продуцируемых указанным мик-

роорганизмом согласно настоящему изобретению, таким образом, микроорганизм согласно настоящему изобретению обладает селективностью по отношению к целевому продукту, составляющей по меньшей мере 10%. В еще одном варианте реализации изобретения целевой продукт составляет по меньшей мере 30% от всех продуктов ферментации, продуцируемых указанным микроорганизмом согласно настоящему изобретению, так что указанный микроорганизм согласно настоящему изобретению обладает по меньшей мере 30% селективностью по отношению к целевому продукту.

Для получения целевого продукта культивирование/ферментацию желателно проводить в подходящих условиях. Как правило, культивирование/ферментация проводятся в анаэробных условиях. Условия реакции, которые следует учитывать, включают в себя давление (или парциальное давление), температуру, скорость потока газа, скорость потока жидкости, pH среды, окислительно-восстановительный потенциал среды, скорость перемешивания (при использовании реактора непрерывного действия с перемешиванием), уровень посевного материала, максимальные концентрации газового субстрата, чтобы гарантировать, что газ в жидкой фазе не станет ограничивающим фактором, а также максимальные концентрации продукта во избежание ингибирования продукта. В частности, скорость введения субстрата может быть управляемой, чтобы гарантировать, что концентрация газа в жидкой фазе не станет ограничивающим фактором, поскольку продукты могут потребляться культурой в условиях ограниченного количества газа.

Работа биореактора при повышенном давлении позволяет увеличить скорость массопереноса газа из газовой фазы в жидкую. Соответственно в общем случае предпочтительно осуществлять культивирование/ферментацию при давлениях выше атмосферного давления. Кроме того, поскольку заданная скорость преобразования газа частично зависит от времени пребывания субстрата в реакторе, при этом время пребывания в реакторе определяет требуемый объем биореактора, применение систем под давлением может значительно уменьшить требуемый объем биореактора и, следовательно, капитальные затраты на оборудование для ферментации. Это, в свою очередь, означает, что время удерживания, определяемое как объем жидкости в биореакторе, деленный на расход входящего газа, может быть уменьшено, если в биореакторах поддерживается повышенное, а не атмосферное давление. Оптимальные условия реакции будут частично зависеть от конкретного используемого микроорганизма. Однако в общем случае предпочтительно проводить ферментацию при давлении выше атмосферного давления. Кроме того, поскольку заданная скорость преобразования газа частично зависит от времени удерживания субстрата, а достижение желаемого времени удерживания, в свою очередь, диктует необходимый объем биореактора, использование систем под давлением может значительно уменьшить требуемый объем биореактора и, следовательно, капитальные затраты на оборудование для культивирования/ферментации.

Ферментационный бульон, содержащий желаемый продукт, можно непрерывно удалять из биореактора для осуществления извлечения продукта. Целевые продукты можно отделять или очищать от ферментационного бульона посредством любого подходящего процесса удаления, в котором можно использовать способ или сочетание способов, известных в данной области техники, включая, например, фракционную перегонку, вакуумную перегонку, выпаривание, испарение через полупроницаемую мембрану, отдувку газом, разделение фаз и экстракционную ферментацию, включая, например, жидкостно-жидкостную экстракцию. В некоторых вариантах реализации целевые продукты выделяют из ферментационного бульона путем непрерывного удаления из биореактора части бульона, отделения микробных клеток от бульона (обычно путем фильтрации) и выделения из бульона одного или более целевых продуктов. Спирты и/или ацетон можно выделять, например, перегонкой. Кислоты можно выделять, например, адсорбцией на активированном угле. Выделенные микробные клетки могут быть возвращены в биореактор. Бесклеточный пермеат, оставшийся после удаления целевых продуктов, также может быть возвращен в биореактор. Для восполнения среды перед ее возвратом в биореактор можно добавлять к бесклеточному пермеату дополнительные питательные вещества.

#### Описание.

Авторы изобретения обнаружили, что за счет оптимизации использования и состава различных газовых потоков можно повысить эффективность ферментации и общую эффективность улавливания углерода. Подбирая состав газового потока, используемого в процессе ферментации, изобретатели обнаружили, что можно усовершенствовать производство конкретных желаемых продуктов. В различных случаях изобретение оптимизирует поток газа для параллельных процессов ферментации для улучшения селективности желаемых продуктов. В других случаях изобретение оптимизирует поток газа к последовательным процессам ферментации для улучшения селективности желаемых продуктов. В различных случаях состав газа, направляемого в конкретный процесс ферментации, оптимизируется до конкретного соотношения  $H_2:CO$ , так что указанный газ идеален для производства конкретного продукта ферментации.

При использовании обедненного водородом газа указанный процесс ферментации может оптимально производить один или более продуктов, выбранных из группы, состоящей из этанола, ацетата, моноэтиленгликоля (МЭГ), 1,2-пропандиола, 3-гидроксипропионата, ацетона, изопропанола, лактата, 1,3-бутандиола, 2-бутанола, 2-гидроксиизомасляной кислоты, 3-гидроксипропионата, метилэтилкетона (МЕК), изоамилового спирта, терпенов, включая изопрен, адипиновой кислоты, 1-гексанола, 1-октанола и продуктов на основе хоризмата. В некоторых случаях более выгодно производить конкретные продукты с

потоком, который обеднен водородом, а не с потоком, обогащенным водородом. Такие продукты, как 3-гидроксипропионат, изоамиловый спирт, и/или продукты, производные из хоризмата, предпочтительно получают с использованием потока, обедненного водородом, вместо потока, обогащенного водородом.

Авторы изобретения обнаружили, что при использовании по меньшей мере двух процессов ферментации, либо параллельных, либо последовательных, входящий исходный газ может быть разделен на поток, обогащенный водородом, и поток, обедненный водородом, каждый из которых является оптимальным для производства конкретных продуктов в процессе ферментации газа. Кроме того, при последовательной работе по меньшей мере двух процессов ферментации первый процесс ферментации может быть оптимизирован для получения уксусной кислоты, которая затем может быть преобразована во втором процессе ферментации в этанол, что приведет к увеличению общего производства этанола. За счет использования двух процессов ферментации, каждый из которых работает для приема разных потоков, обогащенных или обедненных водородом, можно повысить общую эффективность улавливания углерода, поскольку практически весь газ используется по меньшей мере в одном из процессов ферментации для производства по меньшей мере одного продукта ферментации вместо производства значительных количеств нежелательных побочных продуктов, таких как диоксид углерода.

По меньшей мере часть поступающего исходного газа может быть получена из процесса газификации. Изобретатели обнаружили, что помимо использования поступающего исходного газа для ферментации в конкретных случаях является выгодным использовать либо по меньшей мере часть отходящего газа из процесса ферментации, либо по меньшей мере часть входящего газового потока из процесса газификации для сушки сырья, используемого в процессе газификации. За счет использования по меньшей мере части входящего потока газа из процесса газификации и/или потока отходящего газа из процесса ферментации для сушки сырья для процесса газификации можно повысить эффективность процесса газификации. В частности, изобретатели обнаружили, что использование отходящего газа или поступающего газа для сушки поступающих твердых бытовых отходов и/или сырья биомассы, используемого в процессе газификации, приводит к повышению энергоэффективности, повышению качества синтез-газа и увеличению дохода от продукта по сравнению с использованием отходящего газа для выработки электроэнергии или пара. Изобретатели обнаружили, что использование отходящего газа для выработки электроэнергии или пара может в лучшем случае восстановить шестьдесят процентов (60%) энергии отходящего газа, сорок процентов (40%) электроэнергии и двадцать процентов (20%) пара. В отличие от этого, использование отходящего газа для сушки сырья может восстановить до девяноста двух процентов (92%) энергии отходящего газа в виде улучшенного выхода синтез-газа.

Таким образом, когда промышленным источником является процесс газификации, более экономично использовать отходящий газ для сушки, чем вырабатывать электричество или пар. Изобретатели обнаружили, что когда отходящий газ используется для сушки твердых бытовых отходов (ТБО), а не для производства пара или электроэнергии, ценность продуктов, произведенных в результате увеличенного производства синтез-газа, превышает стоимость электричества или пара, которые могли быть выработаны в противном случае. Сравнение ожидаемых доходов представлено в таблицах ниже. Хотя это сравнение проводится исходя из предположения, что продуктом процесса ферментации является этанол, в различных других случаях, когда производится один или более других продуктов ферментации, все же может быть полезным использование по меньшей мере части отходящего газа для сушки. Приведенная ниже диаграмма, показывающая количество отходящего газа, используемого при газификации, основана на использовании газификатора с производительностью 41,7 тонн в час (ТРН), ферментационной установки с потреблением сырья 1000 тонн в день (ТРД) при удельной энергии сырья 11 МДж/кг.

<b>Отходящий газ, используемый при газификации</b>	
<b>Отходящий газ</b>	<b>50 ГДж/ч</b>
<i>Эффективность сушилки</i>	3 ГДж/т воды
<i>Удаляемая вода</i>	6,7 т/ч
<i>Начальная влажность ТБО</i>	40%
<i>Конечная влажность ТБО</i>	23%
<i>Предполагаемое повышение эффективности синтез-газа</i>	16,7% относительных
<i>Предполагаемый рост производства синтез-газа</i>	45,9 ГДж/ч
<i>Предполагаемый рост производства этанола</i>	1,0 т/ч
<i>Стоимость отходящего газа при цене этанола 1000 долларов США за тонну</i>	20 долларов США за гигаджоуль

Отходящий газ, используемый в производстве электроэнергии и пара	
Отходящий газ	50 ГДж/ч
<i>Эффективность комбинированной выработки электроэнергии</i>	40%
<i>Эффективность комбинированной выработки пара</i>	20%
<i>Расчетная выходная электрическая мощность</i>	5,6 МВт
<i>Расчетная производительность пара</i>	4,5 т/ч
<i>Стоимость отходящего газа при цене на электроэнергию 80 долларов США за МВт-ч и на пар 20 долларов США за тонну</i>	10,8 долларов США за гигаджоуль

Как показано в приведенных выше таблицах, стоимость отходящего газа выше, когда он используется для сушки (20 долларов США за гигаджоуль), вместо использования для производства пара или электроэнергии (10,8 долларов США за гигаджоуль). По существу, в одном или более вариантах реализации по меньшей мере часть отходящего газа используется в процессе сушки сырья.

Вышеупомянутые преимущества лучше всего достигаются путем управления использованием и составом различных газовых потоков, как показано на фиг. 1-3, описанных ниже.

На фиг. 1 показана схема интеграции процессов, изображающая параллельные процессы 1, 2 ферментации, в результате которых получают отдельные продукты 171, 1001 из оптимизированных газовых потоков 141, 142 в соответствии с одним аспектом изобретения. В различных случаях каждый процесс 1, 2 ферментации может состоять по меньшей мере из двух последовательных биореакторов 160, 170 и 190, 1000. Предпочтительно процессы 1, 2 ферментации объединены по меньшей мере с одним промышленным источником 110, так что каждый процесс 1, 2 ферментации может принимать по меньшей мере часть оптимизированного газового потока 141, 142 из промышленного источника 110. Предпочтительно поток 111 газа из промышленного источника 110 разделяют на поток 141, обогащенный водородом, и поток 142, обедненный водородом, с использованием по меньшей мере одного модуля 140 выделения водорода. По меньшей мере часть обогащенного водородом потока 141 ферментируется в первом процессе 1 ферментации с использованием по меньшей мере одного реактора 160, содержащего жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более С1-фиксирующих микроорганизмов, с получением первого продукта 171 ферментации. В различных случаях первый процесс 1 ферментации состоит из двух или более реакторов 160, 170. По меньшей мере часть обедненного водородом потока 142 ферментируется во втором процессе 2 ферментации с использованием по меньшей мере одного реактора 190, содержащего жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более С1-фиксирующих микроорганизмов, для получения второго продукта 1001 ферментации. В различных случаях второй процесс 2 ферментации состоит из двух или более реакторов 190, 1000. Предпочтительно первый продукт 171 ферментации, полученный в первом процессе 1 ферментации, и второй продукт 1001 ферментации, полученный в результате второго процесса 2 ферментации, являются разными продуктами. В различных случаях первым продуктом 171 ферментации является этанол, а вторым продуктом 1001 ферментации является 2,3-бутандиол. В конкретных вариантах реализации жидкая питательная среда и технологическая вода 163, 193 направляются в первый процесс 1 ферментации и второй процесс 2 ферментации параллельно.

В некоторых случаях промышленный источник 110 выбран из группы, состоящей из ферментации углеводов, ферментации газа, производства цемента, производства целлюлозы и бумаги, производства стали, нефтепереработки и связанных процессов, производства нефтехимических продуктов, производства кокса, анаэробного или аэробного сбраживания, газификации, добычи природного газа, конверсии метана, добычи нефти, металлургических процессов для производства и/или очистки алюминия, меди и/или ферросплавов, геологических месторождений и каталитических процессов. В различных случаях по меньшей мере часть газового потока 111 состоит из топочного газа доменной печи из металлургического процесса 110. В различных случаях по меньшей мере часть газового потока 111 получена из процесса 110 конверсии метана. В процессе конверсии метана предпочтительно по меньшей мере часть метансодержащего газа преобразуется в газовый поток 111, содержащий по меньшей мере часть монооксида углерода и водорода.

В некоторых случаях модуль 140 выделения водорода представляет собой процесс адсорбции при переменном давлении. Предпочтительно модуль 140 выделения водорода расположен перед процессами 1, 2 ферментации для получения потока 141, обогащенного водородом, и потока 142, обедненного водородом, из поступающего газа 111 из промышленного источника 110. В некоторых случаях поступающий газ 111 направляется в один или более компрессоров 130 для повышения давления входящего потока 111 газа и получения входящего потока 131 газа под давлением. При использовании процесса адсорбции с переменным давлением в качестве модуля 140 выделения водорода обогащенный водородом поток 141 выходит из модуля 140 выделения водорода под повышенным давлением по сравнению с потоком 142, обедненным водородом. По существу, при использовании процесса адсорбции с переменным давлением

в качестве модуля 140 выделения водорода обедненный водородом поток 142 предпочтительно направляют в один или более компрессоров 150 для получения обедненного водородом потока 151 под давлением перед его отправкой во второй процесс 2 ферментации.

Предпочтительно, когда первый процесс 1 ферментации состоит из множества биореакторов 160, 170, обогащенный водородом поток 141 направляют в биореакторы 160, 170 параллельно, а ферментационный бульон 161 направляют последовательно из первого биореактора 160 во второй биореактор 170.

Предпочтительно, когда второй процесс ферментации состоит из множества биореакторов 190, 1000, обедненный водородом поток 142, который может представлять собой обедненный водородом поток 151 под давлением, направляют в биореакторы 190, 1000 параллельно, а ферментационный бульон 191 направляют последовательно из первого биореактора 190 во второй биореактор 1000.

Для извлечения продукта 171 из первого процесса 1 ферментации можно использовать один или более процессов 180 извлечения продукта. В конкретных случаях в процессе 180 извлечения продукта можно получать поток 181 очищенного продукта.

Для извлечения продукта 1001 из второго процесса 2 ферментации можно использовать один или более процессов 1100 извлечения продукта. В конкретных случаях в процессе 1100 извлечения продукта можно получать поток 1101 очищенного продукта.

Настоящее изобретение позволяет адаптировать состав газа, используемого в процессах 1, 2 ферментации для усовершенствования производства различных продуктов 171, 1001. Один метод оптимизации состава газа, используемый в процессах 1, 2 ферментации, заключается в использовании по меньшей мере части отходящего газа 162, 172, 192, 1002, производимого в биореакторах 160, 170, 190, 1000. В некоторых случаях по меньшей мере часть отходящего газа 162, 172, полученного в первом процессе 1 ферментации, рециркулируют в поток 141, обогащенный водородом. По меньшей мере часть отходящего газа 162, 172 может быть рециркулирована либо перед модулем 140 отделения водорода, либо в модуль 140 выделения водорода, либо после модуля 140 выделения водорода для оптимизации состава газа, используемого в первом процессе 1 ферментации. В некоторых случаях по меньшей мере часть отходящего газа 192, 1002, полученного во втором процессе 2 ферментации, рециркулируют в поток 151, обедненный водородом. По меньшей мере часть отходящего газа 192, 1002 может быть рециркулирована либо перед модулем 140 выделения водорода, либо в модуль 140 выделения водорода, либо после модуля 140 выделения водорода для оптимизации состава газа, используемого во втором процессе 2 ферментации.

В различных случаях поток 141, обогащенный водородом, оптимизируется путем смешивания по меньшей мере части входящего потока 111 газа, который может быть потоком 131 входящего газа под давлением, с потоком 141, обогащенным водородом, для удовлетворения минимальных требований относительно монооксида углерода в потоке 141, обогащенном водородом.

Когда входящий поток 111 газа из промышленного источника 110 превышает количество, которое может быть использовано в процессах 1, 2 ферментации, по меньшей мере часть входящего потока 111 газа может использоваться паровым котлом, когенерационной установкой и/или процессом 120 сушки сырья.

Использование по меньшей мере части входящего газового потока 111 в процессе 120 сушки сырья особенно полезно, когда входящий газовый поток 110 является особенно разреженным и может иметь низкую эффективность преобразования в электрическую энергию. В различных случаях, когда промышленный источник 110 содержит один или более процессов газификации, по меньшей мере часть поступающего газового потока 111 используется в процессе 120 сушки сырья, независимо от того, превышает ли количество газа величину, которая может использоваться в процессах 1, 2 ферментации.

Предпочтительно процессы 1, 2 ферментации могут протекать непрерывно. Чтобы гарантировать непрерывную работу процессов 1, 2 ферментации, биореакторы 160, 170, 190, 1000 предпочтительно должны содержать оптимальную пропорцию жизнеспособных микробов. В некоторых случаях использование газа, обогащенного монооксидом углерода (также известного как газ 142, обедненный водородом), увеличивает относительное содержание микробной биомассы, произведенной в процессе ферментации, по сравнению с использованием газа 141, обогащенного водородом. Для поддержания культуры в первом процессе 1 ферментации, в котором используется газ 141, обогащенный водородом, по меньшей мере часть вытекающего потока 1003, содержащего микробную биомассу, может быть отправлена из биореакторов 190, 1000 второго процесса 2 ферментации в биореакторы 160, 170 первого процесса 1 ферментации. Предпочтительно по меньшей мере часть микробной биомассы из биореакторов 190, 1000 второго процесса 2 ферментации является жизнеспособной. В конкретных случаях использование вытекающего потока 1003 из второго процесса 2 ферментации выполняется непрерывно.

В различных случаях в процессах 1, 2 ферментации используется один или более фиксирующих C1 микроорганизмов для ферментации C1-содержащего газа и получения одного или более продуктов 171, 1001 ферментации. Предпочтительно указанный C1-фиксирующий микроорганизм, используемый в указанных процессах ферментации, выбран из группы, состоящей из *Moorella*, *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Acetobacterium*, *Eubacterium*, *Butyrivibacterium*, *Oxobacter*, *Methanosarcina* и *Desulfotomaculum*. Предпочтительно C1-фиксирующие микроорганизмы, используемые в процессах 1, 2 ферментации, представляют собой *Clostridium autoethanogenum*.

На фиг. 2 показана схема интеграции процесса, изображающая протекание оптимизированных газовых потоков 241, 242 к последовательным процессам 1, 2 ферментации, в соответствии с одним аспектом изобретения. В различных случаях каждый процесс 1, 2 ферментации может состоять по меньшей мере из двух последовательных биореакторов 260, 270 и 280, 290. Предпочтительно процессы 1, 2 ферментации объединены по меньшей мере с одним промышленным источником 210, так что каждый процесс 1, 2 ферментации может принимать по меньшей мере часть оптимизированного газового потока 241, 242 из промышленного источника 210. Предпочтительно поток 211 газа из промышленного источника 210 разделяется на поток 241, обогащенный водородом, и поток 242, обедненный водородом, с использованием по меньшей мере одного модуля 240 выделения водорода. По меньшей мере часть обогащенного водородом потока 241 ферментируется в первом процессе 1 ферментации с использованием по меньшей мере одного реактора 260, содержащего жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более С1-фиксирующих микроорганизмов, для получения первого продукта 271 ферментации. В различных случаях первый процесс 1 ферментации состоит из двух или более реакторов 260, 270. По меньшей мере часть обедненного водородом потока 242 ферментируется во втором процессе 2 ферментации с использованием по меньшей мере одного реактора 280, содержащего жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более С1-фиксирующих микроорганизмов, для получения второго продукта 291 ферментации. В различных случаях второй процесс 2 ферментации состоит из двух или более реакторов 280, 290. Предпочтительно первый продукт 271 ферментации, полученный в результате первого процесса 1 ферментации, и второй продукт 291 ферментации, полученный в результате второго процесса 2 ферментации, являются разными продуктами. В различных случаях первый продукт 271 ферментации представляет собой уксусную кислоту, а второй продукт 291 ферментации представляет собой этанол. Предпочтительно по меньшей мере часть уксусной кислоты 271 из первого процесса 1 ферментации направляется во второй процесс 2 ферментации для преобразования по меньшей мере части уксусной кислоты 271 в этанол 291. В конкретных вариантах реализации жидкая питательная среда и технологическая вода 263, 283 направляются в первый процесс 1 ферментации и второй процесс 2 ферментации параллельно.

В конкретных случаях промышленный источник 210 выбран из группы, состоящей из ферментации углеводов, ферментации газа, производства цемента, производства целлюлозы и бумаги, производства стали, нефтепереработки и связанных процессов, производства нефтехимических продуктов, производства кокса, анаэробного или аэробного сбраживания, газификации, добычи природного газа, конверсии метана, добычи нефти, металлургических процессов для производства и/или очистки алюминия, меди и/или ферросплавов, геологических месторождений и каталитических процессов. В различных случаях по меньшей мере часть газового потока 211 состоит из топочного газа доменной печи металлургического процесса 210. В различных случаях по меньшей мере часть газового потока 211 получается в процессе 210 конверсии метана. В процессе 210 конверсии метана предпочтительно по меньшей мере часть метансодержащего газа преобразуют в газовый поток 211, содержащий по меньшей мере часть монооксида углерода и водорода.

В некоторых случаях модуль 240 выделения водорода представляет собой процесс адсорбции при переменном давлении. Предпочтительно модуль 240 выделения водорода расположен перед процессами 1, 2 ферментации для получения потока 241, обогащенного водородом, и потока 242, обедненного водородом, из поступающего газа 211 из промышленного источника 210. В некоторых случаях входящий газ 211 направляется в один или более компрессоров 230 для повышения давления входящего газового потока 211 и создания входящего газового потока 231 под давлением. При использовании процесса адсорбции с переменным давлением в качестве модуля 240 выделения водорода обогащенный водородом поток 241 выходит из модуля 240 выделения водорода под повышенным давлением по сравнению с потоком 242, обедненным водородом. По существу, при использовании процесса адсорбции с переменным давлением в качестве модуля 240 выделения водорода обедненный водородом поток 242 предпочтительно направляют в один или более компрессоров 250 для получения сжатого обедненного водородом потока 251 перед отправкой во второй процесс 2 ферментации.

Предпочтительно, когда первый процесс 1 ферментации состоит из нескольких биореакторов 260, 270, обогащенный водородом поток 241 направляется в биореакторы 260, 270 параллельно, а ферментационный бульон 261 направляется последовательно из первого биореактора 260 во второй биореактор 270.

Предпочтительно, когда второй процесс ферментации состоит из множества биореакторов 280, 290, обедненный водородом поток 242, который может представлять собой обедненный водородом поток 251 под давлением, направляют в биореакторы 280, 290 параллельно, а ферментационный бульон 281 направляют последовательно из первого биореактора 280 во второй биореактор 290.

Когда продукт первого процесса 1 ферментации направляют во второй процесс 2 ферментации для получения конечного продукта 291, можно использовать один или более процессов 2000 извлечения продукта для извлечения потока 2001 очищенного продукта.

Настоящее изобретение позволяет адаптировать состав газа, используемого в процессах 1, 2 ферментации, для усовершенствования производства различных продуктов 271, 291. Один из методов опти-

мизации состава газа, используемого в процессах 1, 2 ферментации, заключается в использовании по меньшей мере части отходящего газа 262, 272, 282, 292, производимого в биореакторах 260, 270, 280, 290. В некоторых случаях по меньшей мере часть отходящего газа 262, 272, полученного в первом процессе 1 ферментации, рециркулируют в поток 241, обогащенный водородом. По меньшей мере часть отходящего газа 262, 272 может быть рециркулирована либо перед модулем 240 выделения водорода, либо в модуль 240 выделения водорода, либо после модуля 240 выделения водорода для оптимизации состава газа, используемого в первом процессе 1 ферментации. В некоторых случаях по меньшей мере часть отходящего газа 282, 292, полученного во втором процессе 2 ферментации, рециркулируют в поток 251, обедненный водородом. По меньшей мере часть отходящего газа 282, 292 может быть рециркулирована либо перед модулем 240 выделения водорода, либо в модуль 240 выделения водорода, либо после модуля 240 выделения водорода для оптимизации состава газа, используемого во втором процессе 2 ферментации.

В различных случаях поток 241, обогащенный водородом, оптимизируется путем смешивания по меньшей мере части входящего потока 211 газа, который может быть потоком 231 входящего газа под давлением, с потоком 241, обогащенным водородом, для удовлетворения минимальных требований относительно монооксида углерода в потоке 241, обогащенном водородом.

Когда входящий поток 211 газа из промышленного источника 210 превышает количество, которое может быть использовано в процессах 1, 2 ферментации, по меньшей мере часть входящего потока 211 газа может использоваться паровым котлом, когенерационной установкой и/или процессом 220 сушки сырья. Использование по меньшей мере части входящего газового потока 211 в процессе 220 сушки сырья особенно полезно, когда входящий газовый поток 210 является особенно разреженным и может иметь низкую эффективность преобразования в электрическую энергию. В различных случаях, когда промышленный источник 210 содержит один или более процессов газификации, по меньшей мере часть поступающего газового потока 211 используется в процессе 220 сушки сырья, независимо от того, превышает ли количество газа величину, которая может использоваться в процессах 1, 2 ферментации.

Предпочтительно процессы 1, 2 ферментации могут протекать непрерывно. Чтобы гарантировать непрерывную работу процессов 1, 2 ферментации, биореакторы 260, 270, 280, 290 предпочтительно должны содержать оптимальную пропорцию жизнеспособных микробов. В конкретных случаях использование газа, обогащенного монооксидом углерода (также известного как газ 242, обедненный водородом), увеличивает относительное содержание микробной биомассы, произведенной в указанном процессе ферментации, по сравнению с использованием газа 241, обогащенного водородом. Для поддержания культуры в первом процессе 1 ферментации, в котором используется газ 241, обогащенный водородом, по меньшей мере часть вытекающего потока 293, содержащего микробную биомассу, может быть отправлена из биореакторов 280, 290 второго процесса 2 ферментации в биореакторы 260, 270 первого процесса 1 ферментации. Предпочтительно по меньшей мере часть микробной биомассы из биореакторов 280, 290 второго процесса 2 ферментации является жизнеспособной. В конкретных случаях использование вытекающего потока 293 из второго процесса 2 ферментации выполняется непрерывно.

В различных случаях в процессах 1, 2 ферментации используется один или более фиксирующих C1 микроорганизмов для ферментации C1-содержащего газа и получения одного или более продуктов 271, 291 ферментации. Предпочтительно указанный C1-фиксирующий микроорганизм, используемый в указанных процессах ферментации, выбран из группы, состоящей из *Moorella*, *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Acetobacterium*, *Eubacterium*, *Butyrivacterium*, *Oxobacter*, *Methanosarcina* и *Desulfotomaculum*. Предпочтительно C1-фиксирующий микроорганизм, используемый в процессах 1, 2 ферментации, представляет собой *Clostridium autoethanogenum*.

На фиг. 3 показана технологическая схема интеграции процесса, изображающая использование рециркулированного отходящего газа 352, 362 из процесса ферментации в сочетании с резервуаром 380 для хранения газа и парогенератором, электрогенератором и/или процессом 320 сушки сырья в соответствии с одним аспектом изобретения. В конкретных случаях рециркуляция по меньшей мере части отходящего газа 352, 362 в биореакторы 350, 360 снижает и/или смягчает потенциальное ингибирование культуры в биореакторах 350, 360. В различных случаях по меньшей мере часть отходящего газа 352, 362 направляется в резервуар 380 для хранения газа перед использованием. Предпочтительно при использовании по меньшей мере части отходящего газа 352, 362 из резервуара для хранения 380 может быть направлена либо по потоку 381 выше процесса 340 адсорбции при переменном давлении, либо по потоку 382 в процесс 340 адсорбции при переменном давлении, либо по потоку 383 ниже процесса 340 адсорбции при переменном давлении. В некоторых случаях по меньшей мере часть отходящего газа 352, 362 направляется в парогенератор, электрогенератор и/или процесс 320 сушки сырья в дополнение к рециркуляции или вместо нее в биореакторы 350, 360.

Предпочтительно по меньшей мере часть отходящего газа 352, 362 проходит через процесс 340 адсорбции при переменном давлении перед ее рециркулированием назад в биореакторы 350, 360. В различных случаях по меньшей мере часть отходящего газа 352, 362 направляется в резервуар 380 для хранения газа перед ее прохождением в процесс 340 адсорбции при переменном давлении. Было обнаружено, что процесс 340 адсорбции с переменным давлением особенно полезен для удаления различных ком-

понентов из газового потока 311, который может стать потоком 331 под давлением, если его пропустить через компрессор 330, и/или из потока 352, 362 отходящего газа. Было обнаружено, что процесс 340 адсорбции при переменном давлении удаляет по меньшей мере часть по меньшей мере одного компонента, выбранного из группы, состоящей из диоксида углерода, неорганических углеводородов, смол, органического азота и органической и неорганической серы, из газового потока 311 и/или потока 352, 362 отходящего газа для получения осветленного отходящего газа 341. Было обнаружено, что в различных случаях процесс 340 адсорбции при переменном давлении одновременно удаляет по меньшей мере два компонента, выбранных из группы, состоящей из диоксида углерода, неорганических углеводородов, смол, органического азота и органической и неорганической серы, из газового потока 311 и/или потока 352, 362 отходящего газа.

В некоторых случаях рециркуляция по меньшей мере части отходящего газа 352, 362 в биореакторы 350, 360 увеличивает общий состав метана и азота в общем газовом потоке 341 по меньшей мере на пятнадцать процентов (15%).

В различных случаях рециркуляция по меньшей мере части отходящего газа 352, 362 в биореакторы 350, 360 увеличивает общий состав метана и азота в общем потоке 341 газа по меньшей мере на пятьдесят процентов (50%).

Было обнаружено, что увеличение пропорции инертных газов, таких как метан и азот, помогает смягчить ингибирование указанной культуры, которое может быть замечено, когда содержание монооксида углерода в потоке газа слишком велико.

Процесс ферментации предпочтительно оптимизирован для производства продуктов 361 из газового потока 311 из промышленного источника 310. При последовательном включении нескольких биореакторов 350, 360 газовый поток 331, который может быть либо обогащен водородом, либо обеднен водородом, предпочтительно направляют параллельно, при этом жидкую питательную среду и технологическую воду 353 предпочтительно направляют в первый биореактор 350, а ферментационный бульон 351 предпочтительно направляют из первого биореактора 350 во второй биореактор 360. Предпочтительно продукты 361, полученные в процессе ферментации, разделяют с использованием одного или более процессов 370 выделения продукта для получения потока 371 очищенного продукта.

По меньшей мере часть входящего газового потока 311 может использоваться паровым котлом, когенерационной установкой и/или процессом 320 сушки сырья, когда газовый поток 311 из промышленного источника 310 превышает величину, которую процесс ферментации может использовать. Однако в различных случаях по меньшей мере часть поступающего газового потока 311 используют в процессе 320 сушки сырья, независимо от того, превышает ли количество газа величину, которая может быть использована в процессе ферментации. Использование по меньшей мере части газового потока 311 в процессе 320 сушки сырья особенно полезно для получения высушенного сырья 321 для процесса газификации. Было обнаружено, что сушка сырья 321 для процесса газификации увеличивает эффективность процесса 310 газификации.

Все ссылки, включая публикации, патентные заявки и патенты, упомянутые в данном документе, тем самым включены посредством ссылки в той же степени, как если бы каждая ссылка была отдельно и конкретно указана для включения в данный документ посредством ссылки и изложена в полном объеме. В настоящем описании ссылка на любой известный уровень техники не является и не должна рассматриваться как признание того, что такой известный уровень техники является частью общедоступных известных знаний в области деятельности в любой стране.

Следует считать, что применение терминов в единственном числе и аналогичных ссылок в контексте описания настоящего изобретения (особенно в контексте следующей формулы изобретения) включает как единственное, так и множественное число, если только в настоящем документе не указано иное, или это явно не противоречит контексту. Термины "содержащий", "имеющий", "включающий" и "охватывающий" следует рассматривать как неограничивающие термины (т.е. означающие "включая, без ограничений"), если не указано иное. Термин "состоящий по существу из" ограничивает объем композиции, процесса или способа указанными материалами или этапами, или тем, что не оказывает существенного влияния на основные и новые характеристики композиции, процесса или способа. Использование альтернативы (например, "или") следует понимать как означающее одну, обе или любую из вышеуказанных комбинацию альтернатив.

Перечисление диапазонов значений в данном документе просто предназначено для использования в качестве сокращенного метода индивидуальной ссылки на каждое отдельное значение, попадающее в этот диапазон, если в данном документе не указано иное, и каждое отдельное значение включено в описание, как если бы оно было отдельно изложено в данном документе. Например, любой диапазон концентраций, диапазон процентов, диапазон соотношений, диапазон целых чисел, диапазон размеров или диапазон толщин следует понимать как включающий значение любого целого числа в указанном диапазоне и, если это уместно, его долей (например, одной десятой и одной сотой 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 иное явно не противоречит контексту. Использование

любых возможных примеров или вводных слов перед примером (например, "такой как"), приведенных в данном документе, предназначено просто для лучшего освещения данного изобретения и не налагает ограничение на объем данного изобретения, если не заявлено иное. Ни одно выражение, приведенное в данном описании, не следует понимать как указание на какой-либо незаявленный элемент как необходимый для практического осуществления настоящего изобретения.

В данном документе описаны предпочтительные варианты реализации настоящего изобретения. Изменения этих предпочтительных вариантов реализации настоящего изобретения станут очевидными для специалистов в данной области при прочтении представленного выше описания. Авторы настоящего изобретения ожидают, что квалифицированные специалисты будут использовать такие вариации при необходимости, и авторы изобретения предполагают, что настоящее изобретение будет осуществляться на практике иначе, чем конкретно описано в данном документе. Соответственно настоящее изобретение включает в себя все модификации и эквиваленты объекта изобретения, приведенные ниже в формуле изобретения, как это установлено действующим законодательством. Кроме того, любая комбинация описанных выше элементов во всех их возможных вариациях включена в настоящее изобретение, если в данном документе не указано иное или иное явно не противоречит контексту.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ оптимизации потока газа для параллельных процессов ферментации, включающий разделение газового потока, полученного по меньшей мере из одного промышленного источника, на поток, обогащенный водородом, и поток, обедненный водородом, с использованием по меньшей мере одного модуля выделения водорода;

пропускание потока, обогащенного водородом, и потока, обедненного водородом, в первый и второй процесс ферментации соответственно, причем указанные первый и второй процессы ферментации выполняют параллельно;

ферментацию по меньшей мере части обогащенного водородом потока в первом процессе ферментации с использованием по меньшей мере одного реактора, содержащего жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более C1-фиксирующих микроорганизмов, для получения первого продукта ферментации; и

ферментацию по меньшей мере части обедненного водородом потока во втором процессе ферментации, содержащем по меньшей мере один реактор, содержащий жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более C1-фиксирующих микроорганизмов, для получения второго продукта ферментации;

при этом первый продукт ферментации и второй продукт ферментации являются разными продуктами; причем поток, обогащенный водородом, содержит  $H_2$  и CO при соотношении  $H_2$  к CO от 2:1 до 5:1, а поток, обедненный водородом, содержит  $H_2$  и CO при соотношении  $H_2$  к CO от 0,05:1 до менее 2:1.

2. Способ по п.1, в котором первый продукт ферментации представляет собой этанол, а второй продукт ферментации представляет собой 2,3-бутандиол.

3. Способ по п.1, в котором жидкую питательную среду подают в первый процесс ферментации и второй процесс ферментации параллельно.

4. Способ по п.1, в котором модуль выделения водорода представляет собой процесс адсорбции при переменном давлении.

5. Способ по п.1, в котором промышленный источник выбран из группы, состоящей из ферментации углеводов, ферментации газа, производства цемента, производства целлюлозы и бумаги, производства стали, процессов нефтепереработки, производства нефтехимических продуктов, производства кокса, анаэробного или аэробного сбраживания, газификации, добычи природного газа, конверсии метана, добычи нефти, металлургических процессов для производства и/или очистки алюминия, меди и/или ферросплавов и каталитических процессов.

6. Способ по п.1, в котором по меньшей мере часть газового потока состоит из топчного газа доменной печи металлургического процесса.

7. Способ по п.1, в котором в первом процессе ферментации дополнительно образуется первый отходящий газ, который рециркулируют в поток, обогащенный водородом.

8. Способ по п.7, в котором по меньшей мере часть отходящего газа, полученного в первом процессе ферментации, пропускают через процесс адсорбции при переменном давлении перед ее рециркулированием в поток, обогащенный водородом.

9. Способ по п.1, в котором во втором процессе ферментации дополнительно образуется второй отходящий газ, который рециркулируют в поток, обедненный водородом.

10. Способ по п.9, в котором по меньшей мере часть отходящего газа, полученного во втором процессе ферментации, пропускают через процесс адсорбции при переменном давлении перед ее рециркулированием в поток, обедненный водородом.

11. Способ по п.1, в котором C1-фиксирующий микроорганизм выбран из группы, состоящей из Moorella, Clostridium, Ruminococcus, Acetobacterium, Eubacterium, Butyrivacterium, Oxobacter, Methanosar-

cina и Desulfotomaculum.

12. Способ по п.1, в котором C1-фиксирующий микроорганизм представляет собой Clostridium autoethanogenum.

13. Способ оптимизации потока газа для последовательных процессов ферментации, включающий разделение газового потока, полученного по меньшей мере из одного промышленного источника, на поток, обогащенный водородом, и поток, обедненный водородом, с использованием по меньшей мере одного модуля выделения водорода;

ферментацию по меньшей мере части обогащенного водородом потока в первом процессе ферментации с использованием по меньшей мере одного реактора, содержащего жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более C1-фиксирующих микроорганизмов, для получения первого продукта ферментации; и

ферментацию по меньшей мере части обедненного водородом потока во втором процессе ферментации, содержащем по меньшей мере один реактор, содержащий жидкую питательную среду, содержащую культуру одного или более C1-фиксирующих микроорганизмов, для получения второго продукта ферментации;

причем поток, обогащенный водородом, содержит  $H_2$  и CO при соотношении  $H_2$  к CO от 2:1 до 5:1, а поток, обедненный водородом, содержит  $H_2$  и CO при соотношении  $H_2$  к CO от 0,05:1 до менее 2:1;

при этом по меньшей мере часть первого продукта ферментации передают во второй процесс ферментации.

14. Способ по п.13, в котором первым продуктом ферментации является уксусная кислота.

15. Способ по п.14, в котором по меньшей мере часть уксусной кислоты из первого процесса ферментации превращают в этанол во втором процессе ферментации.

16. Способ по п.13, в котором модуль выделения водорода представляет собой процесс адсорбции при переменном давлении.

17. Способ по п.13, в котором промышленный источник выбран из группы, состоящей из ферментации углеводов, ферментации газа, производства цемента, производства целлюлозы и бумаги, производства стали, процессов нефтепереработки, производства нефтехимических продуктов, производства кокса, анаэробного или аэробного сбраживания, газификации, добычи природного газа, конверсии метана, добычи нефти, металлургических процессов для производства и/или очистки алюминия, меди и/или ферросплавов и каталитических процессов.

18. Способ по п.13, в котором по меньшей мере часть газового потока состоит из топочного газа доменной печи металлургического процесса.

19. Способ по п.13, в котором в первом процессе ферментации дополнительно образуется первый отходящий газ, который рециркулируют в поток, обогащенный водородом.

20. Способ по п.19, в котором по меньшей мере часть отходящего газа, полученного в первом процессе ферментации, пропускают через процесс адсорбции при переменном давлении перед его рециркуляцией в поток, обогащенный водородом.

21. Способ по п.13, в котором во втором процессе ферментации дополнительно образуется второй отходящий газ, который рециркулируют в поток, обедненный водородом.

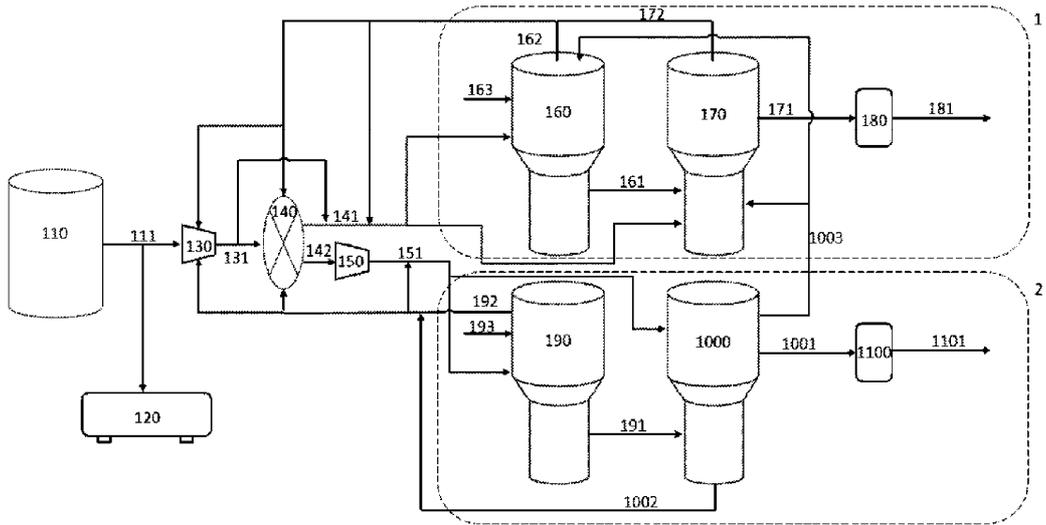
22. Способ по п.21, в котором по меньшей мере часть отходящего газа, полученного во втором процессе ферментации, пропускают через процесс адсорбции при переменном давлении перед ее рециркуляцией в поток, обедненный водородом.

23. Способ по п.13, в котором C1-фиксирующий микроорганизм выбран из группы, состоящей из Moorella, Clostridium, Ruminococcus, Acetobacterium, Eubacterium, Butyribacterium, Oxobacter, Methanosarcina и Desulfotomaculum.

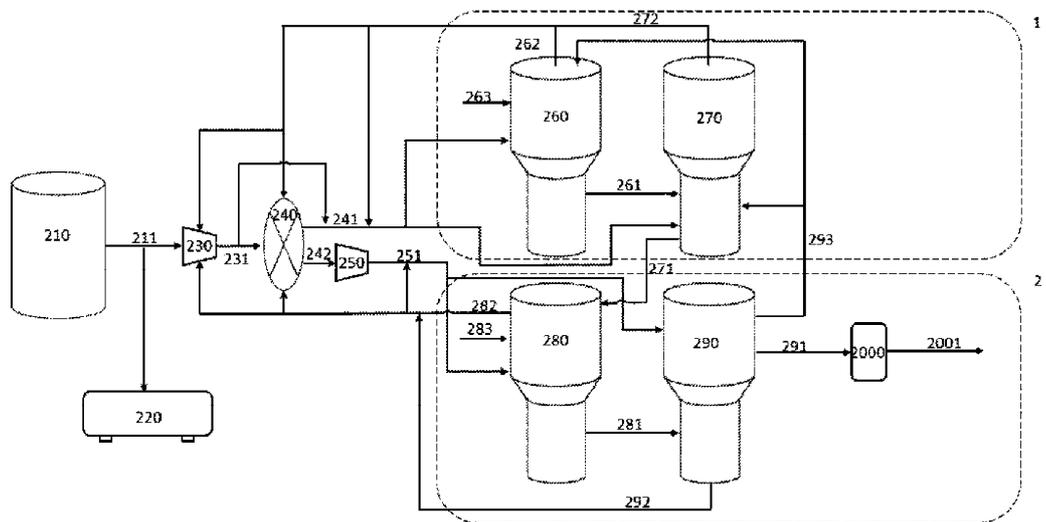
24. Способ по п.13, в котором C1-фиксирующий микроорганизм представляет собой Clostridium autoethanogenum.

25. Способ по пп.1 и 13, в котором по меньшей мере часть газового потока получают в процессе конверсии метана.

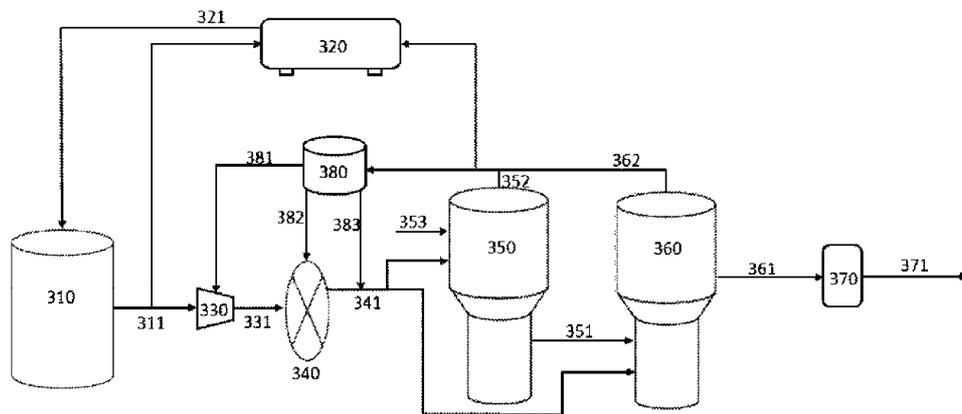
26. Способ по п.25, в котором в процессе конверсии метана по меньшей мере часть метансодержащего газа преобразуют в газовый поток, содержащий по меньшей мере часть монооксида углерода и водорода.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

