

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **202490876** (13) **A1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ**

(43) Дата публикации заявки
2024.07.08

(51) Int. Cl. **C07C 1/12 (2006.01)**
C01B 3/40 (2006.01)
G05B 13/02 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2022.11.04

(54) **СИСТЕМЫ И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ POWER-TO-X ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА СЫРЬЕ**

(31) **17/300,821**

(32) **2021.11.16**

(33) **US**

(86) **PCT/US2022/000025**

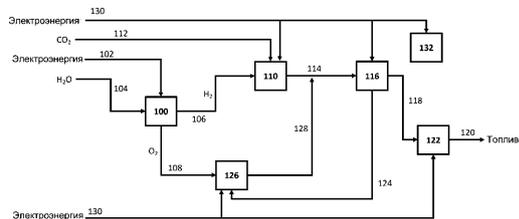
(87) **WO 2023/091165 2023.05.25**

(71) Заявитель:
ИНФИНИУМ ТЕКНОЛОДЖИ, ЛЛС
(US)

(72) Изобретатель:
Шюцле Деннис, Шюцле Роберт,
Гэллоуэй Аня Румплеккер,
МакГиннис Гленн, Маттана Алекс
(US)

(74) Представитель:
Нилова М.И. (RU)

(57) В настоящем изобретении предложены системы и способы управления производством низкоуглеродного жидкого топлива и химических веществ. В одном аспекте в настоящем документе предложен способ управления процессом получения электротоплива. В другом аспекте предложена система для получения электротоплива из совместимых составляющих H₂ и CO₂, при этом H₂ получают посредством электролиза, энергию для которого берут из возобновляемых источников.



202490876
A1

202490876
A1

Системы и способы управления процессом Power-To-X для снижения затрат на сырье

ПЕРЕКРЕСТНАЯ ССЫЛКА НА РОДСТВЕННЫЕ ЗАЯВКИ

Не применимо.

ЗАЯВЛЕНИЕ О СПОНСИРУЕМЫХ ФЕДЕРАЛЬНЫМ ПРАВИТЕЛЬСТВОМ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Не применимо.

НАИМЕНОВАНИЯ СТОРОН ДОГОВОРА О ПРОВЕДЕНИИ СОВМЕСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Не применимо.

ССЫЛКА НА ПЕРЕЧЕНЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ, ТАБЛИЦУ ИЛИ КОМПЬЮТЕРНУЮ ПРОГРАММУ

Не применимо.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

Диоксид углерода получают посредством множества промышленных и биологических процессов. Диоксид углерода обычно выводят в атмосферу. Однако, поскольку диоксид углерода был определен как газ, в значительной степени вызывающий парниковый эффект, необходимо сократить выбросы диоксида углерода в результате использования указанных процессов. Одним из таких промышленных процессов является производство электроэнергии. Электроэнергию все чаще получают из возобновляемых источников, таких как солнечная энергия и энергия ветра, которые не выделяют CO₂ и иногда могут быть произведены более экономически эффективно, чем энергия, производимая из ископаемого топлива.

Однако, несмотря на то, что электроэнергия может быть получена устойчивым образом, сохраняется потребность в топливе и химических веществах, производимых с

низким, нулевым или отрицательным уровнем выбросов CO₂. В некоторых случаях указанная потребность может быть удовлетворена посредством электротоплива (синтетического топлива), производимого путем хранения электрической энергии из возобновляемых источников в химических связях молекул жидкости или газа. Электронное топливо может быть совместимой альтернативой авиационному (например, реактивному) топливу, дизельному топливу, бензину, бутанолу, нефти, синтетическому природному газу или другим топливным продуктам, в противном случае производимым из ископаемого топлива. Кроме того, потенциальные химические вещества, которые могут быть получены с использованием возобновляемых источников энергии, включают аммиак, метанол, а также химические вещества с высокой добавленной стоимостью, такие как формальдегид, уксусная кислота, уксусный альдегид или низшие олефины и ароматические соединения (например, в качестве исходных материалов для тонкого химического производства). Эту категорию процессов производства электротоплива можно назвать «Power to X», что подразумевает, что возобновляемая энергия является основным источником при производстве X, где X представляет собой топливо, химические вещества, природный газ и т.п.

Для производства электронного топлива и химических веществ в дополнение к электрической энергии может быть необходимо сырье. В некоторых случаях указанное сырье может содержать углерод, например, полученный из CO₂, захваченного из других промышленных источников, который в противном случае выводят в атмосферу. В некоторых случаях указанное сырье может содержать азот, полученный из нескольких источников, включая воздухоразделительные установки. Некоторые виды электротоплива или химических веществ могут быть «углерод-отрицательными», т.е. могут потреблять больше CO₂, чем они выделяют в процессе производства. Еще одним сырьем для электротоплива или химического процесса может быть вода, которая может быть электролизована посредством возобновляемой энергии для получения кислорода (O₂) и водорода (H₂).

Производство электротоплива с использованием Power to X использует возобновляемую энергию в качестве основного входа, и, следовательно, указанный вход охватывает большую часть эксплуатационных расходов электростанции, производящей электронное топливо или осуществляющей другой процесс Power to X. Вторичный

расход может представлять собой дополнительное сырье, такое как CO₂, азот или другие исходные материалы.

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

Областью техники настоящего изобретения являются системы и способы получения электротоплива или химических веществ из возобновляемой или низкоуглеродной электроэнергии и способы управления указанными процессами и их оптимизации.

ОПИСАНИЕ УРОВНЯ ТЕХНИКИ

Различные процессы Power-to-X (PtX) основаны на использовании возобновляемой или низкоуглеродной электроэнергии для получения водорода путем электролиза воды. Указанный водород может быть использован непосредственно в качестве конечного энергоносителя или может быть преобразован, например, в метан, синтез-газ, жидкое топливо, электричество или химические вещества. Техническая демонстрация и интеграция систем крайне важны при интеграции PtX в энергетические системы. Более 200 исследовательских и демонстрационных проектов PtX были анонсированы или находятся в стадии реализации.

Некоторые из указанных проектов включают некоторые ограниченные подходы к оптимизации процессов. Schmidt et al (2017) внедрили процессы накопления энергии для содействия балансированию прерывистой и ненадежной подачи электроэнергии при электролизе воды.

Eichman et al (2020) описали оптимизацию интегрированной системы возобновляемого электролизера. Указанная модель оптимизации определила чистую выгоду от объединения оптового и розничного рынков энергии и спроса. Однако указанная модель не учитывает изменчивость стоимости сырья, альтернативные источники водорода, колебания оптовой и розничной стоимости продуктов и рециркуляцию вторичных продуктов (например, хвостовых газов катализатора).

Таким образом, не обеспечены общий контроль и оптимизация подобных сложных систем относительно внешних стимулов, таких как экономика.

СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

В настоящем изобретении описаны системы и способы получения электротоплива или химических веществ, таких как авиационное топливо, дизельное топливо, метанол и аммиак, а также синтеза кислородсодержащего и кислороднесодержащего химического сырья. В настоящем документе отмечена необходимость контроля над указанными системами в ответ на стимул, такой как цена или доступность электроэнергии, цена или доступность CO_2 , азота или другого сырья. В различных аспектах указанная необходимость удовлетворена посредством систем и способов, раскрытых в настоящем документе.

В одном аспекте в настоящем документе предложен способ управления процессом получения электротоплива. Способ может включать подачу первого количества электроэнергии на электролизный модуль для получения H_2 , смешивание H_2 с CO_2 для получения газовой смеси, имеющей первое соотношение H_2 к CO_2 , проведение обратной реакции сдвига фаз вода-газ газовой смеси для получения синтез-газа и каталитическое преобразование синтез-газа с получением жидкого углеводорода. Способ также может включать, в ответ на стимул, подачу второго количества электроэнергии на электролизный модуль для получения H_2 , смешивание H_2 с CO_2 для получения газовой смеси, имеющей второе соотношение H_2 к CO_2 , проведение обратной реакции сдвига фаз вода-газ газовой смеси для получения синтез-газа и проведение реакции синтез-газа с получением жидкого углеводорода. Второе количество электроэнергии представляет собой значение между нулем и значением первого количества электроэнергии. Второе соотношение H_2 к CO_2 по существу сходно с первым соотношением H_2 к CO_2 .

В некоторых вариантах осуществления стимул связан с наличием электроэнергии.

В некоторых вариантах осуществления стимул связан со стоимостью электроэнергии.

В некоторых вариантах осуществления стимул связан с наличием CO_2 .

В некоторых вариантах осуществления стимул связан со стоимостью CO_2 .

В некоторых вариантах осуществления стимул является временным.

В некоторых вариантах осуществления стимул длится в течение периода времени от 0 до 12 часов.

В некоторых вариантах осуществления после стимула первое количество электроэнергии подают на электролизный модуль.

В некоторых вариантах осуществления H_2 забирают из трубопровода в ответ на стимул.

В некоторых вариантах осуществления H_2 получают посредством электролизного модуля и хранят.

В некоторых вариантах осуществления H_2 забирают из хранилища в ответ на стимул.

В некоторых вариантах осуществления H_2 выделяют из потока продукта реакции синтез-газа с получением жидкого углеводорода.

В некоторых вариантах осуществления H_2 выделяют путем адсорбции при переменном давлении.

В некоторых вариантах осуществления второе количество электроэнергии представляет собой количество, составляющее от 0% до 70% от первого количества электроэнергии.

В некоторых вариантах осуществления количество электрической энергии, подаваемое в реактор, выполняющий реакцию сдвига фаз вода-газ, уменьшают на величину, составляющую от 0% до соотношения второго количества электроэнергии к первому количеству электроэнергии.

В некоторых вариантах осуществления скорость потока газовой смеси снижают на величину от 20% до 100%.

В некоторых вариантах осуществления первое и/или второе количество электроэнергии получают из возобновляемых ресурсов.

В некоторых вариантах осуществления жидкий углеводород представляет собой топливо.

В некоторых вариантах осуществления первое соотношение и второе соотношение составляют от 2,0 до 4,0.

В другом аспекте предложена система для получения электротоплива. Система может содержать электролизный модуль, выполненный с возможностью использования электроэнергии для преобразования воды в поток продукта электролиза, содержащий H_2 . Система может содержать модуль обратного сдвига фаз вода-газ, выполненный с возможностью осуществления реакции CO_2 с потоком продукта электролиза с образованием смеси синтез-газа, содержащей CO и H_2 . Система также может содержать датчик, выполненный с возможностью обнаружения стимула, и контроллер, выполненный с возможностью управления модулем выделения водорода в ответ на стимул. Модуль выделения водорода выполнен с возможностью выделения H_2 из смеси синтез-газа для получения (i) потока H_2 , направляемого в модуль обратного сдвига фаз вода-газ, и (ii) смеси синтез-газа, обедненной H_2 . Система также может содержать модуль синтеза углеводородов, выполненный с возможностью преобразования смеси синтез-газа, обедненной H_2 , в жидкий углеводород, и модуль автотермического риформинга (ATR), выполненный с возможностью осуществления реакции O_2 из электролизного модуля с (i) непрореагировавшими реагентами из модуля синтеза углеводородов и (ii) углеводородами, имеющими менее 5 атомов углерода из модуля синтеза углеводородов, для получения потока продукта ATR, выполненного с возможностью его подачи в модуль синтеза углеводородов.

В некоторых вариантах осуществления датчик обнаруживает соотношение H_2 к CO_2 на входе в модуль обратного сдвига фаз вода-газ.

В некоторых вариантах осуществления стимул представляет собой соотношение H_2 к CO_2 на входе в модуль обратного сдвига фаз вода-газ, имеющее значение от 0 до 2,5.

В некоторых вариантах осуществления модуль выделения водорода содержит адсорбер при переменном давлении (PSA).

В некоторых вариантах осуществления модуль выделения водорода не работает при отсутствии стимула.

В некоторых вариантах осуществления, по сравнению с неработающим модулем выделения водорода, работа модуля выделения водорода увеличивает соотношение CO к H_2 , подаваемых в модуль синтеза углеводородов.

В некоторых вариантах осуществления, по сравнению с неработающим модулем выделения водорода, работа модуля выделения водорода увеличивает среднюю

молекулярную массу жидкого углеводорода, получаемого модулем синтеза углеводородов.

Следует понимать, что все комбинации вышеуказанных принципов и дополнительных принципов, более подробно раскрытых ниже (при условии, что подобные принципы не являются взаимно несовместимыми), рассматривают в качестве части объекта изобретения, раскрытого в настоящем документе. В частности, все комбинации объектов настоящего изобретения рассматривают в качестве части объекта изобретения, раскрытого в настоящем документе.

Другие аспекты, примеры и преимущества указанных иллюстративных аспектов и примеров подробно раскрыты ниже. Кроме того, следует понимать, что вышеприведенная информация и нижеследующее подробное описание являются лишь иллюстративными примерами различных аспектов и примеров, и предназначены для предоставления обзора или основы для понимания природы и характера заявляемых аспектов и примеров. Любой пример, раскрытый в настоящем документе, может быть объединен с любым другим примером любым способом, соответствующим по меньшей мере одному из объектов, целей и потребностей, раскрытых в настоящем документе, и ссылки на «пример», «некоторые примеры», «альтернативный пример», «различные примеры», «один пример», «по меньшей мере один пример», «этот и другие примеры» или т.п., не обязательно являются взаимоисключающими и предназначены для указания на то, что конкретный признак, конструкция или характеристика, описанные в контексте примера, могут быть включены по меньшей мере в один пример. Использование подобных терминов в настоящем документе не обязательно во всех случаях относится к одному и тому же примеру.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

На ФИГ. 1 показан пример процесса производства электротоплива из возобновляемой энергии и CO_2 , который может быть замедлен.

На ФИГ. 2 показан пример процесса временной рециркуляции водорода из отходящего потока обратно на вход модуля обратного сдвига фаз вода-газ.

На ФИГ. 3 показан пример процесса выделения и рециркуляции водорода в процессе производства электротоплива, например, при его замедлении.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

По мере того, как возобновляемые источники энергии становятся более экономичными и более широко распространенными, химические процессы, позволяющие хранить солнечную энергию в химических связях (например, электротопливо и электрохимические вещества), такие как описанные в настоящем документе, становятся более привлекательными. Одним из преимуществ возобновляемых источников энергии (например, ветровой и солнечной) является тот факт, что они не потребляют ограниченное количество сырья и могут иметь низкую себестоимость единицы продукции по сравнению с энергией, получаемой из ископаемого топлива. Однако одним из недостатков может быть тот факт, что солнечный свет и ветер не являются постоянными в течение всего года или даже в течение одного дня (т.е. являются переменными). Следовательно, без накопления энергии, добавления невозобновляемой энергии или других конструктивных соображений, описанных в настоящем документе, процесс производства электротоплива или электрохимических веществ иногда должен быть замедлен. Используемый в данном документе термин «замедление» или «замедлен» обычно относится к намеренному снижению производительности производственного процесса.

Однако замедление непрерывных промышленных процессов (например, производящих топливо и химические вещества), как правило, затруднено и требует большого расхода времени. Процессы, в лучшей степени позволяющие периодически снижать их энергопотребление, зачастую в срочном порядке, могут обладать значительными экономическими преимуществами по сравнению с другими процессами, не обладающими подобными возможностями (например, за счет более низкой средней стоимости энергопотребления).

Один такой обеспечивающий преимущество процесс производства топлива и химических веществ описан в настоящем документе и схематически изображен **на ФИГ. 1**. В целом, данный процесс преобразует энергию, CO_2 и воду в топливо и химические вещества. В данном случае электролизер **100** может использовать энергию **102** для

преобразования воды **104** в водород **106** и кислород **108**. Водород может быть подан в модуль **110** обратного сдвига фаз вода-газ для комбинирования с CO_2 **112** с получением синтез-газа **114**, содержащего монооксид углерода (CO) и водород. Синтез-газ может быть введен в реакцию в модуле **116** производства жидкого топлива с получением жидких углеводородов **118**, которые могут быть разделены на топливо и химические продукты **120** в модуле **122** фракционирования. Производительность процесса может быть повышена путем отвода хвостового газа **124** из модуля производства жидкого топлива в модуль **126** автотермического риформинга для осуществления реакции с кислородом **108** с получением дополнительного сырья **128** для модуля производства жидкого топлива.

Система, показанная на **ФИГ. 1**, может быть более легко замедлена по сравнению с конкурирующими процессами производства жидкого топлива и химических веществ, поскольку большая часть общего энергопотребления процесса приходится на энергию **102** для электролизера **100**. Дополнительная энергия **130** может быть подана на вспомогательные системы **132** или модули, отличные от электролизера (например, обратный сдвиг фаз вода-газ, производство жидкого топлива, фракционирование, автотермический риформинг). Однако количество энергии, подаваемое в указанные системы, обычно значительно меньше количества энергии, выделенной для осуществления электролиза. В некоторых случаях электролизер потребляет от 75% до 100% от общего количества энергии, потребляемого процессом.

В некоторых случаях выход процесса поддерживают по возможности на максимально высоком уровне при уменьшении (т.е. замедлении) входа процесса (например, электроэнергии). Процесс может быть замедлен таким образом, что обеспечена возможность быстрого ускорения процесса с минимальным нарушением. Например, реакторы могут поддерживаться на уровне или вблизи уровня производственных температур и давлений. Это справедливо в данном случае, со ссылкой на **ФИГ. 1**, где энергоснабжение может поддерживаться для большей части или всего процесса **130**, за исключением электролизера **102**. В целом, в отношении энергопотребления, процесс может быть замедлен на 10-100%.

Процесс может быть улучшен или модифицирован для поддержания как можно большей производительности на заданном уровне замедления энергопотребления. Например, на **ФИГ. 2** показан модуль **200** выделения водорода, забирающий продукт **114**

в виде синтез-газа из модуля **110** обратного сдвига фаз вода-газ и отделяющий водород. Водород **202** может быть возвращен в модуль обратного сдвига фаз вода-газ для дополнения водорода, подаваемого непосредственно из электролизера **106**.

Модуль **200** выделения водорода может работать в случае замедления процесса с поддержанием подходящего количества водорода, подаваемого в модуль обратного сдвига фаз вода-газ, работающий со стехиометрическим избытком водорода. Процесс может быть замедлен в ответ на стимул. Система может содержать контроллер, выполненный с возможностью управления модулем выделения водорода в ответ на стимул. Модуль выделения водорода выполнен с возможностью выделения H_2 из смеси синтез-газа для получения (i) потока **202** H_2 , направляемого в модуль **110** обратного сдвига фаз вода-газ, и (ii) смеси **204** синтез-газа, обедненной H_2 , которая может быть направлена на производство **116** жидкого топлива.

Работа модуля **200** выделения водорода может изменять продукты **120**, получаемые в ходе процесса. В некоторых случаях увеличивается диапазон молекулярных масс молекул продукта. Это может быть связано с тем, что в модуль **116** производства жидкого топлива подают меньше водорода и относительно большее количество CO , что может способствовать удлинению углеродной цепи, а не ее терминации. Указанное изменение продукта может быть приемлемым компромиссом для повышения общей производительности в период замедления в ответ на стимул, но может быть нежелательным в долгосрочной перспективе (т.е., при отсутствии стимула).

Стимул может представлять собой любой подходящий сигнал. В некоторых случаях стимул связан с наличием электроэнергии и/или стоимостью электроэнергии и/или стоимостью передачи или распределения (T&D) электроэнергии. Стоимость и наличие возобновляемой энергии могут варьироваться, иногда существенно, в течение года или даже в течение одного дня. Стоимость и наличие T&D энергии могут варьироваться, иногда существенно, в течение года или даже в течение одного дня. Например, различные времена года (например, лето в отличие от зимы) или суток (например, день в отличие от ночи) могут обеспечивать производство большего или меньшего среднего количества солнечной энергии, соответственно. Другим источником вариабельности являются изменения погодных условий (например, облака или ветер). Спрос на электроэнергию также является переменным и не всегда долгосрочно

предсказуемым. Указанные колебания спроса могут быть вызваны, например, потребностью в дополнительной мощности в течение дня, когда активно большее число людей, или потребностью в дополнительном кондиционировании воздуха в жаркую погоду. Эти и другие факторы могут способствовать вариабельности наличия или стоимости электроэнергии.

Кроме того, коммунальные предприятия пытаются стимулировать потребителей электроэнергии к использованию меньшего количества энергии в периоды пикового спроса и/или низкого производства для обеспечения возможности управления энергосистемой, в особенности учитывая тот факт, что все большая часть энергосистемы питается от переменных возобновляемых ресурсов. Указанное управление может быть наилучшим образом достигнуто путем стимулирования крупнейших (промышленных) потребителей электроэнергии к избеганию или сокращению использования ими электроэнергии в периоды пиковой нагрузки. Например, программа может взимать с крупного промышленного потребителя меньшую плату за электроэнергию даже в непиковые периоды, если указанный потребитель способен избежать или снизить энергопотребление в периоды пиковой нагрузки.

Указанные периоды пиковой нагрузки могут представлять собой любые соответствующие промежутки времени. Кроме того, коммунальное предприятие может заблаговременно информировать потребителя электроэнергии об указанных периодах пиковой нагрузки в любых соответствующих промежутках времени.

В некоторых случаях стимул связан с наличием CO_2 или другого сырья, такого как азот, для электротопливной станции. Например, процесс, описанный в настоящем документе, может быть совмещен с процессом, который в противном случае выводит CO_2 , и указанный процесс может выполняться с перерывами или сам по себе подлежит замедлению в ответ на событие. В подобном случае дополнительное количество CO_2 может быть добавлено из другого источника, такого как трубопровод, или процесс может быть замедлен согласно настоящему описанию. Стимул также может быть связан со стоимостью CO_2 .

В некоторых случаях стимул представляет собой соотношение H_2 к CO_2 на входе в модуль обратного сдвига фаз вода-газ. В нормальном режиме работы указанное соотношение составляет от 2,0 до 4,0.

Процесс может быть вновь ускорен после стимула. В некоторых случаях после стимула первое количество электроэнергии вновь подают на электролизный модуль.

Водород может быть выделен и рециркулирован в модуль обратного сдвига фаз вода-газ любым подходящим способом. В некоторых случаях водород выделяют с помощью селективной мембраны. Модуль выделения водорода может содержать адсорбер при переменном давлении (PSA).

В некоторых случаях модуль выделения водорода не работает при отсутствии стимула. В некоторых случаях, по сравнению с неработающим модулем выделения водорода, работа модуля выделения водорода увеличивает соотношение CO к H₂, подаваемых в модуль синтеза углеводородов. По сравнению с неработающим модулем выделения водорода, работа модуля выделения водорода может увеличивать среднюю молекулярную массу жидкого углеводорода, получаемого модулем синтеза углеводородов.

Стимул может быть временным. Стимул может длиться в течение любого соответствующего промежутка времени.

Периодами замедления процесса также можно управлять путем добавления водорода из другого источника (т.е. для восполнения уменьшенного количества водорода, производимого электролизером). Например, водород может быть временно приобретен из другого (внешнего) источника, такого как трубопровод. Избыток водорода также может быть получен и сохранен электролизером во время периодов избыточной мощности для последующего использования в случае замедления процесса в ответ на стимул.

На ФИГ. 3 показана другая система регулирования водорода (например, во время замедления процесса). В одном аспекте раскрыта система для производства электротоплива. Система может содержать электролизный модуль, выполненный с возможностью использования электроэнергии для преобразования воды в поток продукта электролиза, содержащий H₂. Система также может содержать модуль обратного сдвига фаз вода-газ, выполненный с возможностью осуществления реакции CO₂ с потоком продукта электролиза с образованием смеси синтез-газа, содержащей CO и H₂. Система также может содержать модуль синтеза углеводородов, выполненный с возможностью преобразования смеси синтез-газа в жидкий углеводород. Система также может содержать модуль выделения водорода, выполненный с возможностью выделения H₂ из

модуля синтеза углеводородов и подачи указанного H_2 в модуль обратного сдвига фаз вода-газ. Система также может содержать модуль автотермического риформинга (ATR), выполненный с возможностью осуществления реакции O_2 из электролизного модуля с (i) непрореагировавшими реагентами из модуля синтеза углеводородов и/или модуля выделения водорода, и (ii) углеводородами, имеющими менее 5 атомов углерода из модуля синтеза углеводородов и/или модуля выделения водорода, для получения потока продукта ATR, выполненного с возможностью его подачи в модуль синтеза углеводородов.

Согласно **ФИГ. 3**, водород в хвостовом газе **124** может быть выделен в модуле **300** выделения водорода для получения (i) потока **302** H_2 , направляемого в модуль **110** обратного сдвига фаз вода-газ, и (ii) смеси хвостовых газов **304**, обедненной H_2 , которая может быть направлена в модуль **126** автотермического риформинга. Водород может быть выделен и рециркулирован в модуль обратного сдвига фаз вода-газ любым подходящим способом. В некоторых случаях водород выделяют с помощью селективной мембраны. Модуль выделения водорода может содержать адсорбер при переменном давлении (PSA).

В другом аспекте в настоящем документе предложен способ управления процессом получения электротоплива. Способ может включать подачу первого количества электроэнергии на электролизный модуль для получения H_2 , смешивание H_2 с CO_2 для получения газовой смеси, имеющей первое соотношение H_2 к CO_2 , проведение обратной реакции сдвига фаз вода-газ газовой смеси для получения синтез-газа и обеспечение реакции синтез-газа с получением жидкого углеводорода. Способ также может включать, в ответ на стимул, подачу второго количества электроэнергии на электролизный модуль для получения H_2 , смешивание H_2 с CO_2 для получения газовой смеси, имеющей второе соотношение H_2 к CO_2 , проведение обратной реакции сдвига фаз вода-газ газовой смеси для получения синтез-газа и проведение реакции синтез-газа с получением жидкого углеводорода. Второе количество электроэнергии представляет собой значение между нулем и значением первого количества электроэнергии. Второе соотношение H_2 к CO_2 по существу сходно с первым соотношением H_2 к CO_2 .

Второе количество электроэнергии может представлять собой любую подходящую долю первого количества электроэнергии (т.е. величину замедления процесса в

отношении потребления электроэнергии). Второе количество электроэнергии может представлять собой количество, составляющее от 0% до 70% от первого количества электроэнергии. После стимула первое количество электроэнергии может быть подано на электролизный модуль (т.е. процесс может быть вновь ускорен).

В некоторых вариантах осуществления уменьшают скорость потока газовой смеси (т.е. H_2 с CO_2) (т.е. процесс замедляют в отношении потребления реагентов). Скорость потока газовой смеси может представлять собой значение, составляющее от 0% до 70% от скорости потока газовой смеси при полной производительности процесса. В некоторых случаях скорость потока газовой смеси представляет собой значение, составляющее от 0% до 70% от скорости потока газовой смеси при полной производительности процесса.

Первое соотношение и/или второе соотношение H_2 к CO_2 может составлять от 2,0 до 4,0; предпочтительно от 2,5 до 3,5; а еще более предпочтительно от 2,8 до 3,2.

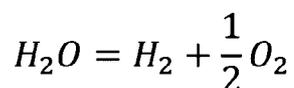
Второе соотношение H_2 к CO_2 по существу сходно с первым соотношением H_2 к CO_2 . В некоторых случаях первое и второе соотношения отличны не более чем на 40%; предпочтительно не более чем на 15%; а еще более предпочтительно не более чем на 3%.

В некоторых вариантах осуществления H_2 забирают из трубопровода в ответ на стимул. В некоторых вариантах осуществления H_2 получают посредством электролизного модуля и хранят. В некоторых вариантах осуществления H_2 забирают из хранилища в ответ на стимул. В некоторых вариантах осуществления H_2 выделяют из потока продукта реакции синтез-газа с получением жидкого углеводорода. В некоторых вариантах осуществления H_2 выделяют путем адсорбции при переменном давлении. В некоторых вариантах осуществления количество электрической энергии, подаваемое в реактор, выполняющий реакцию обратного сдвига фаз вода-газ, уменьшают на величину, составляющую от 0% до значения соотношения второго количества электроэнергии к первому количеству электроэнергии.

Диоксид углерода может быть получен из нескольких источников. Промышленные производственные предприятия, получающие аммиак для удобрений, производят большое количество диоксида углерода. Заводы по производству этанола, перерабатывающие кукурузу или пшеницу в этанол, производят большое количество диоксида углерода. Электростанции, вырабатывающие электроэнергию из различных ресурсов (например, природного газа, угля и других ресурсов), производят большое количество диоксида

углерода. Химические заводы, такие как заводы по производству нейлона, заводы по производству этилена и другие химические заводы, производят большое количество диоксида углерода. Некоторые газоперерабатывающие заводы производят CO₂ в качестве части процесса очистки природного газа для обеспечения соответствия спецификациям трубопровода. Улавливание CO₂ для использования в соответствии с настоящим описанием зачастую включает отделение диоксида углерода от потока дымовых газов или другого потока, в котором диоксид углерода не является основным компонентом. Некоторые источники CO₂ уже являются относительно чистыми и могут быть использованы лишь с незначительной обработкой (которая может включать сжатие газа) в процессах, описанных в настоящем документе. Для осуществления некоторых процессов может быть необходим алкиламин или другой процесс, который может быть использован для удаления диоксида углерода из потока дымовых газов. Алкиламины, применяемые в указанном процессе, включают моноэтаноламин, диэтаноламин, метилдиэтаноламин, диизопропиламин, аминоэтоксиэтанол или их комбинации. Материалы с металлоорганической каркасной структурой (MOF) также применяют в качестве средств отделения диоксида углерода от разбавленного потока посредством хемосорбции или физической сорбции для улавливания диоксида углерода из потока. Другие способы получения концентрированного диоксида углерода включают горение с химическим циклом, при котором циркулирующий оксид металла улавливает диоксид углерода, образующийся в процессе горения. Диоксид углерода также можно улавливать из атмосферы при так называемом прямом захвате диоксида углерода из воздуха (DAC).

Возобновляемые источники водорода (H₂) могут быть получены из воды путем электролиза.



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

Однако каждый технологический способ электролиза имеет теоретическую минимальную потребляемую электроэнергию 39,4 кВт*ч/кг H₂ (высшая теплотворная

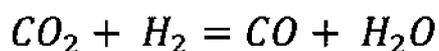
способность водорода) при подаче воды в систему при давлении и температуре окружающей среды и использовании электроэнергии в качестве всего входа энергии. Требуемый вход электроэнергии может быть снижен до значений ниже 39,4 кВт*ч/кг H₂ в случае подачи в систему подходящей тепловой энергии. Помимо электролиза, важные текущие исследования посвящены изучению способов расщепления воды на водород и кислород с использованием энергии света и фотокатализатора.

Могут быть использованы различные конструкции электролизеров, в которых применяют различные технологии электролиза, включая щелочной электролиз, мембранный электролиз, мембрану из полимерного электролита (PEM), электролиз твердых оксидов (SOE) и высокотемпературный электролиз. Щелочной электролиз коммерчески подходит для работы в более крупном масштабе, >1 МВт. Могут быть использованы различные электролиты, включая жидкие КОН и NaOH с активирующими соединениями или без них. В электролит могут быть добавлены активирующие соединения для повышения стабильности электролита. Большинство ионных активаторов реакции выделения водорода состоят из хлоридного комплекса металла на основе этилендиамина (en) ([M(en)₃]Cl_x, M1/4Co, Ni и др.) и Na₂MoO₄ или Na₂WO₄. На электродах могут быть применены различные электрокатализаторы, включая множество различных комбинаций металлов и оксидов, таких как сплав никеля Ренея и алюминия, которые могут быть усилены путем добавки в сплав кобальта или молибдена. Несколько комбинаций переходных металлов, такие как Pt₂Mo, Hf₂Fe и TiPt, были применены в качестве материалов катода и продемонстрировали значительно более высокую электрокаталитическую активность по сравнению с электродами, известными из уровня техники.

Вода на катоде связывается с электронами из внешней цепи с образованием газообразного водорода и отрицательно заряженных ионов кислорода. Ионы кислорода проходят через твердую керамическую мембрану и реагируют на аноде с образованием газообразного кислорода и выработкой электронов для внешней цепи. Таким образом, в электролизере образуются газообразный водород и газообразный кислород. В одном варианте осуществления несколько электролизеров работают параллельно. Ни один электролизер не работает со 100%-ной энергетической эффективностью, и энергопотребление имеет решающее значение для экономической

работы предприятия. Энергопотребление в электролизере должно составлять от 0 до 200 мегаватт-часов (МВт-ч) на метрическую тонну (МТ) получаемого H₂; предпочтительно от 0 до 120 МВт-ч на МТ H₂; а еще более предпочтительно от 0 до 60 МВт-ч на МТ H₂. В варианте осуществления со щелочным электролизером потребление электроэнергии составляет более 39,4 МВт-ч на МТ получаемого H₂. Однако в варианте осуществления с высокотемпературным электролизером потребление электроэнергии потенциально может составлять от 0 до 39,4 МВт-ч на МТ H₂ при использовании отработанного тепла для нагревания электролизера выше температуры окружающей среды.

Как описано в настоящем документе, реакция обратного сдвига фаз вода-газ (RWGS) может быть использована для получения сингаза по формуле:



В ходе данной реакции происходит преобразование диоксида углерода и водорода в монооксид углерода и воду. При комнатной температуре данная реакция является эндотермической, и для ее протекания необходимо тепло, а для значительного преобразования диоксида углерода необходимы повышенная температура и хороший катализатор.

Смешивают водород и диоксид углерода. Соотношение H₂ к CO₂ может составлять от 2,0 моль/моль до 4,0 моль/моль, в некоторых случаях от 3,0 до 4,0 моль/моль. Смешанное сырье RWGS может быть нагрето посредством опосредованного теплообмена до температуры более 900°F. Указанное начальное повышение температуры может быть осуществлено без применения прямого сжигания углеродосодержащего газа для обеспечения тепла. Это означало бы, что происходит образование диоксида углерода, что потенциально могло бы нейтрализовывать эффект преобразования диоксида углерода в полезные виды топлива и химических веществ.

Сырьевой газ RWGS, содержащий смесь водорода и диоксида углерода, может быть нагрет до температуры на входе. Температура на входе может представлять собой любую подходящую температуру для проведения реакции RWGS. В некоторых случаях температура сырья RWGS на входе составляет от 900°F до 1800°F.

Сырьевой газ RWGS может быть нагрет по меньшей мере частично в устройстве для предварительного нагрева вне основного корпуса реактора для получения нагретого

сырьевого газа. Устройство для предварительного нагрева может быть нагрето посредством электроэнергии и повышает температуру сырьевого газа за счет опосредованного теплообмена.

Существует множество способов осуществления электрического нагрева сырьевого газа. Одним из способов является электрический нагрев в радиационной печи с электрическим нагревом. В некоторых вариантах осуществления по меньшей мере часть сырьевого газа проходит через нагревательный змеевик в печи. В печи нагревательный змеевик окружен излучающими электрическими нагревательными элементами или газ пропускают непосредственно поверх нагревательных элементов, в результате чего газ нагревается за счет конвективной теплопередачи. Электрические нагревательные элементы могут быть выполнены из большого множества материалов. Нагревательные элементы могут быть выполнены из сплавов никеля и хрома. Указанные элементы могут быть выполнены в виде скрученных полос или проволок или отлиты в виде зигзагообразных структур. Указанные элементы обычно защищены изолированной стальной оболочкой, а для изоляции обычно используют керамическое волокно. Для обеспечения контролируемого режима нагрева излучающие элементы могут быть разделены на зоны. Для подачи тепла к сырьевому газу и получения нагретого сырьевого газа может требоваться несколько змеевиков и несколько зон. Для обеспечения подходящей видимости и эффективного теплообмена радиационные печи должны иметь надлежащую конструкцию нагревательных элементов и жидкостных змеевиков. Радиационная печь должна потреблять как можно меньше электроэнергии. Потребление электроэнергии излучающей печью составляет от 0 до 0,5 МВт-ч (мегаватт-час) электроэнергии на метрическую тонну (MT) CO₂ в сырьевом газе; предпочтительно от 0 до 0,40 МВт-ч на MT CO₂; а еще более предпочтительно от 0 до 0,20 МВт-ч на MT CO₂.

Затем поток нагретого сырьевого газа RWGS может быть подан в основной корпус реактора RWGS. Существует по меньшей мере два возможных варианта осуществления основного корпуса реактора RWGS. В некоторых вариантах осуществления основной корпус реактора RWGS является адиабатическим или почти адиабатическим и выполнен с возможностью минимизации потерь тепла, но в основной корпус реактора не подают дополнительное тепло, а температура в основном корпусе реактора снижается от входа к выходу реактора. В некоторых вариантах осуществления основной корпус реактора

RWGS имеет сходную конструкцию, но в корпус подают дополнительное тепло для поддержания изотермического или близкого к изотермическому температурного профиля в корпусе. Основным корпусом реактора RWGS может представлять собой реактор, длина которого превышает его диаметр. Вход в основной корпус реактора может быть меньше общего диаметра корпуса. Основным корпусом реактора может представлять собой стальной корпус. Стальной корпус может иметь внутреннюю изоляцию для ограничения потерь тепла. Для ограничения потерь тепла в окружающую среду могут быть использованы различные виды изоляции, в том числе литая или литевая огнеупорная футеровка или изоляционные кирпичи.

Слой катализатора может находиться внутри основного корпуса реактора RWGS. Катализатор может быть выполнен в виде гранул, окатышей, сфер, трехлепестковой формы, четырехлепестковой формы, монолитной формы или любой другой специально разработанной формы, предназначенной для минимизации падения давления во всем реакторе. В некоторых случаях форму и размер частиц катализатора регулируют таким образом, что падение давления в реакторе составляет от 0 до 100 фунтов на квадратный дюйм (psi) (345 кПа), а предпочтительно от 0 до 20 psi. Размер формы катализатора может представлять собой характерный размер от 1 мм до 10 мм. Частица катализатора может представлять собой структурированный материал, представляющий собой пористый материал с площадью внутренней поверхности более 40 м²/г, в некоторых случаях более 80 м²/г, а в некоторых случаях - с площадью поверхности 100 м²/г.

Катализатор RWGS может представлять собой высокоэффективный твердорастворный катализатор, обладающий высокой универсальностью и эффективно осуществляющий реакцию RWGS. Надежный твердорастворный катализатор на основе переходных металлов может обладать высокой термической стабильностью до 1100°C, не образует углерода (не закоксуывается) и обладает хорошей устойчивостью к загрязнениям, которые могут присутствовать в захваченных потоках CO₂. Указанный катализатор может проявлять высокую активность при низких концентрациях переходных металлов (5-20 мас. %) по сравнению с другими катализаторами, требующими по меньшей мере 30 мас. % переходных металлов. Кроме того, нет необходимости в использовании дорогих драгоценных металлов для улучшения рабочих характеристик катализатора. Процесс получения катализатора RWGS может приводить к получению катализатора,

образующего твердорастворную фазу, биметаллическую кристаллическую фазу, что приводит к небольшой сегрегации металлических фаз или отсутствию указанной сегрегации. Указанная химическая структура может обеспечить повышенную устойчивость к закоксуыванию по сравнению с известными катализаторами на металлическом носителе. Это также может привести к повышенной устойчивости к ядам, таким как сера и аммиак. Кроме того, указанный катализатор может иметь повышенную каталитическую активность при меньшей площади поверхности по сравнению с монометаллической сегрегированной фазой катализатора, например, Ni на оксиде алюминия. В некоторых случаях указанный катализатор не требует промотирования щелочью, необходимого для ограничения отложений углерода.

В некоторых случаях давление на этапе RWGS и давление на этапе синтеза углеводородов или получения жидкого топлива (LFP) находятся в пределах 200 psi друг от друга, в некоторых случаях в пределах 100 psi друг от друга, а в некоторых случаях в пределах 50 psi друг от друга. Осуществление указанных двух процессов при давлениях, близких друг к другу, ограничивает требуемое сжатие потока синтез-газа.

Преобразование диоксида углерода в монооксид углерода за один цикл в основном корпусе реактора RWGS может составлять от 60 до 90 моль%, а в некоторых случаях от 70 до 85 моль%. При использовании адиабатического реактора температура в основном корпусе реактора RWGS может снижаться от входа к выходу. Температура на выходе основного корпуса реактора RWGS может быть на 100-200°F ниже температуры на входе основного корпуса реактора, а в некоторых случаях на 105-160°F ниже температуры на входе основного корпуса реактора. Среднечасовая скорость подачи сырья RWGS (WHSV), представляющая собой весовую скорость потока реагентов RWGS (H_2+CO_2) за один час, деленная на вес катализатора в основном слое реактора RWGS, может составлять от 1000 до 50000 час⁻¹, а в некоторых случаях от 5000 до 30000 час⁻¹.

Газ, выходящий из основного корпуса реактора RWGS, представляет собой поток газообразного продукта RWGS. Газообразный продукт RWGS содержит монооксид углерода (CO), водород (H₂), непрореагировавший диоксид углерода (CO₂) и воду (H₂O). Кроме того, газообразный продукт RWGS может также содержать небольшое количество метана (CH₄), образованного в основном корпусе реактора в результате побочной реакции.

На данной стадии процесса газообразный продукт RWGS может быть использован различным образом. Газообразный продукт может быть охлажден и сжат, а затем использован в последующем процессе для получения топлива и химических веществ. Газообразный продукт RWGS также может быть охлажден, сжат и направлен обратно в устройство для предварительного нагрева, и подан обратно в основной корпус реактора. Газообразный продукт RWGS также может быть повторно нагрет во втором электрическом устройстве для предварительного нагрева и направлен во второй корпус реактора, где может происходить дополнительное преобразование CO_2 в CO .

При использовании CO (монооксида углерода), полученного в результате реакции RWGS, и водорода, полученного в результате электролиза воды, существует потенциал для получения полезных продуктов посредством каталитического гидрирования монооксида углерода с получением углеводородов. Смеси H_2 и CO называют синтез-газом или сингазом. Сингаз можно применять в качестве сырья для производства широкого спектра химических продуктов, включая жидкое топливо, спирты, уксусную кислоту, диметиловый эфир, метанол, аммиак и многие другие химические продукты.

Каталитическое гидрирование монооксида углерода с получением легких газов, жидкостей и парафинов, от метана до тяжелых углеводородов (C_{100} и выше) в дополнение к оксигенированным углеводородам, обычно относится к синтезу Фишера-Тропша (или F-T). Традиционные низкотемпературные ($< 250^\circ\text{C}$) способы F-T приводят главным образом к получению высокомолекулярного парафина F-T (C_{25} или выше) в процессе каталитической конверсии. Указанные парафины F-T затем подвергают гидрокрекингу и/или дополнительной переработке с получением дизельного топлива, нефти и других фракций. В ходе указанного процесса гидрокрекинга также образуются легкие углеводороды, которые могут требовать дополнительной переработки для получения подходящих для применения продуктов. Катализаторы, обычно применяемые для синтеза F-T, представляют собой катализаторы на основе кобальта (Co) или на основе железа (Fe), которые также активны при реакции сдвига фаз вода-газ (WGS), приводящей к преобразованию сырьевого монооксида углерода в диоксид углерода.

В дополнение к F-T может быть использован модуль получения жидкого топлива (LFP), описанный в настоящем документе. Реактор LFP превращает CO и H_2 в длинноцепочечные углеводороды, которые могут быть использованы в качестве жидкого

топлива и химических продуктов. В данном реакторе может быть использован катализатор для получения углеводородов, пригодных для использования в качестве жидкого топлива, из синтез-газа. Синтез-газ, полученный в результате охлаждения и конденсации синтез-газа, может быть смешан с хвостовым газом для получения сырья реактора LFP. Сырье реактора LFP содержит водород и монооксид углерода. В идеальном варианте соотношение водорода к монооксиду углерода в потоке составляет от 1,9 до 2,2 моль/моль. Реактор LFP может представлять собой многотрубчатую реакторную систему с неподвижным слоем. Каждая труба реактора LFP может иметь диаметр от 13 мм до 26 мм. Длина трубы реактора обычно превышает 6 метров и в некоторых случаях превышает 10 метров. Реакторы LFP обычно ориентированы вертикально, при этом сырье поступает в верхнюю часть реактора LFP. Тем не менее, в некоторых случаях возможна горизонтальная ориентация реактора, а также в некоторых случаях, когда существуют ограничения по высоте, может быть выгодна установка реактора под углом.

Большая часть длины трубы реактора LFP может быть заполнена катализатором LFP. Катализатор LFP также может быть смешан с разбавителем, таким как диоксид кремния или оксид алюминия, для облегчения распределения сырья, поступающего в реактор LFP, в трубе реактора LFP и продвижения через нее. Химическая реакция, происходящая в реакторе LFP, приводит к образованию газообразного продукта LFP, состоящего из большинства углеводородных продуктов длиной от пяти до двадцати четырех атомов углерода (C₅-C₂₄ углеводороды), а также воды, но некоторые углеводороды находятся за пределами указанного диапазона. Реактор LFP обычно не производит значительного количества диоксида углерода. Количество от 0% до 2% монооксида углерода в сырье, поступающем в реактор LFP, обычно преобразуют в диоксид углерода в реакторе LFP. Лишь ограниченное количество монооксида углерода в сырье, поступающем в реактор LFP, преобразуют в углеводороды с числом атомов углерода больше 24. Количество от 0% до 25% углеводородной фракции продукта LFP имеет число атомов углерода более 24. В некоторых случаях от 0 до 10 мас.% углеводородной фракции продукта LFP имеет число атомов углерода более 24; а предпочтительно от 0 до 4 мас.% углеводородной фракции продукта LFP имеет число

атомов углерода более 24; а еще более предпочтительно от 0 до 1 мас.% углеводородной фракции продукта LFP имеет число атомов углерода более 24.

Как рассмотрено выше, в результате осуществления процесса Фишера-Тропша (F-T) обычно получают углеводородные продукты длиной от 1 до 125 атомов углерода. Катализатор LFP, описанный в настоящем документе, не производит тяжелых углеводородов с таким же выходом, как другие катализаторы, применяемые в процессе F-T. В некоторых вариантах осуществления катализатор LFP обладает незначительной активностью в отношении преобразования монооксида углерода в диоксид углерода посредством реакции сдвига фаз вода-газ. В некоторых вариантах осуществления преобразование монооксида углерода в диоксид углерода посредством реакции сдвига фаз вода-газ составляет от 0% до 5% монооксида углерода в сырье. В некоторых вариантах осуществления катализатор LFP содержит кобальт в качестве активного металла. В некоторых вариантах осуществления катализатор LFP содержит железо в качестве активного металла. В некоторых вариантах осуществления катализатор LFP содержит комбинации железа и кобальта в качестве активного металла. Катализатор LFP может быть нанесен на подложку из оксида металла, который выбран из группы, состоящей из оксида алюминия, диоксида кремния, диоксида титана, активированного угля, углеродных нанотрубок, цеолитов или других материалов подложек с подходящим размером, формой, диаметром пор, площадью поверхности, прочностью на раздавливание, эффективным радиусом гранул, или их смесей. Катализатор может иметь различную форму различных лепестковых подложек с тремя, четырьмя или пятью лепестками, при этом два или более лепестков длиннее двух других более коротких лепестков, и оба более длинных лепестка являются симметричными. Расстояние от срединной точки подложки или срединной точки каждого лепестка называется эффективным радиусом гранулы, который может способствовать достижению желаемой селективности по C₅-C₂₄ углеводородам. Промоторы катализатора LFP могут включать один из следующих материалов: никель, церий, лантан, платину, рутений, рений, золото или родий. Промоторы катализатора LFP составляют от 0 до 1 мас.% от общего количества катализатора, предпочтительно от 0 до 0,5 мас.%, а более предпочтительно от 0 до 0,1 мас.%.

Подложка катализатора LFP может иметь диаметр пор более 8 нанометров (нм), средний эффективный радиус гранул от 0 до 600 микрон, прочность на раздавливание

более 3 фунтов/мм и удельную поверхность по БЭТ более 100 м²/г. Катализатор после пропитки металлом может иметь дисперсность металла 4%. Несколько типов подложек могут максимально увеличить выход углеводородов C₅-C₂₄. К ним могут относиться комбинации оксида алюминия/диоксида кремния, активированный уголь, оксид алюминия, углеродные нанотрубки и/или подложки на основе цеолитов.

Реактор LFP с неподвижным слоем может работать таким образом, что максимально увеличен выход углеводородов C₅-C₂₄. Реактор LFP может работать при давлении от 150 до 450 psi. Реактор может работать в диапазоне температур от 350 до 460°F и чаще при температуре примерно 410°F. Реакция является экзотермической. Температуру реактора внутри труб реактора LFP поддерживают за счет помещения набора труб реактора в теплообменник, в котором снаружи труб реактора LFP присутствует кипящий пар. Температура пара является более низкой по сравнению с температурой реакции LFP, таким образом, тепло передают от трубы реактора LFP к пару с более низкой температурой. Температуру пара могут поддерживать за счет поддержания давления пара. Как правило, пар представляет собой насыщенный пар. В некоторых вариантах осуществления каталитический реактор может представлять собой суспензионный реактор, микроканальный реактор, реактор с псевдооживленным слоем или другие типы реакторов, известные из уровня техники.

Преобразование CO в реакторе LFP могут поддерживать на уровне от 30 до 80 моль% CO за проход. CO могут использовать повторно для дополнительного преобразования или могут подавать в последующий дополнительный реактор LFP. Селективность по углероду в отношении CO₂ может быть минимизирована до значений от 0 до 4% от преобразованного CO и более предпочтительно от 0 до 1%. Селективность по углероду в отношении углеводородов C₅-C₂₄ может составлять от 60 до 90%. Газообразный продукт реактора LFP содержит желаемые углеводороды C₅-C₂₄, конденсированные в виде жидкого топлива и воды, а также непрореагировавший монооксид углерода, водород, небольшое количество углеводородов C₁-C₄ и небольшое количество углеводородов C₂₄+. Желаемый продукт может быть отделен от потока путем охлаждения, конденсации продукта и/или дистилляции, или любым другим приемлемым образом. Непрореагировавший монооксид углерода, водород и углеводороды C₁-C₄ могут быть частью сырья, подаваемого в модуль автотермического риформинга (ATR).

В модуле автотермического риформинга (ATR) углеводородное сырье ATR содержит монооксид углерода, водород и углеводороды C₁-C₄. Автотермический риформинг природного газа, который преимущественно представляет собой метан (C₁), в монооксид углерода и водород.

В некоторых вариантах осуществления углеводородное сырье ATR содержит непрореагировавший монооксид углерода, водород и углеводороды C₁-C₄. В некоторых случаях сырье также содержит природный газ. Природный газ содержит метан и может содержать легкие углеводороды, а также диоксид углерода. В некоторых вариантах осуществления получаемые топливо и химические вещества могут не быть безуглеродными топливами, но в любом случае будут иметь улучшенную углеродоемкость по сравнению с традиционными топливами и химическими веществами. Сырье ATR может быть преобразовано в синтез-газ (включая большой процент водорода). Это может позволить уменьшить количество воды, подлежащей электролизу для получения водорода, и уменьшить размер электролизера. Это может быть более экономичным при производстве низкоуглеродных видов топлива и химических веществ. В углеводородном сырье ATR соотношение природного газа к непрореагировавшему монооксиду углерода, водороду и углеводородам C₁-C₄ может составлять от 0 кг/кг до 2,0 кг/кг, а более предпочтительно от 0 кг/кг до 1,25 кг/кг.

Автотермический риформинг может обеспечивать получение продукта с высоким содержанием монооксида углерода. Диоксид углерода в газообразном продукте может составлять от 0 мол.% до 10 мол.%. Окислительное сырье ATR может содержать пар и кислород, причем кислород получают путем электролиза воды. Окислительное сырье ATR и углеводородное сырье ATR могут быть предварительно нагреты, а затем подвергнуты реакции в горелке ATR, в которой окислитель и углеводород частично окисляют при температурах в горелке выше 2000°C. Реактор ATR может быть разделен на несколько зон. Зона горения (или горелка) представляет собой зону, в которой по меньшей мере часть углеводородного сырья ATR полностью сгорает с получением воды и диоксида углерода. Термическая зона представляет собой зону, в которой осуществляют термические реакции. В термической зоне дальнейшее преобразование осуществляют за счет гомогенных газофазных реакций. Указанные реакции могут быть более медленными реакциями, чем реакции горения, такие как реакции окисления CO и реакции пиролиза с

использованием высших углеводов. Основными реакциями в термической зоне могут быть гомогенный газофазный паровой риформинг углеводов и реакция сдвига фаз. В каталитической зоне завершающее преобразование углеводов происходит посредством гетерогенных каталитических реакций, включая риформинг метана паром и реакцию сдвига фаз вода-газ. Полученный газообразный продукт ATR может иметь состав, близкий к прогнозируемому термодинамически равновесному составу. Фактический состав газообразного продукта ATR может быть таким же, как и термодинамически равновесный состав, с разницей от 0°C до 70°C. Это представляет собой так называемую температуру, близкую к равновесию. Чтобы свести к минимуму количество CO₂, образующегося в ходе ATR, количество пара в окислительном сырье ATR может поддерживаться на как можно более низком уровне. Это в любом случае может привести к получению газообразного продукта ATR с низким содержанием сажи, состав которого близок к прогнозируемому равновесному составу. Как правило, общее соотношение пара к углероду (моль/моль) в смеси сырья ATR (окислитель + углеводород) может составлять от 0,4 до 1,0, причем оптимальное значение составляет примерно 0,6. По мере увеличения соотношения пара к углероду в сырье ATR соотношение H₂/CO в синтез-газе увеличивается. Количество диоксида углерода также увеличивается. В некоторых вариантах осуществления изменение или корректировка соотношения пара к углероду может быть полезной для контроля общего количества производимого водорода на предприятии.

Продукт ATR может покидать каталитическую зону ATR при температуре более 800°C. Продукт ATR может быть охлажден до более низких температур в утилизационном паровом котле, в котором тепло передают для получения пара. Указанный пар, а также пар более низкого давления, производимый реактором LFP, может быть использован для выработки электроэнергии.

Подходящие катализаторы ATR для реакций в каталитической зоне обычно представляют собой катализаторы на основе никеля. Инновационный твердорастворный катализатор, описанный в настоящем документе, может быть применен в качестве катализатора ATR. Другие подходящие катализаторы ATR представляют собой никель на альфа-фазе оксида алюминия или магний-алюминиевой шпинели (MgAl₂O₄) с промоторами из драгоценных металлов или без них. Промотор из драгоценных металлов

может содержать золото, платину, рений или рутений. Шпинели могут иметь более высокую температуру плавления, более высокую термическую прочность, и стабильность, чем катализаторы на основе оксида алюминия.

Продукт ATR может быть смешан с продуктом RWGS и использован в качестве сырья реактора LFP. Это может привести к высокой степени преобразования исходного диоксида углерода в углеводородные продукты C₅-C₂₄.

В некоторых вариантах осуществления газообразный продукт LFP не подходит для прямой подачи в модуль ATR и должен быть подвергнут предварительному риформингу. В указанных случаях газообразный продукт LFP, содержащий непрореагировавший монооксид углерода, водород, углеводороды C₁-C₄ и CO₂, представляет собой углеводородный сырьевой газ для модуля предварительного риформинга. Высшие углеводороды и оксиды углерода в потоке могут требовать использования модуля предварительного риформинга вместо прямого использования в качестве углеводородного сырья ATR. Модуль предварительного риформинга обычно представляет собой адиабатический реактор. Адиабатический модуль предварительного риформинга преобразует высшие углеводороды в сырье для предварительного риформинга в смесь метана, водяного пара, оксидов углерода и водорода, которые затем пригодны для использования в качестве углеводородного сырья ATR. Одним из преимуществ использования модуля предварительного риформинга является тот факт, что оно обеспечивает более высокий предварительный нагрев углеводородного сырья ATR, что может уменьшить количество кислорода, используемого в процессе ATR. В результате, вышеописанный интегрированный способ приводит к обеспечению высокой степени преобразования диоксида углерода в углеводородные продукты C₅-C₂₄, пригодные для использования в качестве топлива или химических веществ.

В некоторых вариантах осуществления процесс автотермического риформинга (ATR) позволяет преобразовывать хвостовой газ (и, потенциально, другое углеводородное сырье) с этапа производства топлива/химических веществ и водород с процессов электролиза в дополнительный синтез-газ. В некоторых вариантах осуществления возможно применение тепловой энергии с процесса ATR для обеспечения работы катализатора (CO₂) RWGS (гидрирования). В некоторых вариантах осуществления возможно отделение и преобразование CO₂ с процесса ATR в дополнительный синтез-газ

с использованием катализатора гидрирования CO₂. В некоторых вариантах осуществления катализатор, реактор и процесс RWGS преобразуют CO₂ и водород в синтез-газ, причем указанную операцию RWGS осуществляют при давлении, близком к давлению в процессе получения топлива/химических веществ, в ходе которого синтез-газ преобразуют в топливо или химические вещества. В некоторых случаях указанные виды топлива или химических веществ представляют собой жидкие парафиновые или олефиновые углеводороды, большинство из которых находится в диапазоне C₅-C₂₄.

В системах и способах, описанных в настоящем документе, может быть использован датчик. Датчик может представлять собой датчик скорости потока, датчик, определяющий химический состав технологического потока, датчик температуры, датчик давления или датчик, связанный со стоимостью или наличием входного сырья процесса, такого как CO₂ или электроэнергия.

В одном аспекте системы и способы, описанные в настоящем документе, эффективно захватывают и используют диоксид углерода, и преобразуют его в полезные продукты, такие как топливо (например, дизельное топливо, бензин, компоненты смешения бензинов, топливо для реактивных двигателей, керосин и т.д.) и химические вещества (например, растворители, олефины, спирты, ароматические соединения, смазочные материалы, парафины, аммиак, метанол и т.д.), которые могут заменить топливо и химические вещества, получаемые из ископаемых источников, таких как нефть и природный газ. Это может снизить общее количество выбросов диоксида углерода в атмосферу. Безуглеродные, низкоуглеродные и сверхнизкоуглеродные виды топлива и химических веществ позволяют обеспечить минимальное количество сжигаемого в процессе ископаемого топлива. В некоторых случаях любой нагрев сырья для интегрированного процесса осуществляют косвенными средствами (например, посредством перекрестных теплообменников) или посредством электрического нагрева, при котором электроэнергия поступает от безуглеродных или возобновляемых источников, таких как ветер, солнце, геотермальная или ядерная энергия.

Некоторые варианты осуществления изобретения

Ниже приведены некоторые варианты осуществления процессов преобразования диоксида углерода, воды и возобновляемой электроэнергии в высококачественные низкоуглеродные или безуглеродные виды топлива и химических веществ:

1. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, с получением водорода и кислорода. Диоксид углерода улавливают из источника. Диоксид углерода смешивают с водородом из системы электролиза с образованием потока (сырья обратного сдвига фаз вода-газ или сырья «RWGS»), нагреваемого и подаваемого в корпус реактора RWGS, содержащий катализатор RWGS. Реактор RWGS преобразует исходное сырье в газообразный продукт RWGS, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. В ответ на стимул, заключающийся в увеличении стоимости возобновляемой электроэнергии, уменьшают количество электроэнергии, подаваемое в электролизную систему. Для компенсирования сниженного производства водорода, контроллер активирует модуль выделения водорода, выделяющий водород из газообразного продукта RWGS и рециркулирующий его в реактор RWGS. При указанном компенсировании поддерживают соотношение водорода к углекислому газу от 2,0 до 4,0. Газообразный продукт RWGS охлаждают, сжимают и подают в систему для производства жидкого топлива («LFP»). Система LFP преобразует газообразный продукт RWGS в углеводородные продукты, из которых более 50% продуктов представляют собой углеводороды C₅-C₂₄.

2. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, с получением водорода и кислорода. Диоксид углерода улавливают из выхлопа ферментации. Диоксид углерода смешивают с водородом из системы электролиза с образованием потока (сырья обратного сдвига фаз вода-газ или сырья «RWGS»), нагреваемого и подаваемого в корпус реактора RWGS, содержащий катализатор RWGS. Реактор RWGS преобразует исходное сырье в газообразный продукт RWGS, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. В ответ на стимул, заключающийся в увеличении стоимости возобновляемой электроэнергии, уменьшают количество электроэнергии, подаваемое в электролизную систему. Для компенсирования сниженного производства водорода дополнительный водород получают из трубопровода или емкости для хранения водорода. При указанном компенсировании поддерживают соотношение водорода к углекислому

газу от 2,0 до 4,0. Газообразный продукт RWGS охлаждают, сжимают и подают в систему для производства жидкого топлива («LFP»). Система LFP преобразует газообразный продукт RWGS в углеводородные продукты, из которых более 50% продуктов представляют собой углеводороды C₅-C₂₄.

3. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, с получением водорода и кислорода. Диоксид углерода улавливают из источника. Диоксид углерода смешивают с водородом из системы электролиза с образованием потока (сырья обратного сдвига фаз вода-газ или сырья «RWGS»), нагреваемого и подаваемого в корпус реактора RWGS, содержащий катализатор RWGS. Реактор RWGS преобразует исходное сырье в газообразный продукт RWGS, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. В ответ на стимул, заключающийся в увеличении стоимости возобновляемой электроэнергии, уменьшают количество электроэнергии, подаваемое в электролизную систему. Для компенсации сниженного производства водорода, контроллер активирует модуль выделения водорода, выделяющий водород из газообразного продукта RWGS и рециркулирующий его в реактор RWGS. При указанном компенсировании поддерживают соотношение водорода к углекислому газу от 2,0 до 4,0. Газообразный продукт RWGS охлаждают, сжимают и подают в систему для производства жидкого топлива («LFP»). Система LFP преобразует газообразный продукт RWGS в углеводородные продукты, из которых более 50% продуктов представляют собой углеводороды C₅-C₂₄. Кроме того, один или несколько углеводородов C₁-C₄, монооксид углерода и водород подают в модуль автотермического риформинга («ATR»), содержащий катализатор для получения потока продуктов ATR. Газообразный продукт RWGS смешивают с потоком продуктов ATR и подают в систему для производства жидкого топлива («LFP») для повышения производительности системы.

4. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, с получением водорода и кислорода. Диоксид углерода улавливают из источника. Диоксид углерода смешивают с водородом из системы электролиза с образованием потока (сырья обратного сдвига фаз вода-газ или сырья «RWGS»), нагреваемого и подаваемого в корпус реактора RWGS, содержащий катализатор RWGS. Реактор RWGS преобразует исходное сырье в газообразный продукт RWGS, содержащий

монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. Датчик определяет, что соотношение водорода к диоксиду углерода ниже 2,5 и отправляет сигнал на контроллер, который активирует модуль выделения водорода, выделяющий водород из газообразного продукта RWGS и рециркулирующий его в реактор RWGS. При указанном компенсировании поддерживают соотношение водорода к углекислому газу от 2,0 до 4,0. Газообразный продукт RWGS охлаждают, сжимают и подают в систему для производства жидкого топлива («LFP»). Система LFP преобразует газообразный продукт RWGS в углеводородные продукты, из которых более 50% продуктов представляют собой углеводороды C₅-C₂₄.

5. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, с получением водорода и кислорода. Диоксид углерода улавливают из источника. Диоксид углерода смешивают с водородом из системы электролиза с образованием потока (сырья обратного сдвига фаз вода-газ или сырья «RWGS»), нагреваемого и подаваемого в корпус реактора RWGS, содержащий катализатор RWGS. Реактор RWGS преобразует исходное сырье в газообразный продукт RWGS, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. В ответ на стимул, заключающийся в увеличении стоимости возобновляемой электроэнергии, рабочую температуру реактора RWGS снижают, в результате чего он потребляет меньшее количество электроэнергии. Указанная модификация приводит к изменению состава продукта, получаемого из реактора RWGS. Газообразный продукт RWGS охлаждают, сжимают и подают в систему для производства жидкого топлива («LFP»). Система LFP преобразует газообразный продукт RWGS в углеводородные продукты, из которых более 50% продуктов представляют собой углеводороды C₅-C₂₄.

6. Воду подают в электролизную систему, работающую от возобновляемой электроэнергии, с получением водорода и кислорода. Диоксид углерода улавливают из источника. Диоксид углерода смешивают с водородом из системы электролиза с образованием потока (сырья обратного сдвига фаз вода-газ или сырья «RWGS»), нагреваемого и подаваемого в корпус реактора RWGS, содержащий катализатор RWGS. Реактор RWGS преобразует исходное сырье в газообразный продукт RWGS, содержащий монооксид углерода, водород, непрореагировавший диоксид углерода и воду. В ответ на стимул, заключающийся в уменьшении подачи возобновляемой электроэнергии,

уменьшают количество электроэнергии, подаваемое в электролизную систему, но по существу поддерживают количество электроэнергии, подаваемое на другие модули системы, на прежнем уровне. Газообразный продукт RWGS охлаждают, сжимают и подают в систему для производства жидкого топлива («LFP»). Система LFP преобразует газообразный продукт RWGS в углеводородные продукты, из которых более 50% продуктов представляют собой углеводороды C₅-C₂₄.

Вышеописанные варианты осуществления могут быть реализованы любым из многочисленных способов. Например, варианты осуществления могут быть реализованы посредством аппаратных средств, программного обеспечения или их комбинации. При реализации в программном обеспечении программный код может быть исполнен на любом подходящем процессоре или наборе процессоров, обеспеченных на одном компьютере или распределенных среди нескольких компьютеров. Следует понимать, что любой компонент или набор компонентов, выполняющих вышеописанные функции, в общем случае могут рассматриваться как один или несколько контроллеров, управляющих вышеописанными функциями. Один или несколько контроллеров могут быть реализованы различным образом, например, посредством специализированного аппаратного обеспечения или посредством одного или более процессоров, запрограммированных с использованием микрокода или программного обеспечения для выполнения вышеописанных функций.

В этом отношении следует понимать, что один пример реализации вариантов осуществления настоящего изобретения содержит по меньшей мере один не кратковременный компьютерочитаемый носитель для хранения данных (например, компьютерную память, портативную память, компакт-диск и т. д.), на котором закодирована компьютерная программа (т.е., ряд инструкций), которая при исполнении процессором выполняет вышеуказанные функции вариантов осуществления настоящего изобретения. Компьютерочитаемый носитель для хранения данных может быть переносным, в результате чего сохраненная на нем программа, может быть загружена на любой компьютерный ресурс для реализации аспектов настоящего изобретения, раскрытых в настоящем документе. Кроме того, следует понимать, что ссылка на компьютерную программу, которая при ее исполнении выполняет вышеописанные функции, не ограничена прикладной программой, выполняемой на хост-компьютере.

Скорее, термин «компьютерная программа» в настоящем документе использован в общем смысле для обозначения любого типа компьютерного кода (например, программного обеспечения или микрокода), который может быть использован для программирования процессора для реализации вышеописанных аспектов настоящего изобретения.

Различные аспекты настоящего изобретения могут быть использованы отдельно, в комбинации или во множестве комбинаций, конкретно не описанных в вышеописанных вариантах осуществления, и, следовательно, не ограничены в своем применении деталями и комбинацией компонентов, изложенных в вышеприведенном описании или проиллюстрированных на чертежах. Например, аспекты, описанные в одном варианте осуществления, могут быть объединены любым образом с аспектами, описанными в других вариантах осуществления.

Кроме того, варианты осуществления настоящего изобретения могут быть реализованы в виде одного или более способов, пример которых приведен в настоящем документе. Действия, выполняемые в качестве части способа или способов, могут быть упорядочены любым подходящим образом. Соответственно, могут быть реализованы варианты осуществления, в которых действия выполняют в порядке, отличном от проиллюстрированного, что может включать одновременное выполнение некоторых действий, даже если в иллюстративных вариантах осуществления они описаны в виде последовательных действий.

Использование порядковых терминов, таких как «первый», «второй», «третий» и т.д., в формуле изобретения для изменения элемента формулы само по себе не означает какого-либо приоритета или порядка одного элемента формулы относительно другого или временного порядка, в котором выполняют действия способа. Такие термины используют исключительно в качестве обозначений для отличия одного элемента формулы изобретения, имеющего определенное название, от другого элемента, имеющего то же название (за исключением использования порядкового термина).

Фразеология и терминология, используемые в настоящем документе, приведены в описательных целях и не должны рассматриваться как ограничивающие. Использование терминов «включающий», «содержащий», «имеющий» и их вариаций предназначено для охвата элементов, перечисленных ниже, и дополнительных элементов.

В свете подробного описания нескольких вариантов осуществления настоящего изобретения специалистам в области техники будут очевидны различные модификации и усовершенствования. Подобные модификации и усовершенствования следует считать находящимися в пределах объема настоящего изобретения. Соответственно, вышеприведенное описание приведено исключительно в качестве примера и не предназначено для ограничения. Изобретение ограничено исключительно нижеследующей формулой изобретения и ее эквивалентами.

Нижеследующие примеры приведены в иллюстративных целях и никоим образом не предназначены для ограничения объема настоящего изобретения.

Пример 1: Это базовый вариант установки для производства электротоплива. Он выполнен в соответствии с **ФИГ. 1**. Электричество используют в электролизере для получения водорода. Диоксид углерода поставляют с установки для улавливания диоксида углерода. Водород и диоксид углерода подают в реактор RWGS с соотношением H_2/CO_2 , составляющим 2,0. В данном примере при наличии стимула указанная установка реагирует без обеспечения преимущества настоящего изобретения. Стимулом является уменьшение количества электроэнергии, доступной для установки для производства электротоплива, вследствие уменьшения силы ветра на ветряных турбинах. Проиллюстрирован 12-часовой период, в течение которого доступно лишь 50% от базового количества электроэнергии. Блок электролиза установки снижает производство H_2 на 50%; для сохранения соотношения H_2/CO_2 в реакторе RWGS на прежнем уровне использование CO_2 снижают на 50%; выход синтез-газа из реактора RWGS уменьшается на 50%; и, следовательно, общее производство топлива LFP уменьшается на 50%. Общий доход предприятия уменьшается на 50% в течение 12-часового периода. Указанный результат очевидно ниже желаемого.

Пример 2: В данном примере конфигурация установки аналогична конфигурации в Примере 1, но с использованием модуля выделения водорода согласно **ФИГ. 2**. В данном примере стимул идентичен стимулу в Примере 1, заключающемуся в уменьшении количества электроэнергии на 50% в течение 12-часового периода. Устройство мониторинга и контроллер приступают к работе. В данном случае модуль выделения водорода реагирует на стимул путем отделения H_2 из выхода реактора RWGS, который также содержит синтез-газ из ATR, и рециркулирует H_2 обратно на вход RWGS для

поддержания соотношения H_2/CO_2 в сырье на прежнем уровне. Потребление CO_2 остается прежним. Подача воды в ATR увеличивается, что приводит к более высокому соотношению пара к углероду, что приводит к более высокому выходу H_2/CO из ATR. Соотношение H_2/CO при переходе к LFP снижается с 2,0 до 1,8 (в качестве примера). Общая производительность преобразования в реакторе LFP снижается на 20 относительных процентов по сравнению с исходным значением до стимула в Примере 1. Общее снижение количества продукта, выходящего из установки, составляет 20% по сравнению с 50% в Примере 1 и демонстрирует преимущество настоящего изобретения. Соответственно, общий доход предприятия уменьшается на 20% в течение 12-часового периода. Это представляет собой существенное повышение дохода по сравнению с базовым вариантом.

Пример 3: В данном примере конфигурация идентична Примеру 1. Стимулом является прекращение потока диоксида углерода из блока улавливания углерода в течение 2 часов. В данном примере в базовой конфигурации производство водорода в электролизере прекращают. Общий объем производства топлива за указанный период падает до нуля. Доход в течение указанных 2 часов падает до нуля. Временный стимул прекращается, и установка возобновляет работу и выходит на полную мощность. Затем установка получает еще один стимул, заключающийся в том, что доступное количество электроэнергии падает до нуля в течение 2 часов. В результате предприятие прекращает производство топлива. Доход за указанный двухчасовой период равен нулю. В данном примере в течение 4 часов под воздействием двух отдельных стимулов производительность равна нулю.

Пример 4: В данном примере конфигурация идентична Примеру 2 с модулем выделения водорода. Данная новая установка испытывает стимулы, идентичные приведенным в Примере 3. В течение первого стимула в течение двух часов отсутствует подача диоксида углерода. В этом случае, в отличие от Примера 3, работа электролизера продолжается. Модуль выделения водорода позволяет сжигать и хранить водород, производимый в период отсутствия диоксида углерода. В течение второго стимула, при котором электричество недоступно для работы электролизера, водород забирают из хранилища и производство топлива продолжается. В данном примере в течение первого события стимула доход установки равен нулю, но в течение второго события стимула

доход не падает. Таким образом, в данном случае в течение двух событий стимула доход составляет 50% от общего дохода производства. Это представляет собой существенное увеличение дохода по сравнению с доходом от объекта в Примере 3.

Список литературы

Eichman, J, Koleva, M., Guerra, O.J., McLaughlin, B: Optimizing an integrated renewable-electrolysis system, National Renewable Energy Laboratory Report # NREL/TP-5400-75635, 55 pages (2020).

Ince, C., Hagen, S.: Modeling and simulation of Power-to-X systems: a review, Fuel, 304 (2021).

Wulf, C., Zapp, P., Schrebier, A.: Review of Power-to-X demonstration projects in Europe, Frontiers in Energy Research (2020).

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ управления процессом получения электротоплива, включающий:
 - a. подачу первого количества электроэнергии на электролизный модуль для получения H_2 , смешивание H_2 с CO_2 для получения газовой смеси, имеющей первое соотношение H_2 к CO_2 , проведение обратной реакции сдвига фаз вода-газ газовой смеси для получения синтез-газа и обеспечение реакции синтез-газа с получением жидкого углеводорода; и
 - b. в ответ на стимул, подачу второго количества электроэнергии на электролизный модуль для получения H_2 , смешивание H_2 с CO_2 для получения газовой смеси, имеющей второе соотношение H_2 к CO_2 , проведение обратной реакции сдвига фаз вода-газ газовой смеси для получения синтез-газа и проведение реакции синтез-газа с получением жидкого углеводорода,
причем второе количество электроэнергии представляет собой количество, составляющее от 0% до первого количества электроэнергии, а второе соотношение H_2 к CO_2 по существу сходно с первым соотношением H_2 к CO_2 .
2. Способ по п. 1, в котором стимул связан с наличием электроэнергии.
3. Способ по п. 1, в котором стимул связан со стоимостью электроэнергии.
4. Способ по п. 1, в котором стимул связан с наличием CO_2 .
5. Способ по п. 1, в котором стимул связан со стоимостью CO_2 .
6. Способ по п. 1, в котором стимул является временным.
7. Способ по п. 1, в котором стимул длится в течение периода времени от 0 до 12 часов.

8. Способ по п. 1, в котором после стимула первое количество электроэнергии подают на электролизный модуль.
9. Способ по п. 1, в котором H_2 забирают из трубопровода в ответ на стимул.
10. Способ по п. 1, в котором H_2 получают посредством электролизного модуля и хранят.
11. Способ по п. 1, в котором H_2 забирают из хранилища в ответ на стимул.
12. Способ по п. 1, в котором H_2 выделяют из потока продукта реакции синтез-газа с получением жидкого углеводорода.
13. Способ по п. 1, в котором H_2 выделяют путем адсорбции при переменном давлении.
14. Способ по п. 1, в котором второе количество электроэнергии составляет от 0% до 70% от первого количества электроэнергии.
15. Способ по п. 1, в котором количество электрической энергии, подаваемое в реактор, выполняющий реакцию сдвига фаз вода-газ, уменьшают на величину, составляющую от нуля до значения соотношения второго количества электроэнергии к первому количеству электроэнергии.
16. Способ по п. 1, в котором скорость потока газовой смеси снижают на величину от 20% до 100%.
17. Способ по п. 1, в котором первое и/или второе количество электроэнергии получают из возобновляемых ресурсов.
18. Способ по п. 1, в котором жидкий углеводород представляет собой топливо.

19. Способ по п. 1, в котором первое соотношение и второе соотношение составляют от 2,0 до 4,0.

20. Система для получения электротоплива, содержащая:

a. электролизный модуль, выполненный с возможностью использования электроэнергии для преобразования воды в поток продукта электролиза, содержащий H_2 ;

b. модуль обратного сдвига фаз вода-газ, выполненный с возможностью осуществления реакции CO_2 с потоком продукта электролиза с образованием смеси синтез-газа, содержащей CO и H_2 ;

c. датчик, выполненный с возможностью обнаружения стимула;

d. контроллер, выполненный с возможностью управления модулем выделения водорода в ответ на стимул, причем указанный модуль выделения водорода выполнен с возможностью выделения H_2 из смеси синтез-газа для получения (i) потока H_2 , направляемого в модуль обратного сдвига фаз вода-газ, и (ii) смеси синтез-газа, обедненной H_2 ;

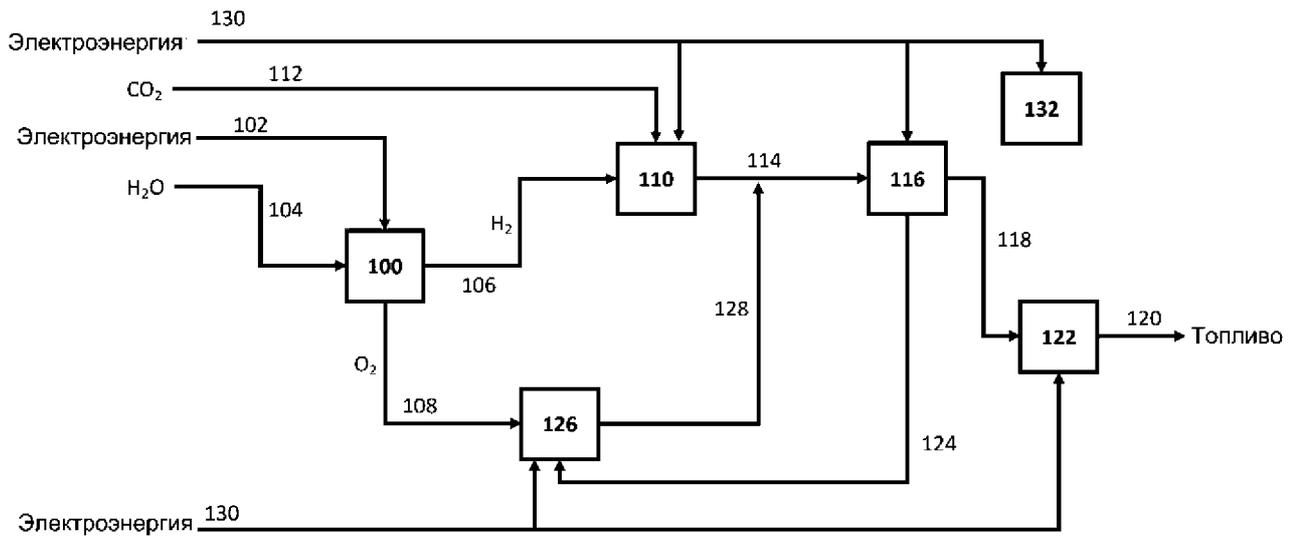
e. модуль синтеза углеводородов, выполненный с возможностью преобразования смеси синтез-газа, обедненной H_2 , в жидкий углеводород;

f. модуль автотермического риформинга, выполненный с возможностью осуществления реакции O_2 из электролизного модуля с (i) непрореагировавшими реагентами из модуля синтеза углеводородов и (ii) углеводородами, имеющими менее 5 атомов углерода из модуля синтеза углеводородов, для получения потока продукта автотермического риформинга, выполненного с возможностью его подачи в модуль синтеза углеводородов.

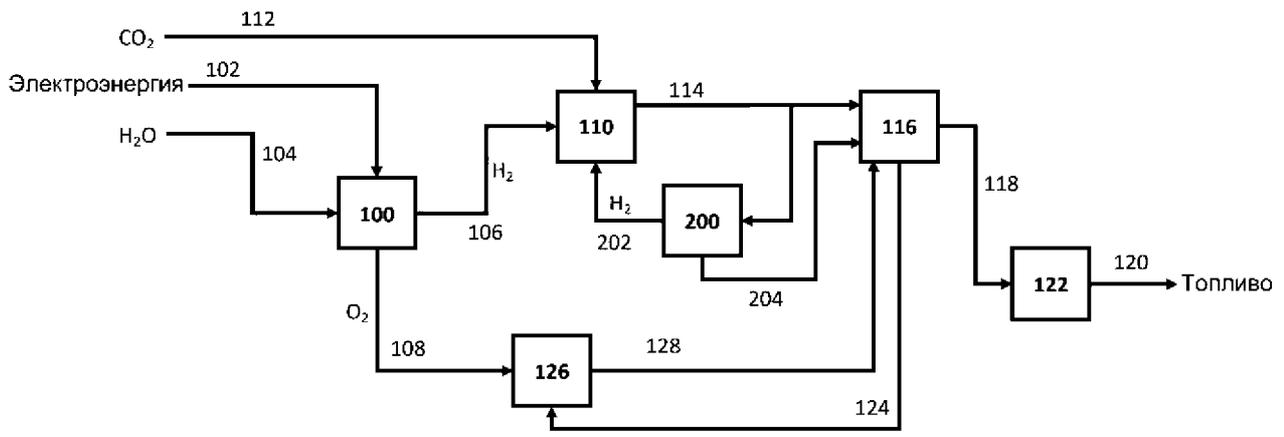
21. Система по п. 20, в которой датчик обнаруживает соотношение H_2 к CO_2 на входе в модуль обратного сдвига фаз вода-газ.

22. Система по п. 20, в которой стимул представляет собой соотношение H_2 к CO_2 на входе в модуль обратного сдвига фаз вода-газ, составляющее менее 2,5.

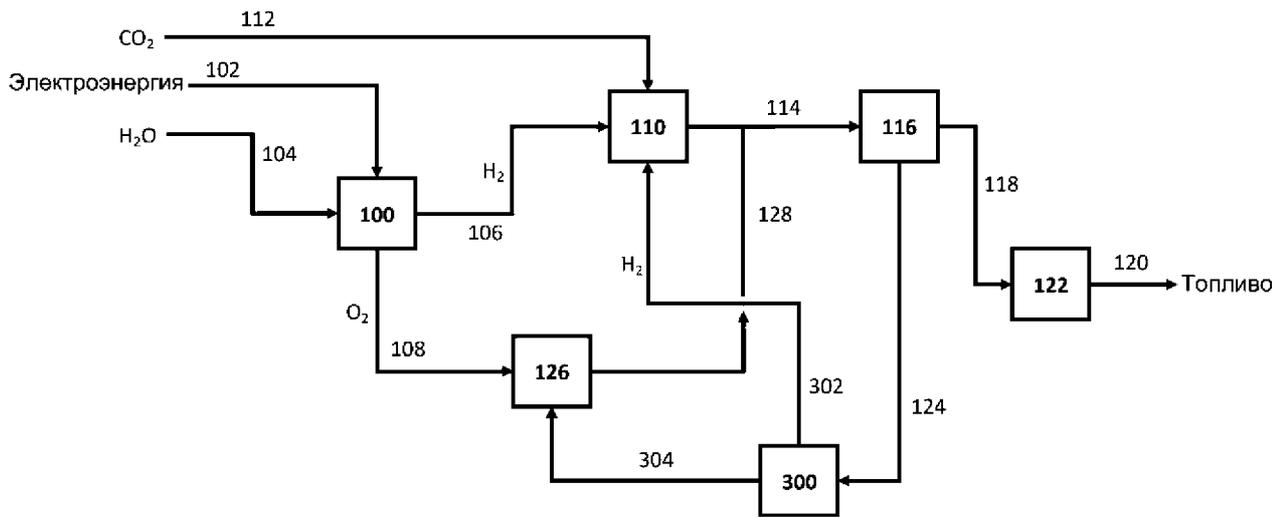
23. Система по п. 20, в которой стимул связан с наличием электроэнергии.
24. Система по п. 20, в которой стимул связан со стоимостью электроэнергии.
25. Система по п. 20, в которой стимул связан с наличием CO₂.
26. Система по п. 20, в которой стимул связан со стоимостью CO₂.
27. Система по п. 20, в которой стимул является временным.
28. Система по п. 20, в которой стимул длится в течение периода времени от 0 часов до 12 часов.
29. Система по п. 20, в которой после стимула первое количество электроэнергии подают на электролизный модуль.
30. Система по п. 20, в которой модуль выделения водорода содержит адсорбер при переменном давлении (PSA).
31. Система по п. 20, в которой модуль выделения водорода не работает при отсутствии стимула.
32. Система по п. 20, в которой, по сравнению с неработающим модулем выделения водорода, работа модуля выделения водорода увеличивает соотношение CO к H₂, подаваемых в модуль синтеза углеводородов.
33. Система по п. 20, в которой, по сравнению с неработающим модулем выделения водорода, работа модуля выделения водорода увеличивает среднюю молекулярную массу жидкого углеводорода, получаемого модулем синтеза углеводородов.



ФИГ. 1



ФИГ. 2



ФИГ. 3