

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(11) 036885

(13) B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.01.11

(21) Номер заявки
201990592

(22) Дата подачи заявки
2017.08.29

(51) Int. Cl. F02C 1/06 (2006.01)
F02C 3/34 (2006.01)

(54) СИСТЕМА И СПОСОБ ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ПЕРЕНОСА ИОНОВ

(31) 62/381,907

(32) 2016.08.31

(33) US

(43) 2019.09.30

(86) PCT/IB2017/055195

(87) WO 2018/042338 2018.03.08

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
8 РИВЕРЗ КЭПИТЛ, ЛЛК (US)

(56) EP-A1-0916386
US-A1-2014004470
EP-A2-0663230

(72) Изобретатель:
Аллам Родни Джон (GB), Браун Гленн
Уильям, мл., Хофф Бенджамин (US)

(74) Представитель:
Веселицкая И.А., Веселицкий М.Б.,
Кузенкова Н.В., Каксис Р.А., Белоусов
Ю.В., Куликов А.В., Кузнецова Е.В.,
Соколов Р.А., Кузнецова Т.В. (RU)

(57) В изобретении описаны системы и способы выработки энергии с использованием блока ионитовой мембраны (ИМ). Поток воздуха и поток топлива могут быть пропущены через блок ИМ, так что топливо, по меньшей мере, частично окисляется или сгорает для формирования выходного потока, содержащего CO₂. Может осуществляться сжатие и расширение потока CO₂ для выработки энергии.

036885 B1

036885 B1

036885

B1

Область техники

Настоящее изобретение относится к системам и способам выработки энергии. В частности, выработка энергии может осуществляться с использованием кислорода для сжигания топлива, обеспечиваемого, по меньшей мере, частично с помощью диффузии кислорода через мембрану переноса ионов кислорода.

Уровень техники

Системы и способы выработки энергии, в которых используется сжигание углеродосодержащих или углеводородных топлив с диоксидом углерода в качестве рабочей текучей среды, описаны в патенте US 8596075, выданном Allam и др., содержание которого вводится здесь ссылкой. В таких системах и способах используется рекуперативная система Брайтона высокого давления с CO_2 в качестве рабочей текучей среды, в которой для сжигания топлива под высоким давлением, например от примерно 200 до примерно 400 бар, и с высокой температурой, например от примерно 600 до примерно 1600°C, используется по существу чистый кислород. В некоторых случаях топливо может быть природным газом, то есть смесью углеводородных газов, содержащей преимущественно метан, и/или топливом, полученным в результате частичного окисления угля, биомассы и/или остаточных продуктов переработки нефти, таких как, например, тяжелые фракции нефтяных остатков или нефтяной кокс. Поток продуктов горения с такими давлениями и температурами расширяется в турбине и выходит из нее с давлением от примерно 20 до примерно 40 бар. Затем расширенный поток может быть охлажден, например, в рекуперативном теплообменнике и очищен для удаления воды или других загрязняющих примесей, чтобы обеспечить поток по существу чистого CO_2 , который может быть сжат и повторно нагрет, например, выхлопным потоком турбины в рекуперативном теплообменнике, перед возвратом в камеру сгорания. При желании часть или весь CO_2 может быть выведен для захоронения и/или для вторичного использования, такого как повышение нефтеотдачи пласта, как это описано в патенте US 8869889, выданном Palmer и др., содержание которого вводится ссылкой в настоящую заявку. Такие циклы выработки энергии могут обеспечивать высокую эффективность работы с одновременным улавливанием по существу всего образующегося CO_2 . Например, такой цикл выработки энергии, в котором осуществляется сжигание природного газа для обеспечения потока на входе турбины с давлением 300 бар и с температурой 1150°C, причем этот поток выходит из турбины с давлением 30 бар, может обеспечивать эффективный КПД (для низкой теплотворной способности топлива), равный примерно 59%, с полным улавливанием углекислого газа. Такая высокая эффективность достигается отчасти за счет введения дополнительного тепла с температурой, не превышающей примерно 400°C, для компенсации большой разницы между удельной теплоемкостью CO_2 при низких температурах для высокого и низкого давления, используемых в системе.

Ключевым моментом для таких циклов выработки энергии является обеспечение больших количеств по существу чистого газообразного кислорода высокого давления. Для работы энергетической установки мощностью 300 МВт, работающей с вышеуказанными давлениями и температурами, обычно требуется ежедневно примерно 3500 метрических тонн кислорода с минимальным давлением 30 бар и чистотой 99,5%, который вырабатывается установкой криогенного разделения воздуха. Такая кислородная станция существенно увеличивает капитальные затраты для вышеописанной системы выработки энергии, и для осуществления цикла выработки энергии также требуется большое количество энергии. Как уже указывалось, такие системы и способы обеспечивают повышенную эффективность в связи с подачей дополнительного тепла, кроме тепла, извлекаемого из потока продуктов сгорания топлива. В одном из вариантов такое дополнительное тепло может быть адиабатическим теплом, выделяющимся при повышении компрессорами давления воздуха, поступающего в процесс криогенного производства кислорода, а также по меньшей мере частью тепла, выделяющегося при сжатии компрессорами рециркулируемого CO_2 . Тем не менее, все-таки существует необходимость в технике в других циклах выработки энергии, которые могут обеспечивать высокий КПД с по существу полным улавливанием углекислого газа и которые могут быть осуществлены с меньшими капитальными затратами, а также требуют меньших эксплуатационных расходов.

Сущность изобретения

Настоящее изобретение относится к системам и способам выработки энергии, в которых кислород для сжигания топлива может обеспечиваться без необходимости использования установки криогенного разделения воздуха. В одном или в нескольких вариантах кислород может быть извлечен из потока воздуха (или из другого потока со сравнительно низким содержанием кислорода) с использованием механизма ионного переноса. Например, некоторые композиции керамических смесей оксидов, имеющих кристаллическую структуру, аналогичную структуре перовскита или желтого колчедана, которые работают при температурах, превышающих 750°C, обладают способностью осуществлять диффузию кислорода из зоны с высоким коэффициентом кислородной активности в зону с низким коэффициентом кислородной активности. Композиция керамики из смеси оксидов может быть подобрана таким образом, чтобы в кристаллической решетке были пустые места, которые могли бы занимать ионы кислорода. Это может быть достигнуто, например, с использованием одновалентных, двухвалентных или трехвалентных оксидов металлов, смешанных для получения вариаций кристаллической решетки, в которых обеспечивается возможность сохранения устойчивости кристаллической решетки.

Системы и способы по настоящему изобретению могут исключать необходимость в одной или в нескольких частях оборудования, которые считаются необходимыми для высокоэффективного сжигания топлива с кислородом, таких как установка криогенного разделения воздуха для обеспечения высокочистого кислорода и/или камера сгорания высокого давления для сжигания топлива с кислородом для нагрева потока сжатой рабочей текущей среды перед ее расширением для получения энергии. Исключение таких элементов может обеспечить существенную экономию средств, как капитальных затрат, так и эксплуатационных расходов. Циклы выработки энергии, раскрытые в настоящей заявке, могут обеспечивать работу вырабатывающей энергию турбины с меньшей температурой на входе, что позволяет исключить внутренние потоки CO_2 , охлаждающего лопатки и внутренний кожух турбины с соответствующим повышением КПД турбины и снижением капитальных расходов.

В одном или в нескольких вариантах предлагаемые системы и способы могут исключать необходимость в газовом компрессоре высокого давления за счет введения газообразного топлива в систему с давлением выхлопного потока турбины. Например, природный газ, используемый в качестве топлива, может подаваться непосредственно из трубопровода природного газа с давлением примерно 30 бар.

В других вариантах предлагаемые системы и способы могут исключать необходимость в отдельном разбавлении подаваемого кислорода для регулирования температуры адиабатического пламени в камере сгорания. Например, в известных системах может осуществляться смешивание CO_2 с потоком кислорода, и в этом случае может потребоваться отдельная группа компрессоров для сжатия $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ и отдельный поток в рекуперативном теплообменнике. Однако в вариантах осуществления настоящего изобретения отсутствует необходимость в группе компрессоров для сжатия $\text{CO}_2 + \text{O}_2$.

В одном из вариантов сгорание топлива может обеспечиваться путем передачи кислорода из воздуха низкого давления в зону горения, через которую протекает поток топлива, дополнительно (но не обязательно) смешанного с разбавителем, таким как выхлопной поток турбины, содержащий CO_2 . При необходимости может быть введен один или несколько элементов, подходящих для обеспечения подачи дополнительного тепла. Например, может использоваться газовая турбина для обеспечения подачи низкотемпературного тепла с использованием теплосодержания и температуры выхлопного потока турбины. В связи с ограничениями температуры входного потока газовой турбины, даже если используется интенсивное охлаждение и применяются защитные покрытия, выхлопной поток турбины будет, как правило, содержать кислород в концентрации от примерно 12 до 15 мол.%. Таким образом, горячий выхлопной поток турбины может использоваться в качестве входного потока, содержащего кислород, с высокой температурой и низким давлением для камеры сгорания мембраны переноса ионов кислорода (далее "ионитовая мембрана") вместо или в дополнение к использованию потока нагретого воздуха с давлением, близким к давлению атмосферного воздуха.

Поток горячего газа с пониженным содержанием кислорода, выходящий из камеры сгорания с ионитовой мембраной (ИМ), может использоваться при необходимости для обеспечения низкотемпературного тепла.

Нагреватель с ИМ, нагревающий выхлопной поток турбины, содержащий CO_2 , может использоваться для повышения температуры выхлопного потока турбины перед его подачей в горячий конец рекуперативного теплообменника. Входной поток турбины высокого давления может выходить из горячего конца рекуперативного теплообменника и подаваться в турбину без дополнительного нагрева. Максимальная температура на входе турбины может определяться максимально допустимой температурой для рекуперативного теплообменника, которая определяется материалом конструкции теплообменника, расчетными допусками и требованиями законодательства. Для высокого рабочего давления, которое может находиться в диапазоне от примерно 200 до примерно 400 бар, и при использовании наилучшего современного оборудования, такого как теплообменники HEATRIC, изготавливаемые из самых современных высокотемпературных сплавов, в настоящее время возможна температура на входе турбины, находящаяся в диапазоне от примерно 750 до примерно 850°C, и можно ожидать, что могут быть обеспечены даже более высокие температуры за счет использования сплавов, выдерживающих более высокие температуры.

В одном или в нескольких вариантах КПД цикла выработки энергии может быть максимизирован путем осуществления цикла в пределах температурных ограничений, накладываемых конструкцией рекуперативного теплообменника. Например, диапазон рабочих температур от примерно 750 до примерно 850°C для температуры на входе турбины представляет в настоящее время верхний предел для турбины высокого давления, работающей без охлаждения лопаток или внутреннего кожуха (однако могут использоваться некоторые защитные покрытия). Снижение температуры на входе турбины от типичного верхнего диапазона 1100-1200°C до нижнего диапазона 750-850°C приводит к существенному падению выходной мощности для заданного входного расхода турбины. Удивительно, но это не приводит к соответствующему существенному падению общего термического КПД цикла выработки энергии по настоящему изобретению. В этом случае термический КПД может быть в диапазоне от примерно 52 до примерно 54% (для низшей теплотворной способности топлива) в соответствии с конструктивными ограничениями современных компонентов и оптимизированными характеристиками. В системе, работающей с вышеописанными характеристиками, может сохраняться способность улавливания почти 100% CO_2 , обра-

зующегося при сгорании газообразного топлива. Интеграция газовой турбины обеспечивает возможность улавливания 100% CO_2 из газообразного топлива, поступающего в камеру сгорания блока ИМ для снабжения энергией цикла выработки энергии. CO_2 , образующийся из топлива, подаваемого на вход газовой турбины, обычно выбрасывается в атмосферу. В результате общее количество улавливаемого CO_2 для газовой турбины максимальных размеров, дополнительно встроенной в систему по настоящему изобретению, снижается до величины в диапазоне от примерно 60 до примерно 70%.

В некоторых вариантах систем и способов по настоящему изобретению может обеспечиваться система с двухступенчатой турбиной, в которой используется промежуточный нагрев вторым нагревателем с ИМ, в результате чего обеспечивается максимально достижимый КПД цикла выработки энергии. Турбина, используемая для выработки энергии, может быть двухступенчатой, причем выхлопной поток первой турбины имеет среднее давление. Затем выхлопной поток может быть подогрет с использованием камеры сгорания газообразного топлива с ИМ до высокой температуры перед расширением в турбине второй ступени до окончательного давления выхлопного потока турбины.

В одном или в нескольких вариантах может использоваться керамическая мембрана высокотемпературного переноса ионов кислорода для переноса кислорода из потока, содержащего O_2 (предпочтительно нагретого потока и предпочтительно потока низкого давления) в поток, содержащий компоненты топлива (например, CH_4 , H_2 , CO , высокомолекулярные углеводороды, и смеси этих компонентов) и дополнительно CO_2 (этот поток может быть нагрет и может иметь высокое давление). Кислород, поступающий в результате переноса, окисляет топливо, в результате чего выделяется тепло и образуются продукты CO_2 и H_2O . Выделяющееся тепло повышает температуру CO_2 и продуктов сгорания топлива. Если это необходимо, блок ИМ может быть сконфигурирован только для частичного сжигания или окисления одного или нескольких компонентов топлива. Например, углеродосодержащее топливо может быть частично сожжено или окислено для формирования, по меньшей мере, CO в качестве продукта частичного окисления.

В одном или в нескольких вариантах поток CO_2 может быть выходным потоком турбины, первой или из второй турбины, который после нагрева в блоке ИМ за счет сжигания содержащихся компонентов топлива с диффундировавшим кислородом в итоге становится обратным потоком, поступающим в рекуперативный теплообменник.

В одном или в нескольких вариантах первый поток нагретого CO_2 может быть использован для опосредованной передачи тепла второму потоку CO_2 высокого давления, в результате чего его температура повышается.

В одном или в нескольких вариантах второй поток CO_2 может быть подан в первую турбину системы выработки энергии.

В одном или в нескольких вариантах выхлопной поток первой или второй турбины, имеющий меньшее давление, используется полностью или частично для обеспечения первого потока CO_2 .

В некоторых вариантах система и способ выработки энергии могут быть сконфигурированы таким образом, что топливо сгорает в присутствии потока чистого кислорода для обеспечения тепла для потока рабочей текучей среды, циркулирующей в цикле выработки энергии. Такая система и способ могут характеризоваться одним или несколькими нижеуказанными признаками, которые могут быть объединены в любом порядке или в любом количестве.

Кислород может обеспечиваться путем диффузии через систему мембраны переноса ионов кислорода.

Кислород может диффундировать из потока предварительно нагретого воздуха.

Кислород может диффундировать в предварительно нагретый поток рабочей текучей среды в цикле выработки энергии, причем этот поток содержит компоненты, которые могут окисляться в реакции с чистым кислородом, в результате чего высвобождается тепло горения.

Могут обеспечиваться средства для предварительного нагрева, как потока подаваемого воздуха, так и потока рабочей текучей среды перед их подачей в блок ИМ.

Могут обеспечиваться средства для выработки энергии из рабочей текучей среды, циркулирующей в цикле выработки энергии, в котором используется турбинный блок выработки энергии.

Циркулирующая рабочая текучая среда может быть диоксидом углерода.

Цикл выработки энергии, в котором в качестве рабочей текучей среды используется CO_2 , может включать сжигание газообразного топлива, смешанного с выхлопным потоком турбины, с использованием по существу чистого кислорода, который диффундирует через систему мембраны переноса ионов кислорода, для предварительного нагрева выхлопного потока турбины до более высокой температуры.

Для охлаждения нагретого выхлопного потока турбины с одновременным нагревом входного потока турбины может использоваться рекуперативный теплообменник.

Рабочая текучая среда, содержащая CO_2 , может быть охлаждена до почти температуры окружающей среды, и при этом может быть отделена сконденсированная вода.

Может использоваться система компрессоров, обеспечивающая повышение давления охлажденного очищенного выхлопного потока турбины до величины давления на входе турбины.

В результате окисления углерода, имеющегося в потоке газообразного топлива, может быть полу-

чен поток чистого товарного CO_2 , который может быть выведен с любым давлением в диапазоне давлений на входе и выходе компрессора.

Может обеспечиваться источник дополнительного тепла для передачи тепла потоку рециркулируемого CO_2 под давлением в дополнение к теплу, обеспечиваемому при охлаждении выхлопного потока турбины.

Давление на входе турбины может быть в диапазоне от примерно 200 до примерно 400 бар.

Давление на выходе турбины может быть в диапазоне от примерно 20 до примерно 40 бар.

Содержащий кислород поток, подаваемый в мембрану переноса ионов кислорода, может быть воздухом.

Содержащий кислород поток, подаваемый в мембрану переноса ионов кислорода, может быть выхлопным потоком газовой турбины.

Давление подаваемого содержащего кислород потока может быть 1,4 бар или менее.

Турбина может быть двухступенчатым устройством, в котором выхлопной поток турбины первой ступени нагревается в первой камере сгорания с мембраной переноса ионов кислорода для формирования входного потока турбины второй ступени, и выхлопной поток турбины второй ступени нагревается во второй камере сгорания с мембраной переноса ионов кислорода для формирования выходного потока турбины, подаваемого в горячий конец рекуперативного теплообменника.

Давление на входе турбины второй ступени может быть в диапазоне от примерно 70 до примерно 120 бар.

Часть выхлопного потока турбины с температурой, почти равной температуре окружающей среды, может быть рециркулирована и нагрета в рекуперативном теплообменнике до температуры на входе первой или единственной турбины с последующим добавлением к выхлопному потоку турбины для повышения его температуры и обеспечения возможности варьирования температуры на входе камеры сгорания с ИМ, как для содержащего кислород потока, так и для выхлопного потока турбины.

Мембрана переноса ионов кислорода может быть сконфигурирована в форме трубы круглого сечения, причем газ низкого давления, содержащий кислород, находится снаружи трубы, а выхлопной поток турбины и поток газообразного топлива находятся внутри трубы.

Труба ИМ может быть закрыта на нижнем (по потоку) конце, и в ней расположена внутренняя труба, через которую выводится нагретый выхлопной поток турбины.

Содержащий кислород поток может проходить в трубе, расположенной концентрично с трубой ИМ и окружающей ее.

Эти три концентрические трубы могут быть установлены вертикально, причем каждая из них смонтирована с уплотнением в одну из трех трубных решеток, установленных в резервуаре высокого давления, так что верхняя трубная решетка формирует пространство для нагретого выхлопного потока турбины, средняя трубная решетка формирует пространство для входящего выхлопного потока турбины, и нижняя трубная решетка формирует пространство для входящего содержащего кислород потока.

Внешняя концентрическая труба, содержащая кислород, может быть открыта на конце, так что поток со сниженной концентрацией кислорода (обедненный поток) выпускается в резервуар высокого давления и проходит вверх для выведения ниже нижней трубной решетки.

В некоторых вариантах осуществления изобретения система выработки энергии может содержать вырабатывающую энергию турбину, выполненную для расширения потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , для производства энергии и формирования выхлопного потока турбины; источник содержащего кислород потока, выполненный для обеспечения содержащего кислород потока; источник топлива, выполненный для введения топлива в выхлопной поток турбины; систему ионитовой мембраны (ИМ), выполненную для приема выхлопного потока турбины с введенным топливом, а также для приема содержащего кислород потока, причем система ИМ обеспечивает диффузию кислорода из содержащего кислород потока в выхлопной поток турбины с введенным топливом, по меньшей мере, частичного сжигания по меньшей мере части введенного топлива и для обеспечения потока, содержащего нагретый CO_2 ; и рекуперативный теплообменник, выполненный для передачи тепла от потока, содержащего CO_2 , потоку рабочей среды, содержащему рециркулируемый CO_2 .

Система может быть определена в отношении любого одного или нескольких следующих признаков, которые могут быть объединены в любом количестве и в любом порядке.

Система может содержать также сепаратор, выполненный для приема потока, содержащего CO_2 , из рекуперативного теплообменника и выпуска потока по существу чистого CO_2 .

Система может содержать также по меньшей мере один компрессор, выполненный для сжатия по меньшей мере части по существу чистого CO_2 и обеспечения рециркулируемого CO_2 .

Система может содержать также по меньшей мере один источник дополнительного тепла, выполненный для добавления тепла потоку рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , в дополнение к теплу, переданному из потока, содержащего CO_2 .

Система может содержать также одно или оба из устройства предварительного нагрева содержащего кислород потока, выполненного для подогрева содержащего кислород потока выше системы ИМ по потоку, и устройства предварительного нагрева выхлопного потока турбины, выполненного для подог-

рева выхлопного потока турбины выше системы ИМ по потоку.

Источник содержащего кислород потока может быть воздухом.

Источник содержащего кислород потока может быть выхлопным потоком газовой турбины.

Вырабатывающая энергию турбина может содержать последовательность по меньшей мере двух турбин.

Система может содержать, по меньшей мере, первую систему ИМ и вторую систему ИМ.

Система ИМ может содержать диффузионную мембрану, выполненную в форме трубы, имеющей внешнюю поверхность, сконфигурированную для контакта с потоком, содержащим кислород, и внутреннюю поверхность, сконфигурированную для контакта с выхлопным потоком турбины с введенным топливом.

Диффузионная мембрана, выполненная в форме трубы, может иметь открытый верхний (по потоку) конец и закрытый нижний (по потоку) конец.

Система ИМ может содержать внутреннюю металлическую трубу, расположенную внутри диффузионной мембраны, выполненной в форме трубы.

Система ИМ может содержать внешнюю металлическую трубу, окружающую концентрично диффузионную мембрану, выполненную в форме трубы.

Система ИМ может содержать внешний резервуар высокого давления.

В некоторых вариантах осуществления изобретения способ выработки энергии может включать: расширение потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , в вырабатывающей энергию турбине для производства энергии и формирования выхлопного потока турбины; обеспечение содержащего кислород потока из источника содержащего кислород потока; введение топлива из источника топлива в выхлопной поток турбины для формирования объединенного потока, содержащего выхлопной поток турбины и топливо; пропускание содержащего кислород потока и объединенного потока, содержащего выхлопной поток турбины и топливо через систему ионитовой мембраны (ИМ), обеспечивающую диффузию кислорода из содержащего кислород потока в объединенный поток, содержащий выхлопной поток турбины и топливо, по меньшей мере, для частичного сжигания по меньшей мере части топлива в объединенном потоке, содержащем выхлопной поток турбины и топливо, и обеспечения потока, содержащего нагретый CO_2 ; и нагрев потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , в рекуперативном теплообменнике с использованием тепла из потока, содержащего нагретый CO_2 , перед расширением потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , в вырабатывающей энергию турбине.

Способ может быть определен в отношении любого одного или нескольких следующих признаков, которые могут быть объединены в любом количестве и в любом порядке.

Способ может включать также очистку потока, содержащего CO_2 , для обеспечения потока по существу чистого CO_2 .

Способ может включать также сжатие по меньшей мере части по существу чистого CO_2 по меньшей мере в одном компрессоре для формирования рециркулируемого CO_2 .

По меньшей мере часть рециркулируемого CO_2 может быть в сверхкритическом состоянии.

Давление потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , может быть примерно 200 бар или более.

Способ может включать также нагрев потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , с использованием дополнительного тепла от другого источника, помимо потока, содержащего нагретый CO_2 .

Способ может включать также нагрев одного или обоих из содержащего кислород потока и выхлопного потока турбины выше системы ИМ по потоку.

Источник содержащего кислород потока может быть воздухом.

Источник содержащего кислород потока может быть выхлопным потоком газовой турбины.

Вырабатывающая энергию турбина может содержать последовательность по меньшей мере двух турбин.

Способ может включать использование, по меньшей мере, первой системы ИМ и второй системы ИМ.

Система ИМ может содержать диффузионную мембрану, выполненную в форме трубы, имеющей внешнюю поверхность, сконфигурированную для контакта с потоком, содержащим кислород, и внутреннюю поверхность, сконфигурированную для контакта с выхлопным потоком турбины с введенным топливом.

Диффузионная мембрана, выполненная в форме трубы, может иметь открытый верхний (по потоку) конец и закрытый нижний (по потоку) конец.

Система ИМ может содержать внутреннюю металлическую трубу, расположенную внутри диффузионной мембраны, выполненной в форме трубы.

Система ИМ может содержать внешнюю металлическую трубу, окружающую концентрично диффузионную мембрану, выполненную в форме трубы.

Система ИМ может содержать внешний резервуар высокого давления. Давление выхлопного пото-

ка турбины может быть примерно 80 бар или менее.

Содержащий кислород поток может быть под давлением, не превышающим 10 бар.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1А - блок-схема системы и способа выработки энергии в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 1Б - блок-схема системы и способа выработки энергии в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 1В - блок-схема системы и способа выработки энергии в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 2 - блок-схема системы и способа выработки энергии в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 3 - вид частичного сечения нагревателя выхлопного потока турбины с использованием ионитовой мембраны в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 4 - вид частичного сечения части нагревателя выхлопного потока турбины с использованием ионитовой мембраны, показанной на фиг. 3;

на фиг. 5 - вид частичного сечения трубы трубной конфигурации нагревателя с ионитовой мембраной в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 6 - вид частичного сечения части стенки нагревателя с ионитовой мембраной в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 7 - блок-схема системы и способа выработки энергии в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 8 - блок-схема системы и способа выработки энергии в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения.

Подробное описание осуществления изобретения

Настоящее изобретение будет описано ниже более подробно со ссылками на прилагаемые чертежи, на которых показаны некоторые (не все) варианты осуществления настоящего изобретения. Однако различные варианты осуществления изобретения могут быть осуществлены во многих других формах, и изобретение не должно рассматриваться ограниченным нижеописанными вариантами, которые приводятся прежде всего для обеспечения полноты и наглядности описания и представления в полной мере сущности и объема изобретения для специалистов в данной области техники. Например, если не указано иное, то при описании некоторых элементов как первый, второй и т.д., это не должно пониматься как указание определенного порядка. Кроме того, если указано, что первый элемент может быть расположен над вторым элементом, то, если не указано иное, вместо этого первый элемент может быть расположен под вторым; аналогичным образом, если указано, что первый элемент расположен слева от второго элемента, то вместо этого первый элемент может быть справа от второго элемента. Формы единственного числа, использованные в описании и в прилагаемой формуле изобретения, не исключают множественного числа, если только в явной форме не указано иное. Одинаковые ссылочные номера на всех чертежах относятся к одинаковым элементам.

Настоящее изобретение относится к системам и способам выработки энергии с использованием камеры сгорания с ионитовой мембраной (ИМ). Такая камера сгорания с ИМ может быть скомплексирована с самыми разными элементами для обеспечения систем и способов выработки энергии. Неограничивающие примеры элементов, которые могут быть включены в систему выработки энергии по настоящему изобретению, описаны в патентах US 8596075, 8776532, 8959887, 8986002, 9068743, 9416728, 9546814 и в публикациях патентных заявок US 2012/0067054 и 2013/0213049, содержание которых вводится ссылкой в настоящую заявку. Таким образом, системы и способы, раскрытые в настоящей заявке, могут включать любые комбинации вариантов, описанных в вышеуказанных документах.

Для высокоэффективного производства энергии в способе сжигания топлива с кислородом, в котором в качестве рабочей текучей среды используется CO_2 , может потребоваться отдельная станция криогенного разделения воздуха для получения кислорода. При этом кислород должен подаваться в камеру сгорания с регулированием его молярной концентрации от примерно 20 до примерно 30% и с предварительным нагревом до температуры, как правило, превышающей 700°C . Кислород разбавляют CO_2 , что требует использования отдельной группы компрессоров для смеси O_2/CO_2 , или, в альтернативных вариантах, более сложной установки криогенного разделения воздуха, обеспечивающей чистый кислород с давлением, подходящим для его подачи в камеру сгорания, причем такая установка потребляет гораздо больше энергии. Кроме того, метан, используемый в качестве топлива в таких циклах, должен быть сжат до давления примерно 305 бар с использованием компрессора высокого давления.

В одном или нескольких вариантах осуществления настоящего изобретения необходимость использования одного или нескольких таких элементов может быть исключена за счет использования камеры сгорания с ИМ. Кроме того, в настоящем изобретении предлагаются различные циклы выработки энергии, в которых используется камера сгорания с ИМ в качестве единственного источника кислорода и/или в качестве единственного элемента сжигания топлива, а также циклы, в которых камера сгорания с ИМ может быть скомплексирована с другими источниками кислорода, такими как установка криогенного

разделения воздуха, и/или с одной или более различными камерами сгорания. Камера сгорания с ИМ может использоваться в системе с замкнутым циклом, с полужамкнутым циклом или с разомкнутым циклом.

На фиг. 1А показан иллюстративный вариант осуществления изобретения, в котором блок ионитовой мембраны (ИМ) 184, работающий при температурах, превышающих 700°C , используется для подачи тепла (Q) в цикл 193 выработки энергии. Цикл 193 выработки энергии может быть любым циклом, в котором рабочую текучую среду (например, H_2O , CO_2 или N_2) многократно нагревают и охлаждают для получения энергии. Цикл 193 выработки энергии может включать любое количество стадий нагрева и охлаждения, а также любое количество стадий сжатия и расширения. Как можно видеть, в блок 184 ИМ подается поток 178 входящего воздуха и поток 112 газообразного топлива (например, CH_4). Внутри блока 184 ИМ кислород 105 диффундирует из потока 178 воздуха в поток 112 газообразного топлива, которое сжигается. Поток 112 газообразного топлива может быть дополнительно (но не обязательно) разбавлен инертным газом, таким как CO_2 . Предпочтительно большая часть O_2 (например, более 50, более 70 или более 80 мол.%), содержащегося в потоке 178 входящего воздуха, отделяется в блоке 184 ИМ, и из него выходит поток 179 воздуха с низким содержанием кислорода ("поток обедненного воздуха"). Поток 181 продуктов сгорания, который может содержать по существу только CO_2 и H_2O , или может содержать также другие загрязняющие примеси (в зависимости от используемого топлива), также выходит из блока 184 ИМ, и этот поток продуктов сгорания может быть пропущен через турбину для выработки энергии, затем может быть выпущен в атмосферу или обработан с использованием различных средств, известных в технике. Система, показанная на фиг. 1А, может быть особенно эффективна для обеспечения тепла от блока 184 ИМ в системе выработки энергии с замкнутым циклом.

В другом иллюстративном варианте, показанном на фиг. 1Б, блок 184 ИМ используется в системе с полужамкнутым циклом. Как можно видеть на фиг. 1Б, блок 184 ИМ связан с циклом 193 выработки энергии таким образом, что поток 180 рабочей текучей среды направляется непосредственно через блок ИМ. В одном из вариантов рабочая текучая среда может содержать CO_2 или может состоять по существу полностью из CO_2 . В блок 184 ИМ подается поток 178 входящего воздуха и поток 112 газообразного топлива (например, CH_4), который может подаваться непосредственно в блок ИМ или может быть добавлен в поток 180 рабочей текучей среды. Как и в предыдущем случае, внутри блока 184 ИМ кислород 105 диффундирует из потока 178 воздуха в смесь потока 112 газообразного топлива и рабочей текучей среды 180, так чтобы обеспечивалось сжигание газообразного топлива. Поток 179 обедненного воздуха выходит из блока 184 ИМ, и поток 181 продуктов сгорания выходит из блока 184 ИМ для дальнейшего использования в цикле 193 выработки энергии.

В одном или в нескольких вариантах система, показанная на фиг. 1Б, может содержать и другие элементы, которые могут модифицировать функцию блока ИМ. В некоторых вариантах блок ИМ может использоваться по существу только для обеспечения O_2 . Например, поток рабочей текучей среды, содержащий CO_2 , и поток воздуха могут быть пропущены через блок ИМ для обеспечения потока смеси O_2/CO_2 , который может быть подан в камеру сгорания для сжигания газообразного топлива. В других вариантах блок ИМ может работать по существу как устройство предварительного нагрева. Например, поток воздуха, поток рабочей текучей среды, содержащий CO_2 , и поток газообразного топлива могут быть пропущены через блок ИМ, так что поток рабочей текучей среды подогревается перед подачей в камеру сгорания вместе с газообразным топливом и O_2 (например, из установки разделения воздуха). В таких вариантах выше и/или ниже блока ИМ по потоку может быть расположен дополнительный нагревательный элемент (например, рекуперативный теплообменник). Такие варианты показаны схематично на фиг. 1В. Как можно видеть, поток 180 рабочей текучей среды может последовательно пропускаться через дополнительный (необязательный) теплообменник 101а, блок 184 ИМ, другой дополнительный (необязательный) теплообменник 101б и камеру 102 сгорания, из которой выходит поток продуктов сгорания. Таким образом, очевидно, что один или несколько вариантов схемы фиг. 1В могут быть соединены с системой, описанной со ссылками на фиг. 1Б.

В некоторых вариантах системы и способы по настоящему изобретению могут быть описаны со ссылками на блок-схему фиг. 2. На фиг. 2 приведена блок-схема системы, в которой используется одна турбина для расширения потока CO_2 высокого давления, нагретого в рекуперативном теплообменнике. Выхлопной поток турбины нагревается в нагревателе ИМ перед подачей в рекуперативный теплообменник, в котором этот поток нагревает поток CO_2 высокого давления.

Как показано на фиг. 2, в блок 284 ИМ подается поток 278 предварительно нагретого входящего воздуха, который поступает в блок ИМ с давлением примерно 1,25 бар и с температурой примерно 750°C . В блок 284 ИМ также подается предварительно нагретый выхлопной поток 280 турбины, который может содержать по существу только CO_2 , например, в количестве по меньшей мере 98, по меньшей мере 99 или по меньшей мере 99,5 мол.%, с давлением примерно 30 бар и с температурой примерно 750°C , смешанный с потоком 212 CH_4 с давлением примерно 30 бар, который предварительно нагревается до температуры примерно 550°C в теплообменнике 201. Выхлопной поток 280 турбины и поток 212 CH_4 внутри блока 284 ИМ может указываться как объединенный поток CO_2/CH_4 . Поток 212 CH_4 отбирается непосредственно из трубопровода природного газа (поток 211), и в компрессоре высокого давления нет

необходимости. Следует понимать, что в некоторых вариантах могут обеспечиваться разные потоки CH_4 , например природный газ или другое углеродосодержащее газообразное топливо, и система может содержать компрессор CH_4 . Внутри блока 284 ИМ кислород диффундирует из потока 278 воздуха низкого давления в поток CO_2/CH_4 , давление в котором значительно выше, ввиду очень низкой равновесной концентрации кислорода на стороне CO_2/CH_4 при температурах между температурой примерно 750°C на входе и температурой примерно 1020°C на выходе, то есть в диапазоне $<10^{-15}$ бар.

В варианте, блок-схема которого приведена на фиг. 2, расчетная величина для диффузии кислорода составляет 90% от кислорода, содержащегося в подаваемом потоке 278 воздуха, который диффундирует через мембрану в блоке 284 ИМ, в результате чего формируется поток 279 обедненного выходящего воздуха с температурой 1020°C , которая по существу равна температуре потока 281 выходящего нагретого CO_2 , в котором весь CH_4 , поступающий в блок ИМ, окисляется с образованием CO_2 и H_2O . Предпочтительно входящие потоки, то есть, воздух, CO_2 и CH_4 , поступающие в блок 284 ИМ, имеют температуру примерно 700°C или более, например в диапазоне от примерно 700 до примерно 1200°C , от примерно 700 до примерно 1000°C или от примерно 700 до примерно 850°C , поскольку повышенные температуры способствуют подвижности ионов в кристаллической решетке смешанных перовскитоподобных оксидов керамической мембраны, используемой в блоке ИМ. Теплообменник 283 ИМ предварительного нагрева обеспечивается для нагрева потока 274 воздуха с давлением примерно 1,3 бар и температурой примерно $682,6^\circ\text{C}$ и выхлопного потока 209 турбины с давлением примерно 30 бар и температурой примерно $506,5^\circ\text{C}$ до входной температуры ИМ, равной 750°C в рассматриваемом варианте. В одном или нескольких вариантах давление потока 209 на выходе турбины может быть примерно 100 бар или менее, примерно 80 бар или менее, примерно 60 бар или менее, или примерно 40 бар или менее, например до 1 бар. Давление на выходе может быть, например, в диапазоне от примерно 1 до примерно 80 бар, от примерно 5 до примерно 70 бар, от примерно 10 до примерно 60 бар, от примерно 15 до примерно 50 бар или от примерно 20 до примерно 40 бар. Поток 275 обедненного воздуха и поток 282 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ выходят из устройства 283 предварительного нагрева с температурой примерно 840°C .

Поток 282 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ с давлением примерно 29,7 бар охлаждается в рекуперативном теплообменнике 201 и выходит в форме потока 213 с температурой примерно 75°C . Этот поток охлаждается дополнительно до примерно 20°C циркулирующей водой в охладителе 215 с непосредственным контактом, содержащем секцию с насадкой и систему циркуляции воды, содержащую насос 216, теплообменник 217 косвенного охлаждения воды и потоки 219, 220 и 221. Охладитель 215 с непосредственным контактом действует в качестве сепаратора для отделения избыточной воды, образующейся при сгорании CH_4 , и эта вода выводится в форме потока 218. Таким образом, охладитель 215 с непосредственным контактом может обеспечивать по существу чистый CO_2 с концентрацией, например, по меньшей мере 98, по меньшей мере 99 или по меньшей мере 99,5 мол.%, выходящий из охладителя в форме охлажденного потока. Поток выходящего охлажденного CO_2 разделяется. Поток 261 чистого CO_2 , получаемого из CO_2 , образующегося при окислении CH_4 , выводится из системы. В частности, чистый CO_2 может быть выведен для захоронения, для повышения нефтеотдачи пласта, для продажи или для иного использования конечными потребителями. Давление остального потока 222 рециркулируемого CO_2 повышают с помощью двухступенчатого компрессора, причем поток 238, выходящий из компрессора 259 первой ступени, охлаждается в промежуточном охладителе 260 перед подачей в компрессор 225 второй ступени, из которого он выходит в форме потока 227 второй ступени с давлением примерно 70 бар. Часть 235 потока 227 второй ступени с температурой примерно 51°C и давлением примерно 70 бар отбирают и повышают его давление в компрессоре 236 адиабатического сжатия до давления примерно 304 бар и температуры примерно $183,2^\circ\text{C}$ (выходящий поток 237). Как это будет описано ниже, компрессор 236 адиабатического сжатия может использоваться в качестве источника дополнительного тепла для нагрева рециркулируемого CO_2 в потоке 230 в теплообменнике 201. Остальную часть потока 227 охлаждают до температуры примерно 18°C в теплообменнике 226 с водяным охлаждением, из которого он выходит в форме потока 228, представляющего собой текучую среду CO_2 высокой плотности в сверхкритическом состоянии. Давление этого потока повышают до примерно 304 бар в многоступенчатом центробежном насосе 229. В одном или в нескольких вариантах давление рециркулируемого CO_2 , выходящего из многоступенчатого центробежного насоса 229, может быть примерно 150 бар или более, примерно 200 бар или более, примерно 250 бар или более, или примерно 300 бар или более, например от примерно 150 до примерно 500 бар, от примерно 200 до примерно 450 бар или примерно 250 до примерно 400 бар. Таким образом, рабочий поток, который расширяется в турбине 203, может иметь по существу давление, величина которого находится в одном из вышеуказанных диапазонов. Выходящий поток 230 с температурой примерно 37°C нагревается в рекуперативном теплообменнике 201 до температуры примерно 800°C охлаждающимся нагретым потоком 282 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$, который поступает в рекуперативный теплообменник с температурой примерно 840°C . Поток 237 горячего CO_2 на выходе компрессора поступает на вход теплообменника 201, где он смешивается с основным потоком 230 рециркулируемого CO_2 , так что он обеспечивает источник подаваемого извне тепла низкой температуры, необходимого для достижения высокого КПД цикла выработки энергии. Три ступени 259, 225 и 236 сжатия CO_2 являются частями одного компрессора CO_2 , которые установлены на одном валу с турбиной 203, и компрессор CO_2 приводится этой турбиной.

Весь поток 210 рециркулируемого CO_2 , который может указываться как рабочая текучая среда, содержащая CO_2 , нагреваемый до примерно 800°C в рекуперативном теплообменнике 201, подается в силовую турбину 203, которая приводит электрический генератор 204. Поток 275 обедненного воздуха с температурой примерно 840°C охлаждается в теплообменнике 277 потоком 273 входящего воздуха с температурой примерно 45°C , выходит в форме потока 276 охлажденного обедненного воздуха с температурой примерно 55°C и выбрасывается в атмосферу. Давление потока 270 входящего воздуха повышается нагнетателем 271, приводимым электродвигателем 272, так что его давление повышается до примерно 1,4 бар, и температура повышается до примерно 45°C . Для поддержания необходимых перепадов давления, как это указывается ниже в описании, в предпочтительных вариантах давление входящего воздуха повышают до величины, не превышающей 20 бар, не превышающей 15 бар, не превышающей 10 бар, не превышающей 5 бар, или не превышающей 2 бар, в зависимости от давления выхлопного потока турбины, то есть, потока CO_2/CH_4 , проходящего через ИМ напротив потока воздуха.

Температура на входе турбины 203 порядка 800°C может варьироваться в зависимости от температурного ограничения теплообменника 201 при рабочем давлении порядка 300 бар. В зависимости от расчетной максимальной величины напряжений секции горячего конца рекуперативного теплообменника 201 давление потока CO_2 высокого давления может быть в диапазоне от 200 до 400 бар, и температура на входе турбины может быть в диапазоне от примерно 700 до примерно 850°C . Уровень температуры на входе турбины порядка 800°C означает, что нет необходимости в обеспечении охлаждающего потока для ограничения температур лопаток турбины и кожуха высокого давления. В этом случае упрощается турбина, и отсутствие внутренней камеры сгорания удешевляет конструкцию без потери КПД, вызываемой смешиванием низкотемпературного охлаждающего CO_2 с высокотемпературным расширяющимся CO_2 .

Дополнительно (но не обязательно) может использоваться поток 285 рециркулируемого CO_2 , отбираемый из потока 222 рециркулируемого CO_2 , давление которого повышается нагнетателем 286 с низкой степенью сжатия, приводимым электродвигателем 290. Выходящий поток 287 нагревается до 800°C в рекуперативном теплообменнике 201, выходит из него в форме потока 288 и смешивается с выхлопным потоком 209 турбины для повышения его температуры. Назначение этого потока заключается в обеспечении возможности регулирования тепла, подаваемого в блок 284 ИМ и в теплообменник 283 предварительного нагрева, чтобы можно было варьировать температуру потока 278 воздуха и выхлопного потока 280 турбины на входе блока ИМ для обеспечения соответствия рабочим характеристикам ионитовой мембраны. В некоторых вариантах тепло, выделяющееся в блоке ИМ, может использоваться для обеспечения различных продуктов. Например, по меньшей мере часть тепла может использоваться для получения пара или других побочных продуктов.

Элементы, указанные при описании блок-схемы фиг. 2, такие как теплообменники, насосы, компрессоры, турбины, охладители и т.п., описаны в вышеуказанных патентах US 8596075, 8776532, 8959887, 8986002, 9068743, 9416728, 9546814 и в публикациях патентных заявок US 2012/0067054 и 2013/0213049, содержание которых вводится ссылкой в настоящую заявку, и такие элементы могут использоваться в любом из вариантов, раскрытых в настоящем описании.

В одном или в нескольких вариантах может использоваться блок ИМ (или камера сгорания с ИМ), показанный на фиг. 3-6. В нем используется ИМ, представляющая собой гладкую трубу круглого сечения, причем выхлопной поток турбины с давлением 30 бар вместе с топливом CH_4 проходит внутри трубы, а воздух низкого давления обтекает трубу снаружи. Трубчатая керамическая мембрана может быть изготовлена из смеси перовскитоподобных оксидов, которые описаны в различных публикациях; см., например, публикацию "ITM Oxygen Technology: Scale-Up Toward Clean Energy Applications", Repasky и др., International Pittsburgh Coal Conference, Питсбург, шт. Пенсильвания, 15-18.10.2012, и патент US 5447555, выданный Ye и др., содержание которых вводится ссылкой в настоящую заявку.

Как показано на фиг. 3 и 6, труба содержит слой 318 пористого перовскита с очень тонким непроницаемым диффузионным слоем 317 перовскитовой керамики на внешней поверхности трубы. Диффузия ионов кислорода происходит через этот тонкий слой 317 в диапазоне температур от 750 до 1020°C благодаря разнице равновесной концентрации ионов кислорода между стороной воздуха низкого давления и выхлопным потоком CO_2/CH_4 турбины высокого давления вместе с топливом внутри трубы. ИМ действует как короткозамкнутый электрохимический элемент питания с переносом электронов через ионы металла, обеспечивающие ионизацию молекул кислорода на поверхности раздела с воздухом, в то время как молекулы кислорода отдают свои электроны и выходят из керамического диффузионного слоя на поверхности раздела с CO_2/CH_4 . Скорость диффузии может быть вычислена по формуле

$$D \propto \ln [(P_1)/(P_2)] \times (1/t),$$

где D - скорость диффузии;

P_1 и P_2 - равновесные парциальные давления кислорода соответственно на сторонах воздуха и CO_2/CH_4 мембраны;

t - толщина диффузионного слоя 317 перовскита.

На фиг. 3 приведен схематический вид одного из вариантов интегрированной системы ИМ, содер-

жащейся в резервуаре 330 высокого давления. Система ИМ включает группу концентрических труб для прохождения различных потоков с диффузией кислорода через диффузионную мембрану. Как показано на виде сверху сечения фиг. 5, группа труб включает внешнюю металлическую трубу 309 и внутреннюю металлическую трубу 307, между которыми расположена труба 308 диффузионной мембраны, изготовленная из перовскитовой керамики, как это уже указывалось. Между внешней металлической трубой 309 и трубой 308 диффузионной мембраны формируется внешнее кольцевое пространство 310, и между внутренней металлической трубой 307 и трубой 308 диффузионной мембраны формируется внутреннее кольцевое пространство 311. Внутренняя металлическая труба 307 подвешена к верхней трубной решетке 302, труба 308 диффузионной мембраны подвешена к средней трубной решетке 304, и внешняя металлическая труба 309 подвешена к нижней трубной решетке 306.

Поток 314а подаваемой смеси CO_2/CH_4 с температурой 750°C поступает через патрубок 314 в пространство 303 и проходит вниз через внутренние кольцевые пространства 311а и 311b между внутренними металлическими трубами 307а и 307b и соответствующими трубами 308а и 308b диффузионной мембраны. Поток 313а нагретого воздуха с температурой примерно 750°C поступает через патрубок 313 в пространство 305 и проходит вниз через внешние кольцевые пространства 310а и 310b между трубами 308а и 308b диффузионной мембраны и металлическими трубами 309а и 309b большего диаметра, открытые на конце. Трубы 308а и 308b диффузионных мембран имеют запечатанные нижние концы 308с и 308d соответственно. Нагретая смесь CO_2/CH_4 проходит в направлении нижнего конца каждой трубы диффузионной мембраны и поступает в нижние концы внутренних металлических труб 307а и 307b, расположенных по центру внутри труб 308а и 308b диффузионных мембран. Кислород диффундирует через непроницаемый слой 317 перовскита и окисляет CH_4 , содержащийся в потоке 314 смеси CH_4/CO_2 , поступающем через патрубок 314, с высвобождением тепла сгорания, которое повышает температуру потока CH_4/CO_2 до 1020°C . Поток 312а горячего обедненного воздуха выходит из нижнего открытого конца внешних металлических труб 309а и 309b в нижнюю часть 316 резервуара 330 высокого давления с внутренней изоляцией, поднимается вверх через пространство 317 внутри резервуара 330 и выходит из патрубка 312, который расположен сразу же под нижней трубной решеткой 306. Такая конфигурация обеспечивает возможность свободного расширения вниз труб 308а и 308b диффузионных мембран, внутренних металлических труб 307а и 307b и внешних металлических труб 309а и 309b, по мере того как повышается температура внешней среды. Верхняя трубная решетка 302 имеет очень низкий перепад давлений на ней благодаря перепаду давлений на трубах 308а и 308b диффузионных мембран и на внутренних металлических трубах 307а и 307b. Она должна только удерживать вес внутренних металлических труб 307а и 307b. Верхняя поверхность верхней трубной решетки 302 должна быть термоизолированной, в то время как нижняя поверхность не имеет термоизоляции, так что верхняя трубная решетка остается при температуре примерно 750°C , то есть при температуре потока 314 смеси CO_2/CH_4 , поступающего в пространство 303 из патрубка 314. Проходы для внутренних металлических труб 307а и 307b в верхней трубной решетке 302 должны иметь изолирующие фланцы для предотвращения чрезмерного нагрева трубной решетки выходящим потоком с температурой 1020°C . Аккумулирующая полость 301 над верхней трубной решеткой 302 и выпускная труба 315 имеют внутреннюю термоизоляцию.

Нижняя трубная решетка 306 удерживает лишь вес внешних металлических труб 309а и 309b, через которые проходит воздух. На ней происходит минимальный перепад давлений благодаря падению давления при прохождении потока воздуха по внешним металлическим трубам 309а и 309b и в пространстве 317, прилегающем к стенке оболочки резервуара. Ее рабочая температура находится в диапазоне от 750°C (поток воздуха, входящего через патрубок 313) до 1020°C (поток обедненного воздуха, выходящего из патрубка 312). Нижняя часть нижней трубной решетки 306 может быть изолирована для удерживания ее температуры на уровне примерно 750°C . Перепад давлений на наиболее нагруженной средней трубной решетке 304 составляет примерно 30 бар при средней температуре примерно 750°C . В рассматриваемом варианте предполагается, что потоки воздуха и смеси CO_2/CH_4 , поступающие через патрубки 313 и 314 соответственно, имеют температуру примерно 750°C . Эта температура может быть понижена для обеспечения практически осуществимой конструкции трубных решеток за счет начальной низкой скорости диффузии в трубах 308а и 308b диффузионных мембран и соответственно увеличения длины труб или их количества. Критическим моментом конструкции является способ уплотнения труб 308а и 308b диффузионных мембран в средней трубной решетке 304, которая находится при температуре 750°C . Уплотнительные средства должны обеспечивать компенсацию существенной разницы между коэффициентами расширения труб 308а и 308b диффузионных мембран и металлической средней трубной решетки 304. Эта задача может быть выполнена, как показано на фиг. 4, прежде всего путем использования изолирующих металлических фланцев 321, окружающих трубу 308 диффузионной мембраны, которые присоединяются к средней трубной решетке 304 с использованием герметичного сварного шва. Соединение 320 между керамической трубой 308 и фланцем 321 осуществляется с помощью заполняющей массы металлического сплава, точка плавления которого выше температуры 750°C потоков входящего воздуха и смеси $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$, и который становится очень пластичным и легко деформируемым (с восстановлением формы), когда температура повышается, так что разница в расширении между фланцем и керамической трубой может компенсироваться без возникновения существенных напряжений, действующих на кера-

мическую трубу, или без возникновения пути утечки среды. Подходящим материалом является серебро или, возможно, сплав никеля с золотом или с палладием, температура плавления которого примерно 1000°C или выше. Следует отметить, что температуры, указанные в вышеприведенном описании, относятся в целом к температурам на входе и выходе блока 284 ИМ. На практике конструкция концентрических труб обеспечивает возможность теплопередачи между входящим потоком воздуха в пространстве 310 и обратным потоком воздуха в пространстве 317, прилегающем к стенке оболочки резервуара. Аналогично, поток нагретого CO_2 , проходящий через внутренние металлические трубы 307a и 307b, будет передавать тепло входящему потоку 313, проходящему вниз в кольцевом пространстве 311.

Возможны также и другие конфигурации блока ИМ. Например, различными организациями уже разработаны блоки ИМ, используемые в областях производства кислорода, сжигания газообразного топлива и производства синтетического газа $\text{H}_2 + \text{CO}$. Кроме того, хотя вышеприведенное описание относится к двум внутренним металлическим трубам 307a и 307b, к двум трубам 308a и 308b диффузионных мембран и к двум внешним металлическим трубам 309a и 309b, однако блок ИМ может содержать только одну из указанных труб или может содержать три или более таких труб.

Как уже указывалось, цикл выработки энергии, включающий блок ИМ, раскрытый в настоящем описании, может включать дополнительные элементы для сжатия, сжигания и/или расширения потока, содержащего рабочую текучую среду. В одном или в нескольких вариантах цикл выработки энергии, включающий блок ИМ и сконфигурированный для сжигания топлива, может также содержать газовую турбину. В таких вариантах выхлопной поток горячих газов из газовой турбины может использоваться в качестве источника кислорода в блоке ИМ и обеспечивать часть или все низкотемпературное тепло (например, с температурой ниже 400°C), которое может быть необходимо для обеспечения требуемых уровней КПД системы.

Иллюстративные варианты цикла выработки энергии, включающего блок ИМ и газовую турбину, становятся понятными после рассмотрения схемы фиг. 7. Как показано на блок-схеме фиг. 7, выхлопной поток одноступенчатой турбины пропускают через нагреватель ИМ, использующий горячий выхлопной содержащий кислород поток, который выходит из газовой турбины, для обеспечения части или всего кислорода, диффундирующего через ионитовую мембрану.

Как показано на фиг. 7, газовая турбина 542 с потоком 540 входящего воздуха и потоком 541 природного газа, приводит электрический генератор 543. Неограничивающим примером газовой турбины, которая может использоваться в целях настоящего изобретения, является турбина 6F.03 компании GE. В описываемых вариантах из газовой турбины 542 выходит выхлопной поток 574 с давлением примерно 1,03 бар и температурой примерно 601°C. Этот поток смешивается с потоком 589 предварительно нагретого подпиточного воздуха, и смешанный поток 591 поступает в теплообменник 585 с температурой примерно 595,2°C. Поток 591 содержит достаточное количество кислорода с учетом того, что 90% кислорода диффундирует через перовскитовую мембрану в камере сгорания 584 ИМ, для обеспечения сгорания CH_4 в выхлопном потоке турбины. На вход нагнетателя 587, приводимого электродвигателем 588, поступает поток 586 воздуха, выходящий из нагнетателя в форме выходящего потока 590 воздуха с температурой примерно 45°C и с давлением примерно 1,4 бар, который затем нагревается охлаждаемым выхлопным потоком 575 газовой турбины в теплообменнике 545 и выходит в форме потока 589 воздуха. Часть 546 потока рециркулируемого CO_2 с давлением 300 бар также нагревается в теплообменнике 545 и выходит из него в форме потока 592 с температурой примерно 183,2°C, который смешивается с потоком 537 горячего CO_2 , выходящим из компрессора примерно с такой же температурой, для получения общего обходного потока 544, который входит в рекуперативный теплообменник 501 и соединяется с основным рециркулируемым потоком CO_2 высокого давления. Выхлопной поток газовой турбины пропускается через шесть теплообменных секций, в которых его давление снижается от 1,03 бар на выходе газовой турбины до 0,68 бар на выходе теплообменника 545. Давление потока 547 повышается в нагнетателе 548, приводимом электродвигателем 549, до примерно 1,02 бар, и выхлопной поток 576 турбины выбрасывается в атмосферу.

В нагнетатель 584 с ИМ поступает поток 578 предварительно нагретого окислителя с температурой примерно 797°C и входной поток 580 турбины предварительно нагретого CO_2 с температурой примерно 750°C, который смешан с потоком 512 предварительно нагретого CH_4 , выходящего из рекуперативного теплообменника 501 с температурой примерно 550°C. Поток 512 CH_4 отбирается непосредственно из трубопровода природного газа (поток 511), и в компрессоре высокого давления нет необходимости. Такое смешивание может быть эффективно для предотвращения реакции риформинга между метаном и CO_2 , которая могла бы привести к охлаждению газа CO_2 ниже требуемой величины на входе камеры сгорания с ИМ, которая должна превышать 700°C для обеспечения быстрой диффузии кислорода. Теплообменники 583, 585 и 596 предназначены для повышения температуры выхлопного потока 509 CO_2 , выходящего из турбины 503 с температурой примерно 506,5°C, до температуры примерно 750°C на входе камеры 584 сгорания с ИМ, в то время как температура выхлопного потока газовой турбины вместе с потоком воздуха (поток 591) повышается от примерно 597°C до примерно 797°C. Выхлопной поток 509 турбины, содержащий CO_2 , пропускают через теплообменник 596 для формирования потока 550, который пропускают через теплообменник 583 для формирования потока 580, в который вводят поток 512. Поток

581, выходящий из камеры 584 сгорания с ИМ, пропускают обратно через теплообменник 583, и он выходит как поток 582, подаваемый в теплообменник 501. Поток 579, также выходящий из камеры 584 сгорания с ИМ, пропускают обратно через теплообменник 583, и он выходит в форме потока 552, который пропускают через теплообменник 585, из которого он выходит в форме потока 551, пропускаемого через теплообменник 596 и выходящего из него в форме потока 575.

Выхлопной поток 582 турбины, содержащий CO_2 , поступает в рекуперативный теплообменник 501, где он нагревается от температуры примерно $506,5^\circ\text{C}$ до температуры примерно 840°C . Поток 575, объединяющий выхлопной поток газовой турбины с низким содержанием кислорода и поток обедненного воздуха, поступает в устройство 545 предварительного нагрева с температурой примерно 520°C и обеспечивает низкотемпературное добавочное тепло, необходимое для достижения требуемых уровней КПД, и тепло, необходимое для предварительного нагрева потока 590 воздуха.

Выхлопной поток 582 турбины, содержащий CO_2 , выходит из рекуперативного теплообменника 501 в форме потока 513, который охлаждают в теплообменнике 514 с водяным охлаждением и затем охлаждающей водой в охладителе 515 непосредственного контакта, содержащем насадочную секцию и систему циркуляции воды, содержащую насос 516, водоохладитель 517 непрямого действия и потоки 519, 520 и 521. Избыточная вода, образующаяся в результате сгорания CH_4 , выводится в форме потока 518. Поток выходящего охлажденного CO_2 разделяется. Поток 561 чистого CO_2 , получаемого из CO_2 , образующегося при окислении CH_4 , выводится из системы. Давление остального потока 522 рециркулируемого CO_2 повышают с помощью двухступенчатого компрессора, содержащего компрессор 559 первой ступени и компрессор 525 второй ступени. Из потока, выходящего из компрессора 559 первой ступени, отбирают поток 528, охлаждаемый в промежуточном охладителе 560 перед его пропуском через компрессор 525 второй ступени для формирования второго потока 527 второй ступени. Давление другой части (поток 535) потока, выходящего из компрессора 559 первой ступени, повышается в компрессоре 536 адиабатического сжатия, и она выходит из него в форме потока 537, который соединяется с потоком 592 для формирования общего потока 544 CO_2 внешнего контура. Поток 527, выходящий из компрессора 525 второй ступени, охлаждается в теплообменнике 526, охлаждаемом водой, и выходит в форме потока 528, содержащем текучую среду CO_2 высокой плотности в сверхкритическом состоянии. Давление этого потока повышают с помощью многоступенчатого центробежного насоса 529. Поток, выходящий из многоступенчатого центробежного насоса 529, разделяется на выходящий поток 530 и поток 546 рециркулируемого CO_2 . Выходящий поток 530 нагревается в рекуперативном теплообменнике 501 выхлопным потоком 582 турбины, содержащим CO_2 , и соединяется с общим потоком 544 CO_2 внешнего контура для формирования потока 510, подаваемого с температурой 800°C в турбину 503 CO_2 , приводящую электрический генератор 504.

Добавление газовой турбины приводит к существенному повышению выходной мощности при том же общем КПД как и у цикла выработки энергии, который не содержит газовой турбины. В некоторых вариантах существующая энергетическая станция комбинированного цикла с газовой турбиной может быть модернизирована для осуществления цикла выработки энергии, в котором в качестве рабочей текучей среды используется рециркулируемый CO_2 , и который включает также вышеописанный блок ИМ. В этом случае может быть увеличена выходная мощность и выбросы CO_2 на 1 кВт вырабатываемого электричества могут быть существенно уменьшены до 65% для соответствия нормам выбросов CO_2 , ожидаемым в недалеком будущем.

Термический КПД предлагаемой системы может быть существенно улучшен за счет использования двухступенчатой турбины CO_2 с подогревом между ступенями. В турбину первой ступени поступает поток непосредственно из рекуперативного теплообменника, например, с температурой примерно 800°C и с давлением примерно 300 бар. Выхлопной поток турбины второй ступени поступает в рекуперативный теплообменник с температурой примерно 815°C и с давлением примерно 30 бар, причем этот поток нагревается в двух отдельных нагревателях ИМ, соединенных последовательно. В такой двухступенчатой системе температура на входе второй турбины может быть повышена до примерно 1000°C в теплообменнике среднего давления от нагретого выхлопного потока турбины с давлением 30 бар. Эта повышенная температура будет приемлема для промежуточного подогревателя с учетом выбора максимально допустимого среднего давления. Выбранное среднее давление в некоторых вариантах находится в диапазоне от примерно 70 до примерно 120 бар. Для рассматриваемого конкретного варианта выбранное среднее давление может составлять примерно 95 бар. Второй нагреватель с ИМ повышает температуру выхлопного потока турбины второй ступени с давлением 30 бар, выходящего из подогревателя, до примерно 815°C .

Другие варианты осуществления изобретения описаны со ссылками на фиг. 8. На фиг. 8 приведена блок-схема системы с двухступенчатой турбиной, причем оба выхлопных потока турбин нагреваются в нагревателях с ИМ, и нагретые выхлопные потоки используются для нагрева двух входных потоков турбин. Должно быть очевидно, что системы и способы по настоящему изобретению могут включать множество турбин и/или множество нагревателей ИМ. Более того, при необходимости множество нагревателей с ИМ могут быть соединены параллельно для обеспечения возможности снижения нагрузки на отдельные нагреватели.

КПД может быть повышен путем использования двух турбин, установленных последовательно и работающих при общем отношении давлений от примерно 300 до примерно 30 бар. Первая турбина 603, показанная на фиг. 8, работает с давлением на входе примерно 300 бар и с температурой примерно 800°C, причем входящий поток поступает непосредственно из рекуперативного теплообменника 601. Давление на выходе турбины находится в диапазоне от примерно 70 до примерно 120 бар. Такой диапазон давлений выбран для обеспечения давления на выходе достаточно низкого, чтобы выходной поток можно было нагреть в теплообменнике до примерно 1000°C, и все же достаточно высокого для максимизации выходной мощности турбины 632 второй ступени, выходной поток которой обычно имеет давление примерно 30 бар. Такая комбинация температур и давлений возможна при использовании теплообменников, изготовленных из современных сплавов с высоким содержанием никеля способом диффузионной сварки, как это осуществляется в теплообменниках компании HEATRIC. Указанное отношение давлений, а также очень высокие давления на входе и выходе турбины первой ступени могут также обеспечивать возможность использовать в неохлаждаемой первой ступени центробежное колесо с радиальным входящим потоком, а не турбину с аксиально расположенными лопатками, для систем с большой выходной мощностью, порядка 300 МВт или более. Для нижеописанных рабочих примеров расход турбины первой ступени равен 7,5 млн. фунт/ч. (3,4 млн. кг/ч.). Объемный расход на входе равен примерно 24700 м³/ч., что позволяет получить полезную выходную мощность 290 МВт для колеса центробежной турбины диаметром менее 1 м. Использование одного колеса турбины с радиальным потоком для первой ступени особенно подходит для малогабаритных станций. Выхлопной поток 634 турбины первой ступени с температурой от примерно 650 до примерно 750°C нагревают в теплообменнике 648 до температуры от примерно 900 до примерно 1100°C, и подают в качестве входного потока 639 в турбину 632 второй ступени. Тепло обеспечивается выхлопным потоком CO₂ (с давлением примерно 30 бар) турбины 632 второй ступени, который нагревается до температуры от примерно 900 до примерно 1100°C в первом нагревателе с ИМ. Затем выходной поток турбины второй ступени, выходящий из теплообменника, нагревают до температуры от примерно 810 до примерно 850°C во втором нагревателе с ИМ перед подачей в рекуперативный теплообменник для нагрева входного потока турбины первой ступени, содержащего CO₂, до примерно 800°C.

Поток 645 рециркулируемого CO₂ с давлением 300 бар и с температурой примерно 800°C поступает в турбину 603 первой ступени и выходит в форме потока 634 с давлением примерно 95 бар и с температурой примерно 691°C. Этот поток нагревается в теплообменнике 648 до температуры примерно 1010°C и поступает в форме потока 639 в турбину 632 второй ступени, из которой он выходит в форме потока 631 с давлением примерно 30 бар и с температурой примерно 799°C. Этот поток поступает в камеру 647 сгорания с ИМ первой ступени после смешивания с частью 652 потока 612 CH₄ с давлением примерно 30 бар и с температурой примерно 550°C, который был нагрет в рекуперативном теплообменнике 601. Поток 612 CH₄ отбирается непосредственно из трубопровода природного газа (поток 611), и в компрессоре высокого давления нет необходимости. Метан сжигается в камере 647 сгорания с использованием чистого кислорода, который диффундирует из предварительного нагретого потока 643 воздуха с давлением примерно 1,2 бар и температурой примерно 750°C. Поток 644 обедненного воздуха и нагретый выхлопной поток 654 турбины, выходящий из турбины 632 второй ступени, выходят из камеры 647 сгорания с ИМ с температурой примерно 1020°C и поступают в теплообменник 648 для обеспечения предварительного нагрева потока 639 для турбины 632 второй ступени.

Охлажденный выхлопной поток 609 турбины, выходящий из теплообменника 648 с температурой примерно 700°C, смешивают с частью 653 потока 612 CH₄ с температурой примерно 550°C и с давлением примерно 30 бар для формирования объединенного потока 655. Поток 642 входящего воздуха с давлением примерно 1,3 бар и с температурой примерно 666°C вместе с потоком 655 нагревают в устройстве 646 предварительного нагрева до температуры примерно 750°C. Поток 680 нагретого CO₂ и поток 678 нагретого воздуха выходят из устройства 646 предварительного нагрева и поступают в нагреватель 684 с ИМ с достаточно высокой температурой, оптимальной для обеспечения быстрой диффузии кислорода. Затем поток 681 сгоревшего и нагретого CO₂ и поток 679 обедненного воздуха, выходящие из нагревателя 684 с ИМ проходят через устройство 646 предварительного нагрева для обеспечения необходимого нагрева. Поток 678 воздуха, нагретого в устройстве 646 предварительного подогрева до температуры примерно 750°C, разделяется таким образом, что одна его часть обеспечивает кислород в камере 684 сгорания с ИМ, и остальной поток 643 обеспечивает кислород в первой камере 647 сгорания с ИМ. Потоки обедненного воздуха, выходящие из теплообменников 646 и 648 в форме потока 656 и потока 633 соответственно соединяют для формирования потока 675, который поступает в теплообменник 677 предварительного нагрева и выбрасывается в атмосферу в форме потока 676 с температурой примерно 55°C. Давление потока 670 входящего воздуха повышают до примерно 1,4 бар с помощью компрессора 671, приводимого электродвигателем 672. Поток 673, выходящий из компрессора 671, нагревается в теплообменнике 677 до температуры примерно 666°C и выходит в форме потока 642.

Поток 682 нагретого CO₂, выходящий из устройства 646 предварительного нагрева с температурой примерно 815°C, поступает в рекуперативный теплообменник 601, где он охлаждается до температуры примерно 75°C и выходит в форме потока 661. Боковой поток 658, отбираемый из потока 661, пропуска-

ют через теплообменник 650, так что он выходит в форме потока 657 с температурой примерно 25°C и соединяется с потоком 680 всего CO₂ с давлением примерно 29 бар, так что формируется полный поток 690 CO₂ и H₂O, поступающий в теплообменник 615 прямого охлаждения водой с противоточной насадочной секцией 624. В теплообменник 650 поступает поток 651 входящего CO₂ с температурой примерно 51°C и с давлением примерно 70 бар, причем поток 651 отбирается из потока 692, выходящего из компрессора 625 второй ступени рециркулируемого CO₂ с температурой примерно 70°C. Давление этого потока, содержащего примерно 5% всего рециркулируемого CO₂, повышается до примерно 96 бар, с повышением температуры до примерно 227°C в компрессоре 640, приводимом электродвигателем 649. Входящий поток 641 поступает в турбину 632 второй ступени для обеспечения внутреннего охлаждения. Следует отметить, что рабочая температура турбины 632 второй ступени требует внутреннего охлаждения лопаток турбины и внутреннего кожуха одновременно с обеспечением защитных покрытий внутренних частей, подвергающихся действию высоких температур. При этом используется система циркуляции воды, связанная с теплообменником 615 с водяным охлаждением и содержащая водяной насос и теплообменник 617 непрямого действия с водяным охлаждением с линиями 619, 620 и 621 циркуляции. Поток 618 чистой жидкой воды, извлекаемой из продуктов сгорания CH₄, выходит из основания охладителя 615 с непосредственным контактом.

Поток 622 охлажденного CO₂, выходящий из теплообменника 615 с водяным охлаждением с температурой примерно 18°C, разделяется на два потока. Поток 691 чистого товарного CO₂ выходит из системы с температурой примерно 18°C и с давлением примерно 29 бар. Давление основной части потока 622 охлажденного CO₂ с давлением примерно 29 бар повышают до примерно 45 бар с повышением температуры до примерно 51°C в компрессоре 659 первой ступени рециркулируемого CO₂. Выходящий поток разделяется на две части.

Примерно 59,4% всего потока 622 CO₂ охлаждается до примерно 18°C в промежуточном охладителе 660 второй ступени и выходит в форме потока 638, поступающего в компрессор 625 второй ступени рециркулируемого CO₂. Примерно 35,4% всего потока CO₂ в форме потока 635 поступает в компрессор 636 третьей ступени, из которого выходит поток 637 с температурой примерно 183,2°C и с давлением примерно 305 бар, который затем соединяется с основным потоком 630 рециркулируемого CO₂ с температурой примерно 183°C и с давлением примерно 300 бар в рекуперативном теплообменнике 601. Как и в предыдущем случае, компрессор 636 третьей ступени для сжатия CO₂ может работать в качестве источника дополнительного тепла, так что нагретый поток 637 обеспечивает низкотемпературный нагрев потока 630 рециркулируемого CO₂ в теплообменнике 601. Дополнительное тепло добавляется к рекуперативному нагреву потока 630 рециркулируемого CO₂ с использованием тепла потока 682, выходящего из блока 684 ИМ. Компрессоры 659, 625 и 636 рециркулируемого CO₂ представляют собой группу компрессоров, которые вращаются концом вала, выходящим из двух турбин 603 или 632, которые установлены внутри одного кожуха турбин. Турбины приводят электрический генератор 682. Поток 692, выходящий из компрессора 625 второй ступени с температурой примерно 51°C, разделяется на поток 651, который содержит примерно 5% исходного потока 622 и который становится охлаждающим потоком 641 для турбины 632, и на поток 627 остальной части рециркулируемого CO₂. Этот поток 627 охлаждается в теплообменнике 626 с водяным охлаждением до примерно 18°C для формирования потока 628 CO₂ в сверхкритическом состоянии с плотностью примерно 830 кг/м³. Давление потока CO₂ высокой плотности в сверхкритическом состоянии повышается в многоступенчатом центробежном насосе 629 до примерно 304 бар с повышением температуры до примерно 37°C. Затем выходящий поток 630 поступает в рекуперативный теплообменник 601, где он нагревается и становится основной частью входного потока первой турбины.

Для специалистов в данной области техники будет очевидно, что в описанную систему должны быть добавлены обводные линии, вентиляционные линии, линии продувочного газа, клапаны управления, вентиляционные отверстия, контрольно-измерительные линии и другие необходимые средства для обеспечения всех рабочих режимов и безопасных условий работы всех блоков. Например, в режиме запуска может быть необходим обход одного или нескольких теплообменников и/или одной или нескольких турбин, пока не будут достигнуты заданные рабочие характеристики (например, рабочая температура, давление, расход и т.п.).

В нижеприведенной таблице сравниваются системы 1, 2 и 3 (соответствующие вариантам, блок-схемы которых приведены на фиг. 2, 7 и 8 соответственно) с базовой системой, которая представляет собой традиционную систему выработки энергии с рециркулируемым CO₂ с системой криогенного разделения воздуха, работающей с характеристиками ISO и с кислородом, поступающим под давлением 305 бар непосредственно из установки разделения воздуха. Во всех системах полный расход CO₂, поступающего в турбину под давлением 300 бар, составляет 7,5×10⁶ фунт/ч. (77286,08 кг моль/ч.), и давление на входе первой турбины равно 300 бар. Давление на выходе одноступенчатой турбины составляет порядка 30 бар. В двухступенчатой турбине на выходе турбины первой ступени величина давления будет порядка 95 бар (примерно величина давления на входе турбины второй ступени), и на выходе турбины второй ступени величина давления будет порядка 30 бар. В качестве топлива использовался чистый метан. Весь товарный CO₂ производился с давлением 29 бар. Для систем 1, 2 и 3 потери в электрическом генераторе

и в трансформаторе были приняты равными 1% от полезной мощности на валу турбины.

Параметр	Базовая система	Система 1	Система 2	Система 3
Полезная выходная мощность (МВт)	292,23	235,53	325,87	285,90
КПД (для низшей теплоты сгорания)	57,24	53,31	53,49	59,56
Температура на входе турбины 1 (°C)	1154	800	800	800
Давление на входе турбины 1 (бары)	300	300	300	300
Температура на выходе турбины 1 (°C)	725,6	506,5	506,5	690,9
Давление на выходе турбины 1 (бары)	30	30	30	95
Температура на входе турбины 2 (°C)	--	--	--	973,1
Давление на входе турбины 2 (бары)	--	--	--	95
Температура на выходе турбины 2 (°C)	--	--	--	799
Давление на выходе турбины 2 (бары)	--	--	--	30
Паразитная мощность (МВт)	151,51	94,16	83,82	95,1
Полная мощность турбины (МВт)	441,84	329,69	329,69	381,0
Мощность газовой турбины	--	--	80	--
Извлечение CO ₂ (С в процентах в топливе CH ₄)	100	100	63,55	100

Специалисты в области техники, к которой относится настоящее изобретение, после ознакомления с существом изобретения, изложенным в вышеприведенном описании со ссылками на прилагаемые чертежи, могут предложить различные модификации рассмотренных в описании вариантов, а также другие варианты осуществления изобретения. Поэтому должно быть ясно, что объем изобретения не ограничивается конкретными рассмотренными примерами и что их модификации, а также и другие варианты охватываются объемом прилагаемой формулы изобретения. Хотя в настоящем описании используются специальные термины, они используются только в целях описания и никоим образом не ограничивают объем изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система выработки энергии, содержащая
 - вырабатывающую энергию турбину, выполненную с возможностью расширения потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO₂, для формирования выхлопного потока турбины и производства энергии;
 - источник содержащего кислород потока, выполненный для обеспечения содержащего кислород потока;
 - источник топлива, выполненный для введения топлива в выхлопной поток турбины;
 - систему ионитовой мембраны (ИМ), выполненную для приема выхлопного потока турбины с введенным топливом и для приема содержащего кислород потока, причем система ИМ обеспечивает диффузию кислорода из содержащего кислород потока в выхлопной поток турбины с введенным топливом, по меньшей мере, для частичного сжигания по меньшей мере части введенного топлива и обеспечения потока, содержащего нагретый CO₂;
 - сепаратор, выполненный для приема потока, содержащего CO₂, из рекуперативного теплообменника и выпуска потока по существу чистого CO₂;
 - по меньшей мере один компрессор, выполненный для сжатия по меньшей мере части по существу чистого CO₂ и обеспечения рециркулируемого CO₂; и
 - рекуперативный теплообменник, выполненный для передачи тепла от потока, содержащего нагретый CO₂, потоку рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO₂.
2. Система по п.1, содержащая по меньшей мере один источник дополнительного тепла, выполненный для добавления тепла потоку рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO₂, в дополнение к теплу, передаваемому из потока, содержащего CO₂.
3. Система по п.1, содержащая одно или оба из устройства предварительного нагрева содержащего кислород потока, выполненного для подогрева содержащего кислород потока выше системы ИМ по потоку, и устройства предварительного нагрева выхлопного потока турбины, выполненного для подогрева выхлопного потока турбины выше системы ИМ по потоку.
4. Система по п.1, в которой источник содержащего кислород потока представляет собой воздух.
5. Система по п.1, в которой источник содержащего кислород потока представляет собой выхлоп-

ной поток газовой турбины.

6. Система по п.1, в которой вырабатывающая энергию турбина содержит последовательность по меньшей мере двух турбин.

7. Система по п.1, содержащая, по меньшей мере, первую систему ИМ и вторую систему ИМ.

8. Система по п.1, в которой система ИМ содержит диффузионную мембрану, выполненную в форме трубы, имеющей внешнюю поверхность, сконфигурированную для контакта с содержащим кислород потоком, и внутреннюю поверхность, сконфигурированную для контакта с выхлопным потоком турбины с введенным топливом.

9. Система по п.8, в которой диффузионная мембрана, выполненная в форме трубы, имеет открытый верхний по потоку конец и закрытый нижний по потоку конец.

10. Система по п.8, в которой система ИМ содержит внутреннюю металлическую трубу, расположенную внутри диффузионной мембраны, выполненной в форме трубы.

11. Система по п.8, в которой система ИМ содержит внешнюю металлическую трубу, окружающую и концентричную относительно диффузионной мембраны, выполненной в форме трубы.

12. Система по п.8, в которой система ИМ содержит внешний резервуар высокого давления.

13. Способ выработки энергии с использованием системы по п.1, включающий расширение потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , в вырабатывающей энергию турбине для формирования выхлопного потока турбины и производства энергии и обеспечение содержащего кислород потока из источника содержащего кислород потока;

введение топлива из источника топлива в выхлопной поток турбины для формирования объединенного потока, содержащего выхлопной поток турбины и топливо;

пропускание содержащего кислород потока и объединенного потока, содержащего выхлопной поток турбины и топливо, через систему ионитовой мембраны (ИМ), обеспечивающую диффузию кислорода из содержащего кислород потока в объединенный поток, содержащий выхлопной поток турбины и топливо, по меньшей мере, для частичного сжигания по меньшей мере части топлива в объединенном потоке, содержащем выхлопной поток турбины и топливо, и обеспечения потока, содержащего нагретый CO_2 ;

очистку потока, содержащего CO_2 , для обеспечения потока по существу чистого CO_2 ;

сжатие по меньшей мере части по существу чистого CO_2 по меньшей мере в одном компрессоре для формирования рециркулируемого CO_2 и

нагрев потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , в рекуперативном теплообменнике с использованием тепла из потока, содержащего нагретый CO_2 , перед расширением потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , в вырабатывающей энергию турбине.

14. Способ по п.13, в котором по меньшей мере часть рециркулируемого CO_2 находится в сверхкритическом состоянии.

15. Способ по п.13, в котором давление потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , равно примерно 200 бар или более.

16. Способ по п.13, включающий нагрев потока рабочей среды, содержащей рециркулируемый CO_2 , с использованием дополнительного тепла от другого источника, помимо потока, содержащего нагретый CO_2 .

17. Способ по п.13, включающий нагрев одного или обоих из содержащего кислород потока и выхлопного потока турбины выше системы ИМ по потоку.

18. Способ по п.13, в котором источник содержащего кислород потока представляет собой воздух.

19. Способ по п.13, в котором источник содержащего кислород потока представляет собой выхлопной поток газовой турбины.

20. Система по п.13, в которой вырабатывающая энергию турбина содержит последовательность по меньшей мере двух турбин.

21. Способ по п.13, в котором система содержит, по меньшей мере, первую систему ИМ и вторую систему ИМ.

22. Способ по п.13, в котором система ИМ содержит диффузионную мембрану, выполненную в форме трубы, имеющей внешнюю поверхность, сконфигурированную для контакта с содержащим кислород потоком, и внутреннюю поверхность, сконфигурированную для контакта с выхлопным потоком турбины с введенным топливом.

23. Способ по п.22, в котором диффузионная мембрана, выполненная в форме трубы, имеет открытый верхний по потоку конец и закрытый нижний по потоку конец.

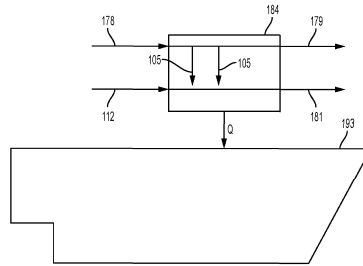
24. Способ по п.22, в котором система ИМ содержит внутреннюю металлическую трубу, расположенную внутри диффузионной мембраны, выполненной в форме трубы.

25. Способ по п.22, в котором система ИМ содержит внешнюю металлическую трубу, окружающую и концентричную относительно диффузионной мембраны, выполненной в форме трубы.

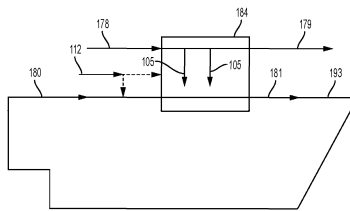
26. Способ по п.22, в котором система ИМ содержит внешний резервуар высокого давления.

27. Способ по п.13, в котором давление выхлопного потока турбины равно примерно 80 бар или менее.

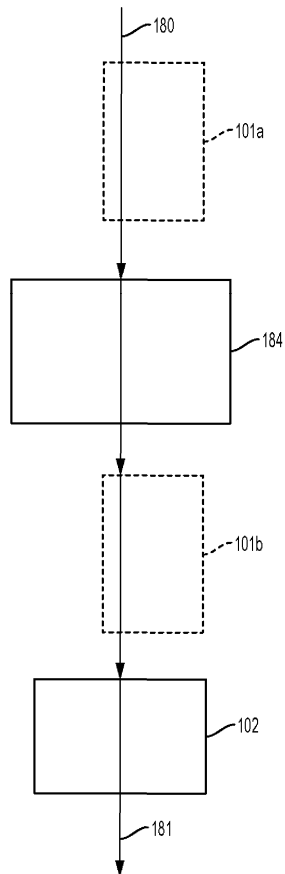
28. Способ по п.13, в котором давление содержащего кислород потока не превышает 10 бар.



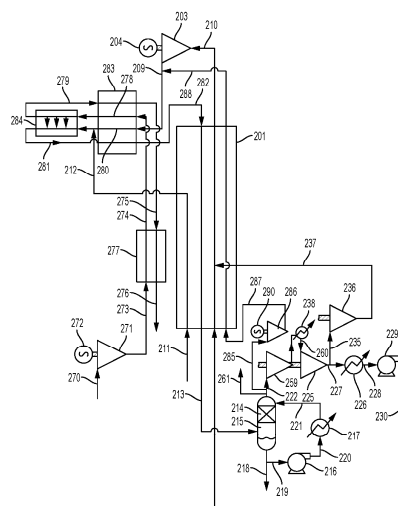
Фиг. 1А



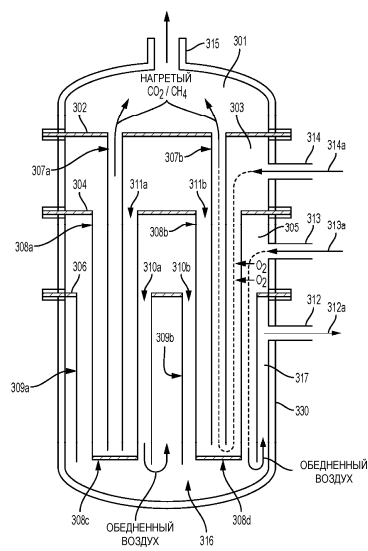
Фиг. 1Б



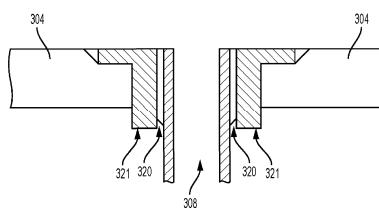
Фиг. 1В



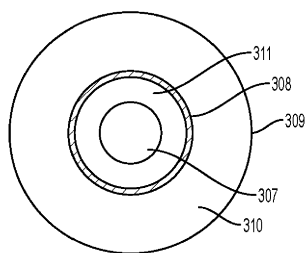
Фиг. 2



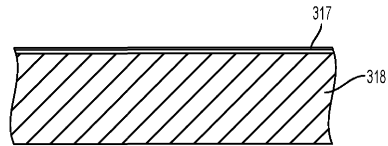
Фиг. 3



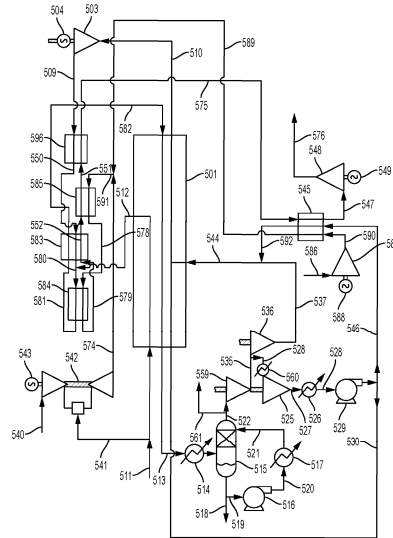
Фиг. 4



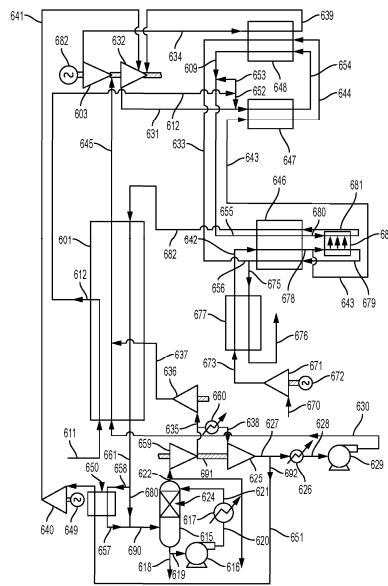
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8

