

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **039851**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.03.21

(21) Номер заявки
201990659

(22) Дата подачи заявки
2017.09.13

(51) Int. Cl. *C10J 3/46* (2006.01)
C10K 1/00 (2006.01)
C10K 1/32 (2006.01)
C10K 1/10 (2006.01)
C10K 1/04 (2006.01)
C10K 3/02 (2006.01)

(54) СИСТЕМА И СПОСОБ ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТИЧНОГО ОКИСЛЕНИЯ

(31) 62/393,752

(32) 2016.09.13

(33) US

(43) 2019.09.30

(86) PCT/IB2017/055538

(87) WO 2018/051251 2018.03.22

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

(56) US-A1-2013205746
US-A1-2011179799
US-A-5295350
US-A-5345756
EP-A1-818240
US-A1-2011229382
WO-A1-2006128286
US-A1-2010011664

(72) Изобретатель:
**Форрест Брок Алан, Лу Сицзя (US),
Аллам Родни Джон (GB), Фетведт
Джереми Эрон, Палмер Майлз Р. (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 патенте описана система выработки энергии, которая приспособлена для обеспечения высокоэффективного производства энергии с использованием частичного окисления твердого или жидкого топлива для формирования частично окисленного потока, содержащего газообразное топливо. Этот поток газообразного топлива может быть одним или более из быстро охлажденного, отфильтрованного и охлажденного потока перед направлением в качестве сжигаемого топлива в камеру сгорания системы выработки энергии. Поток частично окисленного топлива соединяют с потоком сжатого рециркулируемого CO₂ и с кислородом. Поток продуктов горения расширяется в турбине для получения энергии и пропускается через рекуперативный теплообменник. Расширенный и охлажденный поток, выходящий из рекуперативного теплообменника, может быть также обработан для обеспечения потока рециркулируемого CO₂, давление которого повышают и пропускают через один или несколько рекуперативных теплообменников таким образом, чтобы повысить КПД комбинированных систем.

039851 B1

039851 B1

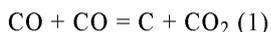
Область техники

Настоящее изобретение относится к системам и способам выработки энергии, такой как электрическая энергия, с использованием частичного окисления при сжигании топлива.

Уровень техники

Традиционные средства производства энергии путем сжигания топлива, как правило, не обеспечивают одновременного решения двух задач: производство энергии с высокой эффективностью и улавливание углерода. Этот недостаток усугубляется при использовании твердых топлив в реакции горения ввиду твердых частиц и инертного газообразного азота, остающихся в потоке продуктов горения. Соответственно, существует постоянно растущая потребность в создании систем и способов высокоэффективной выработки энергии, обеспечивающих снижение уровня выбросов CO₂ и/или улучшение возможностей удаления (изоляция) возникающего диоксида углерода.

В одной из публикаций в области высокоэффективной выработки энергии с улавливанием углерода, в патенте US 8596075, выданный Allam и др., раскрывается техническое решение, в котором твердое топливо, такое как уголь, лигнит, нефтяной кокс или биомасса, газифицируют с использованием реакции с кислородом и дополнительно с паром в реакторе частичного окисления, работающем при достаточно высоком давлении и при высокой температуре, для обеспечения возможности по существу полного преобразования твердого топлива в газообразное топливо, содержащее в основном оксид углерода и водород в качестве горючих компонентов вместе с загрязняющими продуктами горения, такими как H₂S, CS₂, сернистый карбонил (COS), HCN и NH₃. Частично окисленный газообразный продукт охлаждают, отделяют золу и дополнительно (но не обязательно) повышают его давление для обеспечения возможности введения в качестве топлива в камеру сгорания системы выработки энергии. Рабочее давление системы частичного окисления и системы выработки энергии может иметь такие величины, чтобы исключалась необходимость в повышении давления газообразного топлива. Камера сгорания системы выработки энергии работает в условиях избытка O₂ после реакции горения, в результате чего обеспечивается надежное преобразование загрязняющих продуктов горения из их восстановленного состояния в окисленные формы, содержащие преимущественно SO₂ и NO. Реактор частичного окисления может обеспечиваться стенками с испарительным охлаждением с использованием потока рециркулируемого CO₂ высокого давления, охлаждающего газообразный продукт частичного окисления перед удалением сажи при температуре примерно 800°C. Дальнейшее охлаждение газообразного продукта частичного окисления до температуры примерно 400°C необходимо для надежной конденсации всех мельчайших частиц золы вместе с затвердевшими летучими неорганическими компонентами и их фильтрации для предотвращения осаждения твердых частиц, коррозии и засорения оборудования, расположенного ниже по потоку. Охлаждение газообразного продукта частичного окисления от 800 до 400°C должно осуществляться в теплообменнике с трубами для газообразного продукта частичного окисления высокого давления, которые устойчивы к коррозии металла, возникающей в результате реакции Будуа формирования углерода и высокого парциального давления CO в газообразном продукте частичного окисления. Это выражается формулой (1):



Трубы должны быть выполнены с возможностью периодической промывки водой для удаления твердых отложений, возникающих в результате конденсации летучих неорганических компонентов, присутствующих в твердых топливах, в частности, в угле и в лигните.

Несмотря на достоинства, указанные в вышеуказанной публикации, раскрытые в ней системы и способы все-таки не обеспечивают наиболее эффективного решения проблем, возникающих при использовании твердых топлив в качестве источника получения энергии. Таким образом, по-прежнему существует необходимость в улучшенных системах и способах высокоэффективного сжигания твердых топлив с улавливанием углерода.

Сущность изобретения

В настоящем изобретении предлагаются системы и способы высокоэффективной выработки энергии путем сжигания топлив с одновременным улавливанием углерода. В частности, в раскрытых системах и способах может использоваться реактор частичного окисления (ЧО или POX, от англ. partial oxidation), в котором сжигается топливо для получения потока ЧО, содержащего продукты частичного окисления. Поток ЧО может быть направлен в камеру (устройство) сгорания, в которой по меньшей мере некоторые продукты частичного окисления окисляются по существу полностью для получения потока продуктов сгорания.

Системы и способы выработки энергии, в которых используется частичное окисление, раскрываются, например, в патенте US 8776532, выданном Allam и др., полное содержание которого вводится ссылкой в настоящую заявку. В настоящем изобретении предлагаются другие системы и способы, которые могут включать один или более элементов из вышеуказанного патента, однако предложенные системы и способы обеспечивают дополнительные положительные качества для высокоэффективной выработки энергии, включающей частичное окисление топлива с последующим сжиганием по меньшей мере части продуктов частичного окисления.

В вариантах осуществления настоящего изобретения реализуется предлагаемый способ выработки

энергии с использованием установки, объединяющей систему ЧО и систему выработки энергии (СВЭ или PPS, от англ. power production system), который включает по меньшей мере следующие стадии:

соединение твердого или жидкого топлива с кислородом в реакторе ЧО в условиях, достаточных для частичного окисления топлива и формирования потока ЧО, содержащего газообразное топливо, с первой температурой;

удаление из потока ЧО, содержащего газообразное топливо, по меньшей мере части любых твердых компонентов или газообразных компонентов, которые не составляют часть газообразного топлива, при этом указанное удаление осуществляют в скруббере;

обработку по меньшей мере части потока ЧО, содержащего газообразное топливо, отведенного из скруббера в реакторе гидролиза сернистого карбонила (COS), приспособленном для преобразования COS в H_2S , с получением потока преобразованного газообразного топлива;

охлаждение указанного потока преобразованного газообразного топлива, из реактора гидролиза сернистого карбонила в теплообменнике ЧО до второй, более низкой температуры;

очистку охлажденного потока ЧО, содержащего газообразное топливо, из теплообменника ЧО путем удаления из него жидкой воды и кислых газов, в результате чего формируется поток газообразного топлива;

повышение давления потока газообразного топлива до примерно 12 МПа или более;

сжигание потока газообразного топлива, полученного на предыдущей стадии, в камере сгорания СВЭ для формирования потока продуктов сгорания с давлением по меньшей мере примерно 10 МПа и с температурой по меньшей мере примерно $800^{\circ}C$;

расширение потока продуктов сгорания в турбине СВЭ для выработки энергии и формирования расширенного потока продуктов сгорания СВЭ;

пропускание расширенного потока продуктов сгорания СВЭ через рекуперативный теплообменник СВЭ для отбора тепла от потока продуктов сгорания СВЭ и формирования охлажденного потока продуктов сгорания СВЭ;

удаление по меньшей мере части одной или более загрязняющих примесей из охлажденного потока продуктов сгорания СВЭ для формирования потока рециркулируемого CO_2 ; и

повышение давления потока рециркулируемого CO_2 в компрессоре СВЭ для формирования потока сжатого рециркулируемого CO_2 .

В других вариантах вышеописанный способ может быть определен в отношении одного или нескольких следующих положений, которые могут быть объединены в любом количестве и в любом порядке.

Реактор ЧО может быть газификатором.

Реактор ЧО может быть реактором с псевдооживленным слоем.

Реактор ЧО может быть каталитическим реактором.

Способ может включать снижение температуры потока ЧО, содержащего газообразное топливо, до температуры, которая ниже первой температуры и выше второй температуры, перед охлаждением потока ЧО, содержащего газообразное топливо, в теплообменнике ЧО.

Стадия снижения температуры потока ЧО, содержащего газообразное топливо, может включать подачу текучей среды быстрого охлаждения в реактор ЧО.

Текучая среда быстрого охлаждения может включать одно или оба из воды и CO_2 .

Способ может включать также нагрев потока газообразного топлива после повышения давления и перед сжиганием.

Стадия нагрева потока газообразного топлива может включать его пропускание через рекуперативный теплообменник СВЭ.

Способ может включать также обеспечение подачи одного или обоих из пара и CO_2 в реактор ЧО.

Теплообменник ЧО может быть выполнен для отбора тепла от потока ЧО, содержащего газообразное топливо, одним или более из следующего: часть потока сжатого рециркулируемого CO_2 ; поток воды под давлением; поток азота; поток сжатого O_2 и CO_2 ; поток газообразного топлива.

Способ может включать также пропускание части потока ЧО, содержащего газообразное топливо, через реактор сдвига, сконфигурированный для преобразования смеси H_2 и CO_2 в смесь CO и H_2O или сконфигурированный для преобразования смеси CO и H_2O в смесь H_2 и CO_2 .

Способ может включать также смешивание части потока ЧО, содержащего газообразное топливо, с частью потока рециркулируемого CO_2 для формирования смеси и обработки этой смеси в реакторе сдвига.

Реактор сдвига может быть реверсивным реактором конверсии водяного газа.

Способ может включать также пропускание части потока ЧО, содержащего газообразное топливо, через установку низкотемпературной десульфуризации, выполненную для удаления одного или более из H_2S , COS и тяжелых металлов из потока ЧО, содержащего газообразное топливо.

Способ может включать также пропускание по меньшей мере части потока ЧО, содержащего газообразное топливо, через систему активированной адсорбции, выполненной для удаления ртути из потока ЧО, содержащего газообразное топливо.

Способ может включать также пропускание по крайней мере части потока газообразного топлива через установку удаления кислых газов, выполненную для отделения одного или обоих из по меньшей мере части любой H_2S и по меньшей мере части любого CO_2 , присутствующих в потоке газообразного топлива.

Способ может включать также пропускание по крайней мере части потока газообразного топлива через систему каталитического получения метана, выполненную для преобразования CO и H_2 в CH_4 и H_2O .

По меньшей мере часть потока сжатого рециркулируемого CO_2 может быть нагрета в рекуперативном теплообменнике СВЭ и направлена в камеру сгорания СВЭ.

Часть потока сжатого рециркулируемого CO_2 может быть направлена в теплообменник ЧО.

Поток сжатого рециркулируемого CO_2 , выходящий из теплообменника ЧО, может быть направлен в рекуперативный теплообменник СВЭ.

Часть потока сжатого рециркулируемого CO_2 может быть направлена в реактор ЧО.

Часть потока сжатого рециркулируемого CO_2 может быть соединена с твердым или жидким топливом перед соединением твердого или жидкого топлива с кислородом в реакторе ЧО.

Твердое или жидкое топливо может представлять собой суспензионное топливо, сформированное из твердого топлива, соединенного с жидким CO_2 или с CO_2 , находящимся в сверхкритическом состоянии.

В одном или более вариантах настоящее изобретение может также относиться к установке, выполненной для выработки энергии. В частности, установка представляет собой комбинацию системы частичного окисления (ЧО) и системы выработки энергии (СВЭ). Комбинированная установка может содержать комбинацию различных компонентов. Комбинированная установка может содержать, как минимум:

каталитический или некаталитический реактор ЧО, приспособленный для частичного окисления жидкого или твердого топлива в присутствии кислорода (и дополнительно (но не обязательно) пара, CO_2 и/или катализатора) для формирования потока ЧО, содержащего газообразное топливо;

один или несколько компонентов, приспособленных для обеспечения контакта потока ЧО с текучей средой быстрого охлаждения;

теплообменник ЧО, приспособленный для отбора тепла от потока ЧО одним или несколькими из части потока сжатого рециркулируемого CO_2 , потока воды высокого давления, потока азота из установки разделения воздуха, потока O_2/CO_2 высокого давления, а также очищенного и охлажденного газообразного топлива, и формирования на выходе охлажденного потока ЧО;

компрессор, приспособленный для повышения давления охлажденного потока ЧО (или газообразного топлива из потока ЧО) до величины примерно 10 МПа или более;

камеру сгорания СВЭ, приспособленную для сжигания газообразного топлива из потока ЧО в присутствии кислорода и части потока сжатого рециркулируемого CO_2 и формирования потока продуктов сгорания СВЭ с давлением примерно 10 МПа или более;

турбину, приспособленную для расширения потока продуктов сгорания СВЭ и выработки энергии в присоединенном генераторе;

рекуперативный теплообменник, приспособленный для отбора тепла от расширенного потока продуктов сгорания СВЭ и передачи этого тепла потоку сжатого рециркулируемого CO_2 ;

компрессор СВЭ, приспособленный для повышения давления потока рециркулируемого CO_2 до величины примерно 10 МПа или более и формирования потока сжатого рециркулируемого CO_2 ; и

компоненты (линии) потоков, приспособленные для передачи одного или более потоков в один или несколько компонентов комбинированной установки.

В некоторых вариантах комбинированная установка может содержать один или несколько дополнительных компонентов. Например, настоящее изобретение предусматривает, что в состав комбинированной установки входят не только вышеуказанные компоненты, но и другие, нижеуказанные компоненты, которые могут быть включены в любом порядке и в любом количестве. Таким образом, комбинированная установка может включать любой один, два, три или более из следующих компонентов:

высокотемпературный теплообменник, такой как радиационный или конвекционный охлаждающий аппарат, выполненный для рекуперации высокотемпературного тепла частично охлажденного потока ЧО (напр., потока ЧО с температурой примерно $900^\circ C$ или менее);

скруббер ЧО, приспособленный для отделения по меньшей мере части твердых частиц и/или растворимых кислых газов, которые присутствуют в охлажденном потоке ЧО;

фильтрующее устройство, приспособленное для удаления затвердевших частиц золы из однофазного охлажденного потока ЧО;

каталитический реактор сдвига, приспособленный для преобразования смеси H_2 и CO_2 в смесь CO и H_2O и/или для преобразования смеси CO и H_2O в смесь H_2 и CO_2 ;

реактор гидролиза COS , приспособленный для преобразования COS в H_2S ;

установка низкотемпературной десульфуризации, приспособленная для удаления H_2S , COS и тяжелых металлов из потока ЧО с использованием регенерируемого твердого сорбента;

сепаратор, приспособленный для отделения любой жидкой воды от потока ЧО система активированной адсорбции, приспособленная для удаления ртути из потока ЧО;

установка удаления кислых газов перед сжиганием топлива, приспособленная для отделения по меньшей мере части H_2S и/или CO_2 , присутствующих в потоке ЧО;

система каталитического получения метана, приспособленная для преобразования CO и H_2 в потоке ЧО (или в потоке газообразного топлива из потока ЧО) в CH_4 и H_2O ;

башенный скруббер СВЭ, приспособленный для отделения одного или более из H_2SO_4 , HNO_3 и солей Hg , растворимых в воде, от расширенного потока продуктов сгорания СВЭ и формирования на выходе потока рециркулируемого CO_2 ;

компоненты, приспособленные для направления части потока сжатого рециркулируемого CO_2 в теплообменник ЧО;

компоненты, приспособленные для направления части потока сжатого рециркулируемого CO_2 в рекуперативный теплообменник СВЭ;

компоненты, приспособленные для направления потока сжатого рециркулируемого CO_2 из теплообменника ЧО в рекуперативный теплообменник СВЭ;

компоненты, приспособленные для направления части потока сжатого рециркулируемого CO_2 в реактор ЧО, для регулирования рабочей температуры реактора ЧО; и

компоненты, приспособленные для направления части потока сжатого рециркулируемого CO_2 в систему подачи твердого топлива, для транспортировки порошкообразного твердого топлива в реактор ЧО.

В настоящем изобретении также предлагается установка выработки энергии, содержащая систему частичного окисления (ЧО) и систему выработки энергии (СВЭ), причем установка выработки энергии содержит:

реактор ЧО;

скруббер ЧО с впускным отверстием, сообщающимся по потоку (текучей среде) с выпускным отверстием реактора ЧО;

реактор гидролиза сернистого карбонила (COS) с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием скруббера ЧО;

теплообменник ЧО с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием реактора гидролиза сернистого карбонила;

водоотделитель ЧО с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием теплообменника ЧО;

система удаления кислых газов ЧО с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием водоотделителя;

компрессор ЧО с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием системы удаления кислых газов;

камера сгорания СВЭ с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием компрессора ЧО, причем камера сгорания СВЭ сконфигурирована для приема из него газообразного топлива;

турбина СВЭ с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием камеры сгорания СВЭ, причем турбина СВЭ сконфигурирована для приема из нее потока продуктов сгорания;

рекуперативный теплообменник СВЭ с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием турбины СВЭ;

сепаратор СВЭ с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием рекуперативного теплообменника СВЭ; и

компрессор СВЭ с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием сепаратора СВЭ.

В других вариантах установка выработки энергии может быть определена в отношении одного или нескольких следующих компонентов, которые могут быть объединены в любом количестве и любом порядке.

Установка выработки энергии может содержать также одно или более из: системы подачи твердого топлива; реактора сдвига; установки десульфуризации; установки активированной адсорбции; системы каталитического получения метана.

Установка выработки энергии может содержать также замкнутый контур теплопередачи между теплообменником ЧО и рекуперативным теплообменником СВЭ.

В установке выработки энергии может выполняться одно или более из следующих условий: водоотделитель ЧО имеет выпускное отверстие, сообщающееся по текучей среде с впускным отверстием реактора ЧО; компрессор СВЭ имеет выпускное отверстие, сообщающееся по текучей среде с впускным отверстием теплообменника ЧО; компрессор СВЭ имеет выпускное отверстие, сообщающееся по текучей среде с впускным отверстием рекуперативного теплообменника СВЭ.

Установка выработки энергии может содержать также одно или более из: одной или более линий для сообщения по текучей среде между компрессором СВЭ и теплообменником ЧО; одной или более линий для сообщения по текучей среде между компрессором СВЭ и рекуперативным теплообменником

СВЭ; одной или более линий для сообщения по текучей среды между компрессором СВЭ и реактором ЧО.

В одном или в нескольких вариантах для запуска установки выработки энергии может использоваться другое топливо. Например, в реакторе ЧО и/или в камере сгорания СВЭ может использоваться поток газообразного топлива, пока система ЧО и/или система СВЭ не выйдут на устойчивый режим работы.

Краткое описание чертежей

После вышеприведенного описания сущности изобретения ниже даются ссылки на прилагаемые чертежи, которые могут быть выполнены без соблюдения масштаба и на которых показано:

на фиг. 1 - блок-схема одного из вариантов комбинированной установки, содержащей системы ЧО и СВЭ по настоящему изобретению, в которой энергия вырабатывается из газообразного топлива, получаемого в результате частичного окисления жидкого или твердого углеводородного или углеродосодержащего топлива в системе ЧО;

на фиг. 2 - блок-схема части комбинированной установки, схема которой приведена на фиг. 1, причем на этой части подробно показаны элементы установки, подходящие для производства товарного H_2 или смесей H_2+CO ;

на фиг. 3 - блок-схема, иллюстрирующая расположение охлаждающего устройства в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 4 - блок-схема, иллюстрирующая расположение реактора сдвига, реактора гидролиза CO_2 и установки десульфуризации в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 5 - блок-схема, иллюстрирующая расположение системы удаления кислых газов, системы активированной абсорбции и системы каталитического получения метана в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 6 - блок-схема, иллюстрирующая замкнутый контур теплопередачи, сконфигурированный для передачи тепла между теплообменником системы ЧО и рекуперативным теплообменником СВЭ в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения.

Подробное описание осуществления изобретения

Настоящее изобретение будет описано ниже более полно на примерах различных вариантов его осуществления. Эти варианты выбраны для более подробного и всестороннего описания изобретения, позволяющего исчерпывающим образом представить его объем для специалистов в данной области техники. Безусловно, изобретение может быть осуществлено во многих различных формах, и нижеприведенные варианты его осуществления не должны рассматриваться как ограничения его объема; приведенные варианты представлены прежде всего таким образом, чтобы настоящее описание соответствовало всем действующим нормативным требованиям. Формы единственного числа, использованные в тексте описания и прилагаемой формулы изобретения, не исключают множественного числа, если только в явной форме не указано иное.

Системы и способы по настоящему изобретению приспособлены для обеспечения частичного окисления углеводородсодержащего топлива, в частности, твердого топлива и/или жидкого топлива. Неограничивающие примеры топлив, которые могут использоваться в целях настоящего изобретения, включают уголь, лигнит, нефтяной кокс, битум, биомассу, морские водоросли, отсортированные твердые горючие отходы, асфальт, использованные шины, сырую нефть, другие жидкие топлива, содержащие зольные остатки, и им подобные материалы. Топливо может обеспечиваться в реакторе ЧО в форме мелких твердых частиц (порошок), очень вязкой жидкости или в форме брикетов.

В результате частичного окисления углеводородсодержащего топлива в реакторе ЧО формируется поток продуктов частичного окисления, который может быть охарактеризован в соответствии с входящими в него компонентами. В частности поток продуктов частичного окисления может содержать газообразное топливо, а также дополнительно (но не обязательно) один или несколько загрязняющих компонентов (окисляемые загрязнения и неокисляемые загрязнения). Газообразное топливо, отбираемое из потока, выходящего из реактора ЧО, может быть подано на вход камеры сгорания системы выработки энергии. Например, камера сгорания и соответствующий цикл выработки энергии, которые могут быть объединены с системами и способами по настоящему изобретению, раскрыты в патенте US № 8596075, выданном Allam и др., содержание которого включается ссылкой в настоящую заявку. Такая камера сгорания и соответствующий цикл выработки энергии может указываться в настоящем описании как "цикл Аллама". В способе, в котором используется цикл Аллама, выработка энергии осуществляется с использованием преимущественно CO_2 в качестве рабочей текучей среды. В частности, в способе используется турбина, в которой происходит расширение смеси рециркулируемого потока CO_2 высокого давления и продуктов сгорания топлива. В качестве окислителя в процессе горения может использоваться чистый кислород. Горячий выхлопной поток турбины используется для частичного предварительного подогрева потока рециркулируемого CO_2 высокого давления. Кроме горячего выхлопного потока турбины для подогрева потока рециркулируемого CO_2 также используется дополнительное тепло. Например, может использоваться энергия сжатия воздуха, подаваемого на станцию получения O_2 . Все загрязняющие компоненты топлива и загрязнения, возникающие в результате сгорания, такие как соединения серы, NO , NO_2 , CO_2 ,

H₂O, Hg и им подобные компоненты, могут быть отделены для обезвреживания (захоронения), так что исключается выброс вредных веществ в атмосферу.

Системы и способы по настоящему изобретению могут быть совершенно определенно охарактеризованы как комбинация системы ЧО с системой СВЭ. Цикл Аллама - это пример системы СВЭ, которая может использоваться в соответствии с настоящим изобретением. В частности газообразное топливо из потока, выходящего из реактора ЧО, может быть введено в камеру сгорания системы СВЭ как часть потока (или весь поток) топлива, подаваемого в камеру сгорания. В цикле горения с высоким давлением газообразное топливо из потока реактора ЧО должно быть в общем случае сжато для повышения давления до величины, необходимой для камеры сгорания системы выработки энергии. Например, поток газообразного топлива системы ЧО может быть сжат в компрессоре до давления примерно 10 МПа или более, примерно 15 МПа или более, примерно 20 МПа или более, или примерно 25 МПа или более. В других вариантах давление может быть в диапазоне от примерно 8 МПа до примерно 50 МПа, от примерно 15 МПа до примерно 45 МПа, или от примерно 20 МПа до примерно 40 МПа.

Установка, объединяющая системы ЧО и СВЭ, описана в патенте US 8776532, выданном Allam и др., содержание которого включается ссылкой в настоящую заявку. Системы и способы по настоящему изобретению могут включать самые разные варианты систем и способов, рассмотренные в настоящем описании.

В результате реакции кислорода с твердым или жидким топливом может обеспечиваться поток системы ЧО, содержащий газообразное топливо, и этот поток может содержать различные количества твердых компонентов и расплавленных твердых компонентов, содержание которых зависит от типа используемого реактора ЧО, и которые могут быть удалены перед введением потока газообразного топлива в камеру сгорания СВЭ. В частности, поток системы ЧО может быть охлажден в необходимых случаях до температуры, при которой может обеспечиваться возможность удаления золы и других твердых материалов. Однако в некоторых случаях твердые материалы могут быть удалены до охлаждения. Это удаление может быть эффективным для предотвращения загрязнения оборудования систем ЧО и СВЭ, находящегося ниже по потоку. Тепло, высвобождаемое в процессе охлаждения выходного потока системы ЧО, может быть передано в систему выработки энергии для максимизации ее суммарного КПД. В частности, это тепло может быть использовано для частичного нагрева по меньшей мере части рециркулируемой текучей среды CO₂, используемой в системе выработки энергии, после охлаждения потока продуктов сгорания и перед подачей рециркулируемой текучей среды CO₂ в камеру сгорания системы выработки энергии. В частности, это тепло может быть передано рециркулируемой текучей среде CO₂ после ее сжатия. Дополнительно (но не обязательно) поток кислорода, необходимого для реактора ЧО и/или для камеры сгорания системы выработки энергии, может быть также нагрет охлаждаемым выходным потоком системы ЧО в том же или в другом теплообменнике.

Реактор ЧО, используемый в соответствии с настоящим изобретением, может быть любым известным реактором, который подходит для формирования газов частичного сгорания. Например, могут использоваться газификаторы, подходящие для получения синтетического горючего газа. Аналогичным образом, могут использоваться реакторы с псевдооживленным слоем. Кроме того, может использоваться реактор с катализатором или реактор, в котором катализатор не используется. Поток, выходящий из реактора ЧО, может содержать газообразное топливо, как это будет описано ниже. Следует понимать, что термин "поток ЧО", используемый в настоящем описании, относится к потоку, выходящему из реактора ЧО и содержащему газообразное топливо, а также один или несколько загрязняющих материалов или негорючих газообразных материалов. Газообразное топливо может быть выделено из потока ЧО, например, путем удаления загрязняющих примесей, таких как твердые материалы, сера, металлы, вода, кислые газы и т.п. Поэтому поток ЧО может быть в достаточной степени обработан (напр., очищен и/или преобразован), так чтобы обеспечить газообразное топливо, которое может быть по существу чистым, то есть, может содержать по существу только компоненты, представляющие собой топливные газы, которые могут сгорать в камере сгорания СВЭ, как это описано ниже. Однако при необходимости может быть получен поток газообразного топлива, который включает горючие твердые компоненты и/или горючие жидкости, которые могут сгорать в камере сгорания СВЭ.

Реактор ЧО может быть приспособлен для обеспечения выходящего потока ЧО, имеющего первую температуру, и поток ЧО может быть охлажден до второй, более низкой температуры. В зависимости от типа используемого реактора ЧО выходящий из него поток, содержащий газообразное топливо, может иметь температуру примерно 1200°C или выше, примерно 1300°C или выше, или примерно 1400°C или выше. Более конкретно, температура может быть в диапазоне от примерно 1000°C до примерно 2000°C, от примерно 1200°C до примерно 1800°C, или от примерно 1300°C до примерно 1600°C. В других вариантах реактор ЧО может быть сконфигурирован для работы при существенно более низкой температуре. В некоторых вариантах выходной поток ЧО, содержащий газообразное топливо, может иметь температуру примерно 300°C или выше, примерно 400°C или выше, или примерно 500°C или выше. Более конкретно, температура может быть в диапазоне от примерно 300°C до примерно 1000°C, от примерно 350°C до примерно 900°C, или от примерно 400°C до примерно 800°C. В различных вариантах для охлаждения потока системы ЧО (и, соответственно, газообразного топлива, вводимого затем в камеру сгора-

ния), предпочтительно примерно до температуры окружающей среды, может использоваться одна или несколько стадий.

В одном или в нескольких вариантах поток ЧО, имеющий вышеуказанную температуру сразу на выходе реактора ЧО, может быть охлажден до меньшей температуры. Для охлаждения может использоваться один или несколько теплообменников. Вместо этого или дополнительно к этому, поток ЧО, содержащий газообразное топливо, может быть быстро охлажден путем введения охлаждающей текучей среды в реактор ЧО. Охлаждение и/или быстрое охлаждение может осуществляться до и/или после отделения твердых частиц из потока ЧО. В предпочтительных вариантах охлаждение и/или быстрое охлаждение снижает температуру потока газообразного топлива ЧО примерно на 100°C или более, примерно на 200°C или более, примерно на 300°C или более, примерно на 400°C или более, или примерно на 500°C или более. В некоторых вариантах быстрым охлаждением может считаться охлаждение потока ЧО до указанной второй, более низкой температуры. Однако, как это описывается ниже, быстрым охлаждением может считаться стадия промежуточного охлаждения, и поток ЧО охлаждают до второй, более низкой температуры позднее.

Быстрое охлаждение может осуществляться путем смешивания потока ЧО с одной или несколькими охлаждающими текучими средами. Неограничивающие примеры охлаждающих текучих сред, которые могут быть использованы в целях настоящего изобретения, включают поток рециркулируемого продукта системы ЧО (то есть, газообразного топлива или потока ЧО, содержащего газообразное топливо и одну или несколько загрязняющих примесей), воду с температурой охлаждающей текучей среды, жидкий CO₂, их смеси и им подобные текучие среды. В некоторых вариантах, например, может использоваться газификатор порошкового топлива, подаваемого с помощью CO₂ или шлюзового бункера. В других вариантах могут использоваться другие по существу инертные газы, такие как, например, N₂. Подходящая температура охлаждающей текучей среды может составлять примерно 150°C или менее, примерно 100°C или менее, примерно 75°C или менее, или примерно 60°C или менее. В частности, температура охлаждающей текучей среды может быть в диапазоне от примерно 10°C до примерно 150°C, от примерно 15°C до примерно 100°C, или от примерно 20°C до примерно 75°C. В вариантах, в которых используется водяное охлаждение, часть воды может быть превращена в пар, в результате чего формируется смесь газообразного топлива, пара и жидкой воды, так что обеспечивается вымывание большого количества частиц золы. Температура всей жидкости и пара будет определяться давлением, используемым в реакторе ЧО, и количеством жидкой воды, используемой для быстрого охлаждения.

Поток, выходящий из камеры сгорания ЧО, может быть обработан для удаления по меньшей мере части любых твердых компонентов или газообразных компонентов, которые не являются частью газообразного топлива. Такая обработка может включать самые разные стадии очистки и/или преобразования.

В некоторых вариантах поток, выходящий из реактора ЧО (не охлажденный, или охлажденный с использованием быстрого или иного охлаждения), может быть обработан в реакторе гидролиза COS. Он может быть эффективен для преобразования COS в H₂S. Кроме того, поток ЧО может быть обработан в установке низкотемпературной десульфуризации. Она может быть эффективна для удаления H₂S, COS и тяжелых металлов из потока ЧО с использованием, например, регенерируемого твердого сорбирующего агента, такого как оксид цинка. Процессы гидролиза COS и десульфуризации могут осуществляться последовательно (в любом порядке), или же может осуществляться только один процесс.

В одном или нескольких вариантах система и способ по настоящему изобретению могут быть выполнены для отделения жидкой воды и существенной части частиц любой золы или других твердых частиц от охлажденного потока ЧО. Удаление твердых частиц может осуществляться с использованием любых традиционных средств разделения или фильтрации. Неограничивающие примеры подходящих технических средств для удаления твердых частиц включают циклонные фильтры, резервуары-отстойники, фильтровальные свечи, рукавные фильтры, промывные башни и им подобные устройства. Такие устройства могут быть выполнены для удаления твердых частиц и/или растворимых газов. Например, может использоваться скруббер с водяным орошением.

Охлаждение потока ЧО может включать выполнение нескольких стадий. Поток ЧО может быть сначала охлажден, затем из него могут быть удалены твердые частицы, и охлажденный поток может быть дополнительно охлажден, например, почти до температуры окружающей среды, с использованием одного или нескольких теплообменников. В частности, теплообменник ЧО может быть приспособлен для передачи тепла от потока ЧО, подвергнутому дополнительно быстрому охлаждению и/или иному охлаждению до температуры ниже температуры реактора ЧО, одной или более частям потока рециркулируемого CO₂ высокого давления, используемого в системе выработки энергии. Например, тепло может быть передано потоку рециркулируемого CO₂ высокого давления, отобранному с выхода компрессора рециркулируемого CO₂ и/или рекуперативному теплообменнику, который используется в цикле выработки энергии, в одной или нескольких соответствующих точках. Выбор температур для подачи тепла в рекуперативный теплообменник системы СВЭ, а также количество потоков, выходящих из этого теплообменника, для нагрева в устройстве охлаждения газообразного топлива, и их температура могут быть определены путем изменения процесса регенерации тепла для обеспечения максимальной температуры, соответствующей экономически целесообразным размерам теплообменника.

В некоторых вариантах способ по настоящему изобретению может включать частичное окисление твердого или жидкого топлива в реакторе ЧО для получения потока ЧО, содержащего газообразное топливо с первой температурой. Поток ЧО может быть дополнительно (но не обязательно) быстро охлажден до более низкой температуры в реакторе ЧО, в отдельной секции реактора ЧО или в отдельном резервуаре быстрого охлаждения. Поток ЧО, содержащий газообразное топливо, может быть обработан для удаления по меньшей мере части любых твердых компонентов или газообразных компонентов, которые не являются частью газообразного топлива. Например, поток ЧО может быть обработан с помощью скруббера. После этого поток ЧО может быть дополнительно обработан с помощью одного или нескольких реакторов сдвига, реактора гидролиза COS и установки низкотемпературной десульфуризации. Затем поток ЧО может быть охлажден в теплообменнике ЧО до второй, более низкой температуры. Затем охлажденный поток ЧО может быть очищен путем удаления из него воды и любых кислых газов. После этого по существу очищенный поток может считаться потоком газообразного топлива, полученным из потока ЧО. Однако следует понимать, что этот поток может быть точно так же указываться как поток ЧО, содержащий газообразное топливо, причем газообразное топливо составляет основную часть (в молярн.%) потока. Поток газообразного топлива может быть дополнительно обработан с использованием системы активированной абсорбции и/или системы каталитического получения метана. После этого давление газообразного топлива может быть повышено до величины, подходящей для подачи в камеру сгорания СВЭ.

Топливо, используемое в реакторе ЧО, может обеспечиваться в различных формах. В вышеуказанных вариантах твердое топливо может обеспечиваться в форме частиц, предпочтительно в состоянии тонкоизмельченного порошка, и может быть превращено в суспензию с использованием суспендирующей среды. В некоторых вариантах суспендирующая среда может включать, например, воду, жидкий CO_2 и их комбинации. Жидкий CO_2 может быть получен, по меньшей мере частично, из потока рециркулируемого CO_2 системы выработки энергии. Углеродосодержащее топливо, используемое в реакторе ЧО, может быть жидким, таким как, например, разогретый битум, и в этом случае отпадает необходимость в суспендирующей среде. В некоторых вариантах твердое топливо в состоянии порошка может быть смешано с CO_2 (и/или N_2) и подано в реактор ЧО, например, в газификатор с сухой подачей, в котором CO_2 используется в качестве подающего газа для шлюзового бункера.

Тепло, высвобождаемое при охлаждении быстро охлажденного потока ЧО, в теплообменнике после удаления золы, может быть передано одной или нескольким частям потока рециркулируемого CO_2 высокого давления, отбираемого из системы выработки энергии. Текучая среда быстрого охлаждения может быть рециркулируемым потоком ЧО, выходящим из холодного конца теплообменника ЧО, после отделения жидкой воды, или же она может быть сконденсированной и выведенной водой. Она также может быть комбинацией газообразного топлива и воды. В других вариантах она может быть рециркулируемым CO_2 или комбинацией газообразного топлива и/или воды с CO_2 . В других вариантах в качестве текучей среды быстрого охлаждения может использоваться поток азота, например, отбираемый из установки разделения воздуха. Кроме того, может использоваться поток O_2 и CO_2 высокого давления.

В некоторых вариантах источник текучей среды быстрого охлаждения может иметь особенное значение. В вариантах, в которых в качестве суспендирующей среды используется CO_2 , может образовываться вода из водорода и вода, имеющаяся в подаваемом твердом топливе (напр., в угле). Таким образом, выделенная жидкая вода может обрабатываться для отделения растворенных в ней горючих компонентов. Давление этих отделенных горючих компонентов может быть повышено, и они могут быть возвращены в камеру сгорания системы выработки энергии. Затем поток очищенной воды может быть возвращен в систему суспендирования твердого топлива или в систему быстрого охлаждения ЧО, и любое избыточное количество воды может быть направлено в систему выработки энергии, где она может использоваться для разбавления любых кислот $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$, образующихся в системе выработки энергии, как это описано в патенте US № 8596075, выданном Allam и др. В вариантах, в которых твердое топливо суспендируют водой, вода, присутствующая в высокотемпературном потоке ЧО, может реагировать с CO, возникающим при частичном окислении углерода в твердом топливе, в результате чего образуется газообразный водород и монооксид углерода. Отношение объемных концентраций H_2 и CO в потоке равно примерно 1:1.

Этот расход воды в реакции сдвига может указывать на недостаток воды, и в таком случае вода, получаемая в системе выработки энергии, может быть возвращена в систему ЧО для получения суспензии твердого топлива, например угля, и будет служить подпиточной водой для указанного расхода. Затем давление всего охлажденного потока ЧО (то есть, поток газообразного топлива) может быть повышено до величины, необходимой для сжигания в камере сгорания системы выработки энергии. В различных вариантах система и способ по настоящему изобретению могут быть приспособлены для получения внутренней текучей среды быстрого охлаждения для использования с высокотемпературным потоком, выходящим из реактора ЧО. Она может быть получена при выполнении последовательных стадий реакции ЧО, удаления твердых компонентов, теплообменного охлаждения и отделения воды. Все газообразное топливо из потока ЧО может быть сжато и подано в камеру сгорания системы выработки энергии со сравнительно высокой концентрацией горючих газов (напр., H_2 и CO) и теплотворной способностью,

которая будет обеспечивать эффективные условия сгорания в камере сгорания системы выработки энергии.

В одном или в нескольких вариантах может использоваться реверсивный реактор конверсии водяного газа. Например, в некоторых вариантах часть потока рециркулируемого CO_2 из системы СВЭ может быть соединена по меньшей мере с частью потока ЧО (или газообразного топлива из потока ЧО), и они могут быть направлены совместно в реверсивный реактор конверсии водяного газа. Это может быть эффективно для преобразования CO_2 и H_2 в CO и H_2O .

В некоторых вариантах реактор ЧО по настоящему изобретению может быть приспособлен для работы при давлении, которое превышает давление в камере сгорания системы выработки энергии. В частности, в камере сгорания системы выработки энергии в качестве рабочей текучей среды может использоваться CO_2 , который непрерывно циркулирует в системе. Предпочтительно поток системы ЧО может быть охлажден посредством вышеуказанного теплообмена с использованием охлажденного потока ЧО или воды в качестве среды быстрого охлаждения, и охлажденный поток ЧО (то есть, газообразное топливо) может использоваться в системе выработки энергии без необходимости дополнительного повышения его давления. В качестве реактора ЧО может использоваться любой реактор, приспособленный для сжигания углеродосодержащего топлива, в частности, когда топливо окисляется в реакторе лишь частично, и когда реактор приспособлен для работы под давлением, превышающим рабочее давление в камере сгорания системы выработки энергии, как это указывается в настоящем описании. В иллюстративных неограничивающих вариантах в камере сгорания ЧО может использоваться охлаждение испарением, при котором охлаждающую текучую среду, такую как CO_2 , пропускают через пористый слой, окружающий камеру сгорания ЧО, что может быть особенно эффективным для предотвращения попадания золы на стенки с последующим ее спеканием. Иллюстративные варианты испарительного охлаждения, которые могут быть использованы в реакторе ЧО в соответствии с настоящим изобретением, описаны в публикациях патентных заявок № US 2010/0300063, Palmer и др., № US 2011/0083435, Palmer и др. и № US 2012/0073261, Palmer и др., содержание которых вводится ссылкой в настоящую заявку. В частности, камера сгорания ЧО может быть приспособлена для приема потока топлива и кислорода для горения топлива. Дополнительно (но не обязательно) реактор ЧО может содержать катализатор, и/или катализатор может вводиться в реактор ЧО, например, в смеси с топливом. В реактор ЧО дополнительно (но не обязательно) может быть подан поток пара.

В других вариантах реактор ЧО по настоящему изобретению может быть приспособлен для работы при давлении, которое ниже давления в камере сгорания системы выработки энергии. В таких вариантах давление потока газообразного топлива, полученного из потока ЧО для использования в качестве топлива в камере сгорания системы выработки энергии, может быть повышено перед вводом в эту камеру сгорания. При необходимости поток газообразного топлива может быть подогрет, например, при прохождении через один или более теплообменников, указанных в настоящем описании. В качестве реактора ЧО может использоваться любое подходящее оборудование, предлагаемое на рынке. Неограничивающие примеры таких реакторов, которые могут использоваться в целях настоящего изобретения, включают реактор компании Shell с подачей в него потока сухой угольной пыли, реактор компаний GE/Техасо с быстрым охлаждением, реактор компании Siemens с мембранными стенками быстрого охлаждения или другое аналогичное оборудование. Подходящие реакторы ЧО могут включать внутренние теплопередающие секции, поглощающие лучистое тепло, исходящее от горелки реактора ЧО. В других вариантах внутренние теплопередающие секции могут быть выполнены для нагрева за счет теплопроводности и/или конвекции тепла. В таких вариантах часть потока рециркулируемого CO_2 высокого давления из системы выработки энергии может быть нагрета и возвращена в систему СВЭ с более высокой температурой. Рециркулируемый поток, отбираемый из системы СВЭ для нагрева, как это уже было написано, может быть отобран с любым давлением, например, в диапазоне от примерно 10 бар до примерно 400 бар, и рециркулируемый поток может иметь любую температуру перед вышеуказанным нагревом, например, примерно 50°C или более (например, от примерно 50°C до примерно 500°C , или от примерно 100°C до примерно 400°C). Например, рециркулируемый CO_2 с температурой примерно 400°C может быть нагрет в реакторе ЧО до температуры, находящейся в диапазоне от примерно 450°C до примерно 600°C , и возвращен в рекуперативный теплообменник системы выработки энергии, где он может быть смешан с другой частью потока рециркулируемого CO_2 высокого давления с аналогичной температурой. В некоторых вариантах тепло может быть передано потоку воды высокого давления для получения насыщенного или перегретого пара.

Комбинация реактора ЧО с системой выработки энергии по настоящему изобретению может обеспечивать различные полезные возможности. Например, в указанной комбинации загрязняющие компоненты (такие как компоненты угля или другого твердого топлива, а также компоненты, возникающие в результате частичного окисления топлива) могут удерживаться в охлажденном потоке ЧО высокого давления, который поступает в камеру сгорания системы выработки энергии. Такие загрязняющие компоненты могут включать H_2S , COS , CS_2 , HCN , NH_3 , Hg . Указанные и другие загрязняющие компоненты могут окисляться в камере сгорания системы выработки энергии таким образом, что формируются, например, SO_2 , CO_2 , N_2 , NO и Hg , которые затем могут быть удалены из системы выработки энергии. На-

пример, поток воды, сконденсированной из выходного потока камеры сгорания системы выработки энергии, может быть кислым, содержащим одно или более из кислот HNO_3 , H_2SO_4 и растворенных неорганических солей, как это описано в патенте US № 8596075, выданном Allam и др. В одном или в нескольких вариантах по меньшей мере часть загрязняющих примесей может быть возвращена в систему ЧО. Например, вода, которая выходит из скруббера с водяным охлаждением, содержит NH_3 и HCN и может использоваться как подпиточная вода для системы суспензии уголь-вода, причем NH_3 и HCN обеспечивают дополнительную теплоту сгорания в реакторе ЧО. В другом варианте NH_3 может использоваться как часть системы удаления серы, в которой осуществляется горение аммиака для получения NO_x .

Переработка твердого топлива с использованием реактора ЧО вместо его непосредственной подачи в камеру сгорания системы выработки энергии может быть особенно полезна ввиду возможности удаления возможных загрязняющих продуктов реакции. Например, поток, выходящий из реактора ЧО может быть охлажден до температуры примерно 400°C или менее или до другой температуры, которая может обеспечивать, чтобы зола, возникающая в результате сгорания угля, а также другие загрязняющие примеси, возникающие при сгорании твердого топлива, были в твердой форме, так чтобы их можно было удалить. В предпочтительных вариантах твердые примеси могут быть удалены, так что их концентрации снижаются до очень низкой величины, а размеры остающихся частиц будут очень малыми, в результате чего будет существенно снижаться вероятность засорения и/или коррозии компонентов системы выработки энергии, таких как теплообменники, турбины, компрессоры и другие устройства.

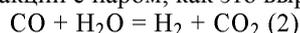
В дополнение к вышесказанному, быстрое охлаждение потока, выходящего из реактора ЧО, может выполняться таким образом, чтобы обеспечивался поток ЧО, быстро охлажденный ниже температуры, указанной в заявке, и достаточно низкой для обеспечения концентрации паровой фазы любых неорганических компонентов твердого топлива, достаточно низкой для предотвращения по существу их осаждения на одном или нескольких элементах системы выработки энергии. Например, при частичном окислении угля может образовываться одна или несколько солей металлов, включая NaCl , CaSO_4 и KCl , которые могут быть удалены, как это указывается в настоящей заявке. Хотя загрязняющие примеси в потоке ЧО можно сжигать в камере сгорания СВЭ, однако целесообразно осуществлять одну или несколько стадий очистки и/или преобразований, указанных в настоящем описании, для обеспечения газообразного топлива для камеры сгорания СВЭ, которое по существу является чистым, то есть, содержит газообразное топливо в количестве по меньшей мере 75 мол.%, по меньшей мере 90 мол.%, по меньшей мере 95 мол.% или по меньшей мере 99 мол.% (например, исключая воду несгораемые твердые компоненты, металлы и кислые газы).

Системы и способы по настоящему изобретению могут быть приспособлены для обеспечения получения по существу всего тепла, высвобождаемого в процессе охлаждения потока системы ЧО, предпочтительно охлаждения почти до температуры окружающей среды, и передачи этого тепла потоку рециркулируемого CO_2 высокого давления в системе выработки энергии. В частности, этот дополнительный нагрев может обеспечиваться при пониженной температуре в рекуперативном теплообменнике системы выработки энергии. Такое введение дополнительного тепла может обеспечивать существенное положительное влияние на общий КПД системы выработки энергии. Это влияние обуславливается гораздо более высокой теплоемкостью потока рециркулируемого CO_2 высокого давления в диапазоне пониженных температур от 50 до 400°C по сравнению с диапазоном температур от 400 до 800°C и более низкой теплоемкостью выхлопного потока турбины, который охлаждается в рекуперативном теплообменнике системы выработки энергии. Это отмеченное различие означает, что значительное дополнительное тепло необходимо в рекуперативном теплообменнике при температурах в диапазоне от 50 до 400°C для нагрева потока рециркулируемого CO_2 . Дополнительное тепло, отбираемое от быстро охлаждаемого потока системы ЧО в теплообменнике этого потока, обеспечивает эффективное количество дополнительного тепла для камеры сгорания системы выработки энергии, которое по существу эквивалентно количеству тепла, высвобождаемого при сгорании самого газообразного топлива.

В различных вариантах, в которых реактор ЧО охлаждают до состояния насыщения, используя поток рециркулируемой воды, кривая зависимости высвобождаемого тепла от температуры для охлаждения быстро охлажденного потока ЧО почти до температуры окружающей среды показывает высвобождение большого количества тепла на начальном этапе, когда водяной пар, полученный при испарении охлажденной воды, начинает конденсироваться. Это высвобождение тепла на единицу падения температуры постепенно снижается по мере охлаждения потока ЧО. Для получения указанного эффекта необходимо использовать два отдельных потока рециркулируемого CO_2 высокого давления, отбираемого из рециркулируемого потока высокого давления системы выработки энергии, чтобы извлечь тепло при охлаждении быстро охлажденного потока ЧО. В некоторых вариантах первый поток рециркулируемого CO_2 высокого давления может быть отобран из выходного потока компрессора рециркуляции CO_2 с температурой от примерно 45°C до примерно 70°C . Второй поток рециркулируемого CO_2 высокого давления может быть отобран из рециркулируемого потока высокого давления в той точке рекуперативного теплообменника, в которой температура близка к точке росы охлаждающего потока выхлопа турбины. Эти два потока вместе могут обеспечивать высвобождение на начальном этапе большого количества тепла

при охлаждении быстро охлажденного потока ЧО, по мере того как содержащаяся в нем вода начинает конденсироваться, и это тепло может быть эффективно возвращено потоку рециркулируемого CO_2 высокого давления на максимально возможном уровне температуры. В некоторых вариантах поток ЧО может быть частично быстро охлажден до первой температуры, например, до температуры примерно 900°C , примерно 700°C , примерно 500°C , или примерно 400°C . Если используется частичное быстрое охлаждение, существует диапазон охлаждения между температурой частичного быстрого охлаждения и точкой росы для воды быстро охлажденного потока ЧО, и для этого диапазона может потребоваться меньший расход рециркулируемого CO_2 высокого давления для эффективного удаления этой части тепла из быстро охлажденного потока ЧО по сравнению с диапазоном температур ниже точки росы для воды потока ЧО. Это может быть осуществлено путем отведения части потока рециркулируемого CO_2 высокого давления при температуре, близкой к температуре конденсации воды и/или ниже этой температуры быстро охлажденного потока ЧО, в то время как остальная часть отводится при температуре, близкой к температуре быстрого охлаждения и/или ниже этой температуры. Нагретые потоки рециркулируемого CO_2 высокого давления могут быть затем возвращены в рекуперативный теплообменник в соответствующей температурной точке в общий поток рециркулируемого CO_2 высокого давления в рекуперативном теплообменнике. В различных вариантах могут обеспечиваться различные возможности соединения указанных двух потоков с общим возвращаемым потоком в охлаждающем теплообменнике ЧО. В некоторых вариантах может использоваться более двух потоков рециркулируемой текучей среды высокого давления.

В некоторых вариантах газообразное топливо, отбираемое из реактора ЧО, с последующим быстрым охлаждением и удалением золы может содержать преимущественно H_2 , CO , CO_2 и H_2O с температурой от примерно 250°C до примерно 400°C . Для получения чистых H_2 , CO или их смесей с различными отношениями H_2 и CO может быть отобрана часть этого потока газообразного топлива. Типичные применения для H_2 , получаемого в промышленных масштабах, могут включать, например, гидродесульфуризацию и гидрокрекинг на нефтеперерабатывающих заводах и, потенциально, топливо для транспортных средств. Типичные применения для смесей H_2 и CO могут включать, например, производство жидких углеводородов по методу Фишера-Тропша (например, с отношением H_2 к CO примерно 2,2) и производство метанола (например, с отношением H_2 к CO примерно 2). В каждом случае отношение H_2 к CO должно быть повышено от отношения примерно 1 или менее в потоке ЧО (или в потоке газообразного топлива, отобранного из потока ЧО), причем это отношение зависит от использования CO_2 или воды в качестве суспендирующей среды для твердого топлива. Суспензия на основе воды газообразного продукта ЧО с увеличенным содержанием воды будет содержать значительную часть CO , преобразуемую в H_2 и CO_2 с отношением H_2 к CO несколько меньше 1. Суспензия на основе CO_2 имеет гораздо меньшую величину отношения H_2 к CO . Может быть полезно пропустить по меньшей мере часть газообразного топлива, отделенного от быстро охлажденного потока ЧО, через каталитический реактор сдвига для преобразования CO в H_2 с использованием реакции с паром, как это выражено формулой (2).



Это может быть осуществлено путем использования части газообразного топлива, отобранной с температурой от примерно 250°C до примерно 400°C , после удаления золы, с использованием катализатора сдвига CO , нечувствительного к сере, такого как, например, катализатор на основе кобальта и молибдена, в реакторе сдвига. Часть газообразного топлива с повышенным содержанием H_2 может быть затем охлаждена путем пропускания через теплообменник системы ЧО. Тепло, высвобождаемое в экзотермической реакции сдвига, может быть передано в систему СВЭ, как это уже описывалось. Газ, получаемый в результате реакции сдвига, может быть смешан с частью остального охлажденного потока ЧО, и поток смеси может быть пропущен через многослойный адсорбер с изменениями давления, предназначенный для отделения H_2 и CO с необходимым их отношением в качестве одного непоглощенного компонента, в то время как поглощенные компоненты могут содержать все соединения серы, HCN , NH_3 , Hg , CO_2 , H_2O и большую часть CH_4 . Эта непоглощенная часть может также содержать некоторое количество N_2 и Ar , происходящих из угля (или другого твердого или жидкого топлива), и кислород, используемый в реакторе ЧО. Содержание этих инертных компонентов предпочтительно не будет превышать 5%, что приемлемо для газа, подаваемого в реакторы Фишера-Тропша и в реакторы синтеза метанола. Если необходимо получить чистый H_2 , то в адсорбер с изменениями давления подается только охлажденный газ, получаемый в реакции сдвига. Газ, отходящий из адсорбера с почти атмосферным давлением и содержащий все загрязняющие компоненты угля и загрязняющие продукты, возникающие в результате реакции ЧО, в восстановленной форме, сжимают и возвращают в остальное газообразное топливо из потока ЧО для сжигания в камере сгорания системы СВЭ.

В некоторых вариантах по меньшей мере часть потока ЧО, быстро охлажденного водой, может быть пропущена через реверсивный реактор сдвига водяного газа. Например, быстро охлажденный водой поток ЧО, содержащий газообразное топливо, с температурой 900°C или более может быть обработан в реверсивном реакторе сдвига водяного пара для преобразования смеси H_2 и CO_2 в газ на выходе из реактора, содержащий смесь CO и H_2O .

В некоторых вариантах поток ЧО (или газообразное топливо из потока ЧО) может быть обработан с

использованием установки удаления кислых газов, например, для отделения по меньшей мере части H_2S и/или CO_2 , присутствующих в потоке. В частности, удаление кислых газов может быть выполнено после охлаждения потока ЧО в теплообменнике ЧО и после удаления воды из потока ЧО. Удаление кислых газов предпочтительно осуществляют перед повышением давления газообразного топлива до величины, подходящей для подачи в камеру сгорания СВЭ. Способы удаления кислых газов могут быть разделены на три основных типа, которые используют: химические реагенты, физические растворители или гибридные растворители. В качестве неограничивающих примеров способов удаления кислых газов можно указать Rectisol, Sulfinol, MDEA, Selexol, водный ди-изопропаноловый (ADIP) амин и FLEXSORB. Один из способов может включать использование двухстадийного процесса SELEXOL™ (компания UOP LLC, USA), в котором H_2S выводится на первой стадии, а CO_2 выводится на второй стадии. H_2S при удалении кислых газов может быть преобразован в жидкую элементарную серу с использованием любого способа, известного специалистам, включая процесс Клауса, или же может быть преобразован в серную кислоту товарного качества с использованием любого способа, известного специалистам, включая получения серной кислоты методом "мокрого" катализа. CO_2 , удаленный из потока ЧО в процессе удаления кислых газов, может быть сжат и введен в поток сжатого рециркулируемого CO_2 для подачи в камеру сгорания СВЭ. В некоторых вариантах поток топлива ЧО может быть пропущен через систему активированной адсорбции для удаления из него ртути.

В одном или в нескольких вариантах поток ЧО (или газообразное топливо из потока ЧО) может быть обработан с использованием системы получения метана. В частности, получение метана может быть выполнено после охлаждения потока ЧО в теплообменнике ЧО и после удаления воды из потока ЧО. Получение метана предпочтительно осуществляют перед повышением давления газообразного топлива до величины, подходящей для подачи в камеру сгорания СВЭ. Газообразное топливо, получаемое в каталитическом реакторе ЧО, может в некоторых вариантах содержать H_2 и CO с отношением примерно 3:1 после пропускания через реактор конверсии водяного газа. H_2S и CO_2 могут быть удалены в процессе удаления кислых газов, и поток газообразного топлива ЧО с высоким содержанием метана, выходящий из процесса удаления кислых газов, может содержать преимущественно CO , H_2 и CH_4 . Газообразное топливо, выходящее из системы получения метана, может содержать метан в количестве примерно 50 об.% или более, примерно 75 объемн.% или более, примерно 85 об.% или более, примерно 90 об.% или более, или примерно 95 об.% или более. Тепло, высвобождаемое в процессе получения метана, может быть использовано в одном или в нескольких теплообменниках. Охлаждающий поток, используемый в этих теплообменниках, может включать поток рециркулируемой текучей среды высокого давления, выводимой из системы СВЭ и возвращаемой в нее, поток воды высокого давления, поток азота, выводимый из установки разделения воздуха для высушивания твердого топлива, поток смеси O_2/CO_2 высокого давления, и/или поток очищенного и охлажденного газообразного топлива. Для получения метана может использоваться, например, высокотемпературный процесс TREMP™ компании Haldor Topsoe. См., например, патент US 8530529, содержание которого вводится ссылкой в настоящее описание.

Один из вариантов системы производства энергии с частичным окислением твердого топлива описывается со ссылками на фиг. 1, причем твердое топливо обеспечивается форме потока 21 угля для частичного окисления в реакторе 4 ЧО. Поток 21 угля подают в измельчитель 1, в котором осуществляется измельчение крупных частиц с частичным высушиванием и в который подают поток 23 сухого азота с температурой примерно 82°C (180°F), поступающий из установки 6 разделения воздуха, вырабатывающей потоки 32 и 60 кислорода и поток 23 азота из поступающего в нее потока 62 воздуха. В предпочтительных вариантах поток 23 сухого азота может быть нагрет высокотемпературным выхлопным потоком турбины с высоким содержанием CO_2 , выходящим из рекуперативного теплообменника в системе СВЭ. Из измельчителя 1 частиц выводится поток 22 избыточного азота. Затем частично измельченный уголь в потоке 24 дополнительно измельчают, предпочтительно до размера частиц примерно 250 микрон или менее, в измельчителе 2 мелких частиц для обеспечения потока 25 измельченного угля, направляемого в суспендирующий смеситель 3. В этом смесителе измельченный уголь смешивают с потоком 29 суспендирующего CO_2 , подаваемым предпочтительно под давлением примерно 8,5 МПа или более. CO_2 в потоке 29 суспендирующей среды в этом варианте имеет температуру примерно 17°C. CO_2 в потоке 29 суспендирующей среды имеет плотность примерно 865 кг/м. Давление среды, содержащей тонкоизмельченный уголь, перед смешиванием с CO_2 повышают в шлюзовой бункерной системе или с использованием другого устройства до величины 8,5 МПа. Из суспендирующего смесителя 3 выходит поток 26 суспензии уголь/ CO_2 , который в предпочтительном варианте содержит уголь в количестве примерно 45 вес.%. В других вариантах в качестве суспендирующей среды может использоваться вода. Система подачи тонкоизмельченного угля может быть также выполнена как система подачи сухого материала, в которой тонкоизмельченный уголь увлекается потоком азота для подачи в камеру сгорания реактора ЧО. Затем поток 26 суспензии закачивают в реактор 4 ЧО, в котором его соединяют с потоком 56 кислорода, содержащим кислород предпочтительно в молярной концентрации 95% или более. Предпочтительные рабочие характеристики реактора 4 ЧО: давление примерно 8,5 МПа и температура примерно 1400°C, однако температура и давление могут быть в любых сочетаниях из диапазонов температуры и давления, как это указано

в настоящем описании в отношении характеристик потока, выходящего из реактора ЧО. Характеристики подготовки угольной суспензии могут быть откорректированы соответствующим образом.

Реактор 4 ЧО приспособляют для частичного окисления угля и формирования выходного потока, который подают в камеру быстрого охлаждения (не показана), или же этот поток может быть быстро охлажден в самом реакторе ЧО, как это показано на фиг. 1. Поток реактора ЧО может содержать газообразное топливо, которое содержит один или несколько горючих (то есть, окисляемых) компонентов, включающих, без ограничения, H_2 , CO , CH_4 , H_2S , COS , CS_2 , HCN , NH_3 . Кроме того, поток реактора ЧО может содержать Hg и другие загрязняющие компоненты, производные угля (или другого твердого топлива), а также инертные компоненты (например, N_2 и Ar), происходящие из потока 56 кислорода, и другие компоненты в следовых количествах. Поток реактора ЧО может также включать один или несколько негорючих компонентов, таких как зола или шлак, которые при необходимости могут быть отфильтрованы.

Поток ЧО (внутри реактора или в отдельном компоненте оборудования) быстро охлаждают путем смешивания с охлаждающей текучей средой (поток 57 жидкой воды в рассматриваемом варианте). Как показано, поток 57 жидкой воды поступает в реактор ЧО возле основания в форсунке. Введение потока быстрого охлаждения обеспечивает охлаждение компонентов потока ЧО предпочтительно ниже температуры насыщения водой, равной примерно $304^\circ C$ (хотя также возможны и более высокие температуры). Температура быстрого охлаждения предпочтительно может быть также температурой, при которой негорючие компоненты, такие как зола и шлак, находятся в твердой форме. Избыточную воду быстрого охлаждения собирают вместе со шлаком и большей частью золы в поддоне резервуара реактора ЧО (или отдельного резервуара быстрого охлаждения), откуда ее отправляют для дальнейшей обработки. Охлажденный поток 58 реактора ЧО направляют в скруббер 5, содержащий колонну промывки газа водой, на выходе которой установлен картридж тонкой фильтрации, выполненный для снижения содержания пыли в газообразном топливе до примерно 4 мг/м или менее, до примерно 3 мг/м или менее, или до примерно 2 мг/м или менее. Скруббер 5 может также содержать все оборудование и насосы, необходимые для рециркуляции промывной воды, а также для обработки потока 66 золы для утилизации. В качестве примера варианта системы, подходящей для переработки золы и очистки газа реактора ЧО можно указать систему ЧО компании GE/Техасо с горелкой для суспензии уголь/вода, причем эта система может быть адаптирована для работы с суспензией уголь/ CO_2 . Таким образом, твердые материалы могут быть удалены из потока ЧО, содержащего газообразное топливо, с использованием одного или нескольких компонентов, обеспечивающих удаление твердых материалов.

Как показано на фиг. 3, при необходимости могут быть использованы дополнительные охлаждающие устройства. В частности, как показано на фиг. 3, поток 58а ЧО, выходящий из реактора 4 ЧО, может проходить через охлаждающее устройство 101 (например, через устройство радиационного или конвекционного охлаждения) и выходит как охлажденный поток 58b ЧО перед поступлением в скруббер 5. В одном или в нескольких вариантах для обработки потока 55 ЧО, проходящего между скруббером 5 и теплообменником 7 ЧО, могут использоваться и другие устройства обработки. Как показано на фиг. 4, поток 55а ЧО, выходящий из скруббера 5, может проходить через одно или несколько из реактора 102 сдвига, реактора 103 гидролиза COS и блока 104 низкотемпературной десульфуризации перед поступлением в теплообменник 7 ЧО (с промежуточными потоками 55b, 55c и 55d). Следует понимать, что эти элементы не являются обязательными, и может использоваться только один или два из указанных элементов. Кроме того, реактор 102 сдвига, реактор 103 гидролиза COS и блок 104 низкотемпературной десульфуризации могут быть установлены в любом порядке, когда используются два или более элементов.

Поток 55 очищенного газообразного топлива с паром охлаждают в теплообменнике 7 ЧО. Выходящий из него поток 59 дополнительно охлаждают с использованием охлаждающей воды в теплообменнике 9. Жидкую воду 46 отделяют в разделительном резервуаре 8 от входящего потока 61 и перекачивают с помощью насоса 11 обратно в реактор ЧО вместе с некоторым количеством подпиточной воды из потока 38 для получения потока 57 воды быстрого охлаждения. В некоторых вариантах давление всего потока 47 газообразного топлива повышают в многоступенчатом центробежном компрессоре 10 до величины, подходящей для подачи в качестве потока 48 в камеру 14 сгорания системы выработки энергии. Например, давление потока 47 газообразного топлива может быть повышено до примерно $30,5 \text{ МПа}$.

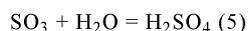
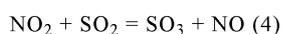
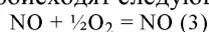
В одном или нескольких вариантах поток, выходящий из разделительного резервуара 8, может быть промежуточным потоком 47а газообразного топлива, из которого могут быть удалены другие материалы, и он может быть подвергнут дополнительной обработке для повышения качества. Например, как показано на фиг. 5, промежуточный поток 47а газообразного топлива может быть пропущен через одно или несколько из установки 105 для удаления кислых газов, системы 106 активированной адсорбции и системы 107 каталитического получения метана перед направлением в компрессор 10 (с промежуточными потоками 47b, 47c и 47d). Следует понимать, что эти элементы не являются обязательными, и может использоваться только один или два из указанных элементов. Кроме того, установка 105 для удаления кислых газов, система 106 активированной адсорбции и система 107 каталитического получения метана могут быть расположены в любом порядке, когда используются два или более этих элементов.

В некоторых вариантах предпочтительно используется установка 105 удаления кислых газов. В

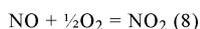
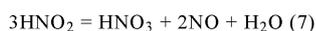
этом случае кислые газы, такие как сероводород, галогеноводороды, диоксид углерода, оксиды серы и оксиды азота, могут быть удалены перед сжатием газообразного топлива. В некоторых вариантах аналогичным образом предпочтительно используется система 106 активированной адсорбции.

Поток 48 сжатого газообразного топлива нагревают в рекуперативном теплообменнике 12 до температуры, подходящей для подачи в камеру 14 сгорания системы выработки энергии. Например, поток 48 газообразного топлива может быть нагрет до температуры примерно 746°C. Поток 64 нагретого газообразного топлива сжигают в камере 14 сгорания системы выработки энергии, в которой его соединяют с кислородом и CO₂. В рассматриваемом варианте поток 51 смеси O₂/CO₂ содержит 25% O₂ и 75% CO₂ (молярные проценты). Поток 51 смеси O₂/CO₂ предпочтительно нагревают до температуры, подходящей для подачи в камеру 14 сгорания системы выработки энергии. Например, поток 51 смеси O₂/CO₂ может быть нагрет до температуры примерно 746°C в рекуперативном теплообменнике 12. Из рекуперативного теплообменника 12 выходит поток 52 горячего рециркулируемого CO₂ с температурой, подходящей для подачи в камеру 14 сгорания системы выработки энергии. Например, поток 52 горячего рециркулируемого CO₂ может быть нагрет до температуры примерно 746°C.

В камере сгорания системы выработки энергии газообразные продукты сгорания газообразного топлива охлаждаются вместе с потоком 52 горячего рециркулируемого CO₂, в результате чего в рассматриваемом варианте формируется общий поток 50 продуктов сгорания с температурой примерно 1150°C и под давлением примерно 30 МПа. Этот поток расширяется с падением давления до примерно 3 МПа в турбине 13, соединенной с электрическим генератором 65, вырабатывающим на выходе энергию 63. Выходной поток 49 турбины охлаждают в рекуперативном теплообменнике 12, в результате чего в рассматриваемом варианте формируется поток 53 охлажденных продуктов с температурой примерно 64°C. Поток 53 охлаждают до температуры примерно 17°C в водяном охладителе 16. Дополнительно охлажденный поток 53 в форме потока 54 поступает в башенный газоочиститель 17, из которого выходит поток ЧО, который большей частью рециркулируют с помощью насоса 18 в газоочиститель 17 в форме входного потока 41, поступающего выше насадочной секции газоочистителя, в которую поступает дополнительно охлажденный выходной поток 54 турбины. Часть потока ЧО отделяют в форме потока 39 для дальнейшей обработки. При охлаждении выхлопного потока турбины в рекуперативном теплообменнике 12 ниже температуры конденсации воды происходят следующие реакции:



Вышеуказанные реакции будут протекать в присутствии жидкой воды, оксидов азота, SO₂/SO₃ и избытка кислорода. Концентрации SO₂/SO₃ снижаются до очень низких величин, поскольку ключевая реакция, описываемая формулой (3), быстро протекает при давлении 3 МПа, и реакции, описываемые формулами (4) и (5), протекают очень быстро. Когда все оксиды серы преобразуются в серную кислоту, оксиды азота преобразуются за один цикл с коэффициентом преобразования, равным примерно 95%, в азотную кислоту в соответствии с нижеприведенной последовательностью реакций.



Азотная кислота, присутствующая в потоке 39 жидкого кислотного продукта, будет преобразовывать любую ртуть, имеющуюся в этом потоке, в хлорид ртути. Башенный газоочиститель 17 предпочтительно снабжен дополнительной секцией промывки водой и удаления кислотных паров. Ее основная функция заключается в эффективном удалении разбавленной кислоты, поскольку по существу все вышеуказанные реакции будут протекать выше по потоку башенного газоочистителя 17. Смесь кислот обрабатывают потоком 36 суспензии известняка (или другого подходящего щелочного материала) в смесителе 15 для получения потока 37, содержащего сернокислый кальций и нитрат кальция. Также могут быть отделены любые соли металлов в следовых количествах. Поток 38 остаточной воды после удаления нитрата кальция и растворенных солей может использоваться в качестве подпиточной воды, подаваемой в башенный охладитель или в систему быстрого охлаждения ЧО, или в качестве промывной воды, рециркулируемой в башенный газоочиститель 17.

Поток 42, выходящий из башенного газоочистителя 17 под давлением примерно 2,9 МПа, содержит в основном CO₂, и давление этого потока повышают в многоступенчатом компрессоре 19 с охлаждением (многоступенчатом насосе для плотных текучих сред), до давления, подходящего для подачи в камеру сгорания системы выработки энергии, например, до примерно 30,5 МПа. Поток 35, содержащий сжатый CO₂, выходит из последней ступени насоса 19 с температурой примерно 54°C, и часть этого потока, поток 70, нагревают в рекуперативном теплообменнике 12 до температуры примерно 746°C (поток 52 CO₂ на выходе теплообменника 12).

Установка 6 разделения воздуха в рассматриваемом варианте производит поток, содержащий кислород в количестве 99,5 мол.%, под давлением примерно 8,6 МПа, причем этот поток разделяется на два

отдельных потоков. Один поток 60 кислорода нагревают до температуры примерно 294°C в теплообменнике 7, из которого он выходит в форме потока 56 для использования в реакторе 4 ЧО для частичного окисления угля. Другой поток 32 кислорода смешивают с CO₂ под давлением примерно 8,6 МПа. CO₂ получают из промежуточной ступени компрессора 19 в форме потока 30, часть которого (поток 31) смешивают с потоком 32 кислорода для получения смеси, содержащей 30 мол.% O₂ и 70 мол.% CO₂. Давление этого потока 33 разбавленного O₂ повышают до величины примерно 30,5 МПа в многоступенчатом компрессоре 20 с охлаждением, затем выходящий из него поток 34 нагревают в рекуперативном теплообменнике 12 до температуры примерно 746°C и подают в камеру 14 сгорания системы выработки энергии в форме потока 51. Разбавление потока 32 чистого O₂ существенно для получения кислорода, необходимого для обеспечения процесса горения в камере 14 сгорания, которая нагревается до высокой температуры, без необходимости использования материалов стойких к окислению. Это обеспечивает надежную работу системы выработки энергии. Поток, содержащий O₂ в количестве 30%, эффективно снижает температуру адиабатического горения в камере 14 сгорания системы выработки энергии до величины примерно 2400°C. Другую часть потока 30, содержащего CO₂ (поток 29), направляют в суспендирующий смеситель 3 для обеспечения суспендирования тонкоизмельченного угля.

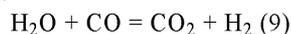
Охлаждение быстро охлажденного газа системы ЧО в теплообменнике 7 целесообразно для передачи максимального количества тепла системе выработки энергии для максимизации общего КПД. Для работы системы выработки энергии требуется значительное количество тепла от внешнего источника в диапазоне температур от температуры, близкой к температуре окружающей среды, до примерно 400°C. Это может обеспечиваться путем использования воздушных компрессоров адиабатического сжатия в установке 6 разделения воздуха и передачи тепла, выделяющегося при сжатии, части потока рециркулируемого CO₂ высокого давления. В рассматриваемом варианте необходимая внешняя тепловая нагрузка обеспечивается охлаждением быстро охлажденного газа ЧО в теплообменнике 7 ЧО и нагревом двух рециркулируемых потоков высокого давления. Поток 28 рециркулируемого CO₂ высокого давления с температурой примерно 54°C и поток 43 рециркулируемого CO₂ высокого давления с температурой примерно 120°C, выходящий из промежуточной точки рекуперативного теплообменника 12, нагревают для обеспечения объединенного нагретого выходного потока 44 с температурой примерно 294°C, возвращаемого для смешивания с основным потоком рециркулируемого CO₂ в соответствующей температурной точке рекуперативного теплообменника 12. Дополнительно (но необязательно) в рекуперативный теплообменник также может быть возвращен выходящий поток 67 для смешивания с основным потоком рециркулируемого CO₂ в соответствующей температурной точке.

В одном или в нескольких вариантах может быть полезно обеспечить передачу тепла между теплообменником 7 ЧО и рекуперативным теплообменником 12 СВЭ в специальном контуре передачи тепла. Например, как показано на фиг. 6, поток 109 теплообменной текучей среды циркулирует между теплообменником 7 ЧО и рекуперативным теплообменником 12 СВЭ с помощью насоса 108. Давление потока 109 теплообменной текучей среды может превышать давление окружающей среды, например, может достигать примерно 30 МПа, примерно 20 МПа, или примерно 10 МПа. В некоторых вариантах поток 109 теплообменной текучей среды может передавать тепло от теплообменника 7 ЧО рекуперативному теплообменнику 12 СВЭ.

В иллюстративных вариантах теплообменник 7 может быть многоканальным устройством высокого давления, выполненным с помощью пайки или диффузионной сварки. В качестве материала для конструкции предпочтительно используется материал, стойкий к коррозии, вызываемой загрязняющими примесями, присутствующими в потоке газа системы ЧО вместе жидкой водой. Рекуперативный теплообменник 12 предпочтительно представляет собой многоканальное устройство, изготовленное с помощью диффузионной сварки. Это устройство предпочтительно приспособлено для работы при температурах до примерно 800°C и устойчиво к кислотной коррозии при температурах ниже примерно 200°C. Подходящим материалом является, например, сплав 740 компании Specialty Metals. В некоторых вариантах средняя температура горячего конца теплообменника 12 может быть понижена до 750°C и менее, и в таких случаях может использоваться сплав 617. Дополнительно, но не обязательно, промежуточная секция между 200 и 540°C может быть изготовлена из нержавеющей стали. Секция, которая потенциально подвержена кислотной коррозии при температуре ниже 200°C, может быть сконструирована с возможностью периодической замены.

В других вариантах могут использоваться альтернативные конфигурации элементов для обработки потока ЧО. В одном из иллюстративных вариантов, показанном на фиг. 2, используется дополнительная (но не обязательная) конфигурация, в которой продукт ЧО используется как для получения газообразного топлива для системы выработки энергии, так и для получения выделенной очищенной смеси H₂ и CO. Боковой поток 90 отбирается из потока быстро охлажденного газа ЧО после удаления золы и пропускается через каталитический реактор 91 сдвига, в котором используется катализатор сдвига на основе кобальта, устойчивый к сернистым соединениям (или другой подходящий материал). Поток 92 выходного газа с более высокой температурой охлаждается в теплообменнике 7 до температуры примерно 60°C, выходит из него как поток 73 и затем охлаждается охлаждающей водой в теплообменнике 74 до температуры примерно 20°C (поток 75). Водяной конденсат 78 отделяют в сепараторе 77, и охлажденный поток

76 газа подается в многослойный адсорбер 79 с изменениями давления. Воду 78, отделенную в сепараторе 77, добавляют к потоку 46 жидкой воды. Адсорбер 79 с изменениями давления предназначен для разделения входного потока 76 газа на поток 80 чистого H_2 или чистого H_2 и CO , выходящего из адсорбера под давлением примерно 8 МПа, и поток 93 отходящего газа, содержащий все загрязняющие примеси (напр., H_2S , CO , CS_2 , HCN , NH_3 , Hg и другие компоненты в следовых количествах), а также комбинацию H_2 , CO , CO_2 , CH_4 и H_2O . Загрязняющие примеси отделяются таким образом, что концентрация этих компонентов в потоке 80 коммерческого продукта H_2 или H_2 и CO не превышает 1 промилле. В этой конфигурации используется поток 83 охлажденного газа CO , содержащего CO высокой концентрации, который смешивают с потоком 76 охлажденного газа для получения потока 72, после пропускания которого через адсорбер 79 с изменениями давления получают требуемый поток и требуемое отношение H_2 к CO в товарном потоке 80 с давлением 8 МПа. Если необходимо получить чистый H_2 , то поток 83 отсутствует. Давление 0,12 МПа потока 93 отходящих газов, выходящего из адсорбера 79 с изменениями давления, повышают в многоступенчатом компрессоре 81 с охлаждением до давления примерно 8 МПа, и выходящий поток 82 добавляют в поток 47 газообразного топлива, давление которого повышают и направляют в камеру 14 сгорания системы выработки энергии (см. фиг. 1). Давление суммарного потока газообразного топлива повышают до давления примерно 30,5 МПа в компрессоре 10, и полученный поток 48 газообразного топлива высокого давления направляется в камеру 14 сгорания системы выработки энергии через рекуперативный теплообменник 12 (см. фиг. 1). В такой конфигурации обеспечивается передача всех примесей, образующихся из угля и из потока CO , в систему выработки энергии, где они окисляются в камере 14 сгорания. В различных вариантах потребление дополнительной воды в реакции сдвига может происходить в соответствии с уравнением (9) и может требовать подачи небольшого количества дополнительной подпиточной воды.



Как следует из вышеизложенного, настоящее изобретение может обеспечить способы выработки энергии с использованием установки, объединяющей систему частичного окисления и систему выработки энергии.

Способы могут быть определены любой комбинацией стадий, раскрытых в настоящем описании.

В настоящем изобретении также предложена установка выработки энергии, содержащая систему частичного окисления (CO) и систему выработки энергии ($СВЭ$). Такая установка может содержать следующие компоненты: реактор CO ; скруббер CO или другое фильтрующее устройство; теплообменник CO ; водоотделитель CO ; система CO удаления кислых газов; компрессор CO ; камера сгорания $СВЭ$; турбина $СВЭ$; рекуперативный теплообменник $СВЭ$; сепаратор $СВЭ$; компрессор $СВЭ$; система подачи твердого топлива; реактор сдвига; реактор гидролиза сернистого карбонила; установка десульфуризации; установка активированной адсорбции; система каталитического получения метана; и замкнутый контур теплопередачи между теплообменником CO и теплообменником $СВЭ$. Кроме вышеуказанного установка выработки энергии может содержать линии, соединяющие между собой вышеуказанные компоненты, для обеспечения потоков текучих сред между этими компонентами, и установка выработки энергии может содержать трубопроводные арматуры, соединительные устройства и контроллеры, необходимые для обеспечения потоков текучих сред между соответствующими компонентами. Кроме того, следует понимать, что вышеуказанные компоненты будут содержать впускные и выпускные отверстия для ввода и вывода, соответственно, потоков текучих сред в процессе работы установки выработки энергии, как это указано в настоящем описании. Аналогичным образом, в той степени, в которой различные компоненты (или их впускные и/или выпускные отверстия) указываются сообщающимися друг с другом по текучей среде, необходимо понимать, что сообщение по текучей среде может включать наличие линий, проложенных между указанными компонентами (или их впускными и/или выпускными отверстиями), а также наличие одного или нескольких других компонентов, установленных между указанными компонентами. Кроме того, следует понимать, что в установке выработки энергии, содержащей множество компонентов, обрабатывающих потоки текучих среды, некоторые компоненты могут рассматриваться как расположенные выше по потоку относительно одних соответствующих компонентов и/или ниже по потоку относительно других соответствующих компонентов. Положение компонента выше и/или ниже по потоку относительно другого соответствующего компонента очевидно, как минимум, из прилагаемых чертежей. Таким образом, в той степени, в которой на прилагаемых чертежах показано, что первый компонент получает поток текучей среды из второго компонента, следует понимать, что первый компонент расположен выше по потоку относительно второго компонента, и второй компонент расположен ниже по потоку относительно первого компонента. Аналогичным образом, третий компонент, расположенный ниже по потоку относительно второго компонента, следует считать расположенным также ниже по потоку относительно первого компонента, и это взаимное расположение очевидно из прилагаемых чертежей и описания к ним.

В различных вариантах, содержащих элементы систем и способов, рассмотренных в настоящем описании, суммарный КПД раскрытых систем и способов превышает 50% (для нижней теплотворной способности с типичными КПД турбины и компрессора и типичными перепадами температур и падениями давлений). Кроме того, обеспечивается улавливание и захоронение CO_2 одновременно с полным

удалением всех других загрязняющих примесей, возникающих при получении газообразного топлива из угля и сжигании этого топлива в камере сгорания. Избыточный CO_2 , образующийся из углерода в потоке 21 топлива, удаляется из системы циркуляции CO_2 в форме потока 71 с давлением 30,5 МПа (см. фиг. 1). Это может обеспечиваться, поскольку системы и способы по настоящему изобретению могут быть приспособлены для обеспечения по существу всего CO_2 , образующегося из топлива, с давлением примерно 15 МПа или более, примерно 20 МПа или более, примерно 25 МПа или более, или примерно 30 МПа или более. Такой высокий КПД может быть достигнут с использованием недорогой системы, в которой используются имеющиеся на рынке реакторы ЧО и цикл выработки энергии, в котором в качестве рабочей текучей среды используется CO_2 высокого давления, как это описано в патенте US № 8596075, выданном Allam и др. Если в качестве сравнительного примера рассмотреть коммерческие системы выработки энергии, в которых используется известный комбинированный цикл с внутренней газификацией угля, с улавливанием CO_2 и повышением его давления до величины, подходящей для подачи в трубопроводы, то для сравнимых условий они обеспечивают КПД 34-39%, и капитальные расходы в этом случае гораздо выше.

Специалист в области техники, к которой относится объект изобретения, раскрытый в настоящем описании, может представить себе множество модификаций и других вариантов реализации объекта изобретения, на основании знания, полученного из вышеприведенного описания и прилагаемых чертежей. Поэтому следует понимать, что настоящее изобретение не должно ограничиваться описанными конкретными вариантами его осуществления, и что их модификации и другие варианты осуществления предполагаются включенными в объем, определяемый прилагаемой формулой изобретения. Хотя в настоящем описании используются специальные термины, они используются только в целях описания и никоим образом не ограничивают объем изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ выработки энергии с использованием комбинации системы частичного окисления (ЧО) и системы выработки энергии (СВЭ), включающий

соединение твердого или жидкого топлива с кислородом в реакторе ЧО в условиях, достаточных для частичного окисления топлива и формирования потока ЧО, содержащего газообразное топливо, с первой температурой;

удаление из потока ЧО, содержащего газообразное топливо, по меньшей мере части любых твердых компонентов или газообразных компонентов, которые не составляют часть газообразного топлива, при этом указанное удаление осуществляют в скруббере;

обработку по меньшей мере части потока ЧО, содержащего газообразное топливо, отведенного из скруббера, в реакторе гидролиза сернистого карбонила (COS), приспособленном для преобразования COS в H_2S , с получением потока преобразованного газообразного топлива;

охлаждение указанного потока преобразованного газообразного топлива, из реактора гидролиза сернистого карбонила в теплообменнике ЧО до второй, более низкой температуры;

очистку охлажденного потока ЧО, содержащего газообразное топливо, из теплообменника ЧО путем удаления из него жидкой воды и кислых газов, в результате чего формируется поток газообразного топлива;

повышение давления потока газообразного топлива до примерно 12 МПа или более;

сжигание потока газообразного топлива, полученного на предыдущей стадии, в камере сгорания СВЭ для формирования потока продуктов сгорания с давлением по меньшей мере примерно 10 МПа и с температурой по меньшей мере примерно 800°C;

расширение потока продуктов сгорания в турбине СВЭ для выработки энергии и формирования расширенного потока продуктов сгорания СВЭ;

пропускание расширенного потока продуктов сгорания СВЭ через рекуперативный теплообменник СВЭ для отбора тепла от потока продуктов сгорания СВЭ и формирования охлажденного потока продуктов сгорания СВЭ;

удаление по меньшей мере части одной или более загрязняющих примесей из охлажденного потока продуктов сгорания СВЭ для формирования потока рециркулируемого CO_2 ; и

повышение давления потока рециркулируемого CO_2 в компрессоре СВЭ для формирования потока сжатого рециркулируемого CO_2 .

2. Способ по п. 1, в котором реактор ЧО представляет собой газификатор.

3. Способ по п. 1, в котором реактор ЧО представляет собой реактор с псевдоожиженным слоем.

4. Способ по п. 1, в котором реактор ЧО представляет собой каталитический реактор.

5. Способ по п. 1, дополнительно включающий снижение температуры потока ЧО, содержащего газообразное топливо, до температуры, которая ниже первой температуры и выше второй температуры, перед охлаждением потока ЧО, содержащего газообразное топливо, в теплообменнике ЧО.

6. Способ по п. 5, в котором снижение температуры потока ЧО, содержащего газообразное топливо, включает подачу текучей среды быстрого охлаждения в реактор ЧО.

7. Способ по п.6, в котором текучая среда быстрого охлаждения содержит одно или оба из воды и CO_2 .
8. Способ по п.1, дополнительно включающий нагрев потока газообразного топлива после повышения давления и перед сжиганием.
9. Способ по п.8, в котором нагрев потока газообразного топлива включает его пропускание через рекуперативный теплообменник СВЭ.
10. Способ по п.1, дополнительно включающий подачу одного или обоих из пара и CO_2 в реактор ЧО.
11. Способ по п.1, в котором теплообменник ЧО выполнен для отбора тепла от потока ЧО, содержащего газообразное топливо, посредством одного или более из части потока сжатого рециркулируемого CO_2 ; потока воды под давлением; потока азота; потока сжатого O_2 и CO_2 ; потока газообразного топлива.
12. Способ по п.1, дополнительно включающий пропускание части потока ЧО, содержащего газообразное топливо, через реактор сдвига, сконфигурированный для преобразования смеси H_2 и CO_2 в смесь CO и H_2O или сконфигурированный для преобразования смеси CO и H_2O в смесь H_2 и CO_2 .
13. Способ по п.12, дополнительно включающий смешивание части потока ЧО, содержащего газообразное топливо, с частью потока рециркулируемого CO_2 для формирования смеси и обработки этой смеси в реакторе сдвига.
14. Способ по п.13, в котором реактор сдвига представляет собой реверсивный реактор конверсии водяного газа.
15. Способ по п.1, дополнительно включающий пропускание части потока ЧО, содержащего газообразное топливо, через установку низкотемпературной десульфуризации, выполненную для удаления одного или более из H_2S , COS и тяжелых металлов из потока ЧО, содержащего газообразное топливо.
16. Способ по п.1, дополнительно включающий пропускание по меньшей мере части потока ЧО, содержащего газообразное топливо, через систему активированной адсорбции, выполненную с возможностью удаления ртути из потока ЧО, содержащего газообразное топливо.
17. Способ по п.1, дополнительно включающий пропускание по крайней мере части потока газообразного топлива через установку удаления кислых газов, выполненную с возможностью отделения одного или обоих по меньшей мере из части любого H_2S и по меньшей мере части любого CO_2 , присутствующих в потоке газообразного топлива.
18. Способ по п.1, дополнительно включающий пропускание по крайней мере части потока газообразного топлива через систему каталитического получения метана, выполненную для преобразования CO и H_2 в CH_4 и H_2O .
19. Способ по п.1, в котором по меньшей мере часть потока сжатого рециркулируемого CO_2 нагревают в рекуперативном теплообменнике СВЭ и направляют в камеру сгорания СВЭ.
20. Способ по п.1, в котором часть потока сжатого рециркулируемого CO_2 подают в теплообменник ЧО.
21. Способ по п.20, в котором поток сжатого рециркулируемого CO_2 , выходящий из теплообменника ЧО, направляют в рекуперативный теплообменник СВЭ.
22. Способ по п.1, в котором часть потока сжатого рециркулируемого CO_2 направляют в реактор ЧО.
23. Способ по п.1, в котором часть потока сжатого рециркулируемого CO_2 соединяют с твердым или жидким топливом перед соединением твердого или жидкого топлива с кислородом в реакторе ЧО.
24. Способ по п.1, в котором твердое или жидкое топливо представляет собой суспензионное топливо, сформированное из твердого топлива, соединенного с жидким CO_2 или с CO_2 , находящимся в сверхкритическом состоянии.
25. Установка выработки энергии, содержащая систему частичного окисления (ЧО) и систему выработки энергии (СВЭ), причем в состав установки выработки энергии входят:
 - реактор ЧО;
 - скруббер ЧО с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием реактора ЧО;
 - реактор гидролиза сернистого карбонила (COS) с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием скруббера ЧО;
 - теплообменник ЧО с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием реактора гидролиза сернистого карбонила;
 - водоотделитель ЧО с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием теплообменника ЧО;
 - система удаления кислых газов ЧО с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием водоотделителя;
 - компрессор ЧО с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием системы удаления кислых газов;
 - камера сгорания СВЭ с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием компрессора ЧО, причем камера сгорания СВЭ сконфигурирована для приема из него газообразного то-

плива;

турбина СВЭ с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием камеры сгорания СВЭ, причем турбина СВЭ сконфигурирована для приема из нее потока продуктов сгорания;

рекуперативный теплообменник СВЭ с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием турбины СВЭ;

сепаратор СВЭ с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием рекуперативного теплообменника СВЭ; и

компрессор СВЭ с впускным отверстием, сообщающимся по потоку с выпускным отверстием сепаратора СВЭ.

26. Установка выработки энергии по п.25, дополнительно содержащая одно или более из:

системы подачи твердого топлива;

реактора сдвига;

установки десульфуризации;

установки активированной адсорбции; и

системы каталитического получения метана.

27. Установка выработки энергии по п.25, дополнительно содержащая замкнутый контур теплопередачи между теплообменником ЧО и рекуперативным теплообменником СВЭ.

28. Установка выработки энергии по п.25, в которой предусмотрено одно или более из следующего: водоотделитель ЧО имеет выпускное отверстие, сообщающееся по потоку с впускным отверстием реактора ЧО;

компрессор СВЭ имеет выпускное отверстие, сообщающееся по потоку с впускным отверстием теплообменника ЧО;

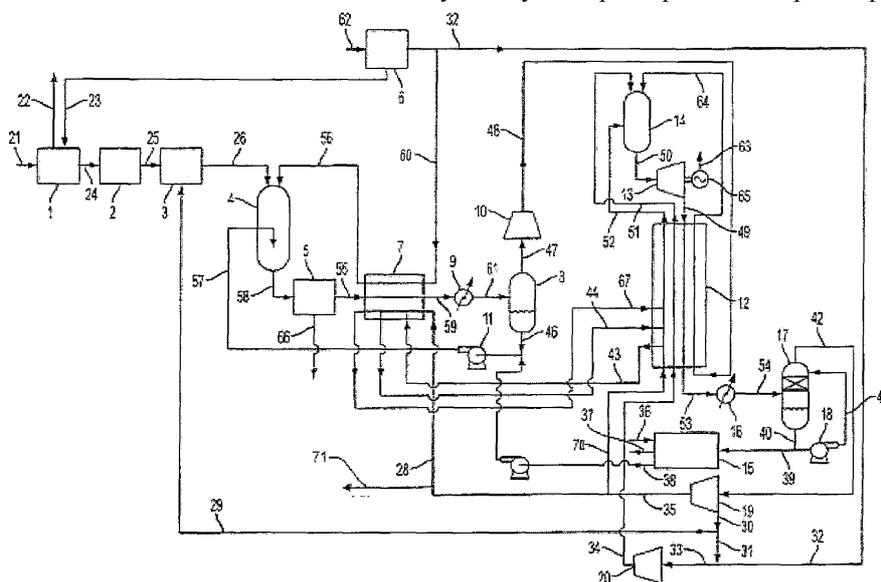
компрессор СВЭ имеет выпускное отверстие, сообщающееся по потоку с впускным отверстием рекуперативного теплообменника СВЭ.

29. Установка выработки энергии по п.25, дополнительно содержащая одно или более из нижеуказанного:

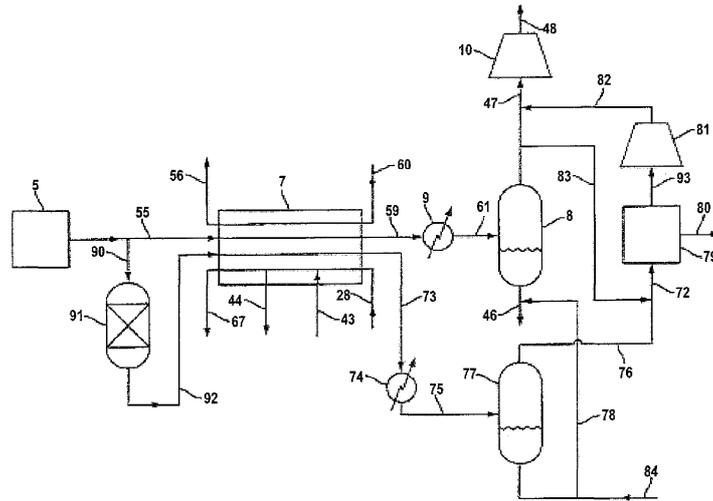
одна или более линий для сообщения по потоку между компрессором СВЭ и теплообменником ЧО;

одна или более линий для сообщения по потоку между компрессором СВЭ и рекуперативным теплообменником СВЭ;

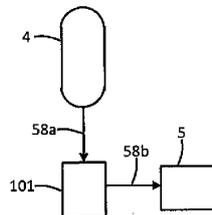
одна или более линий для сообщения по потоку между компрессором СВЭ и реактором ЧО.



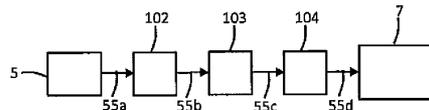
Фиг. 1



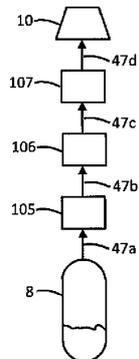
Фиг. 2



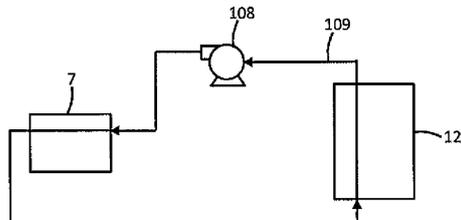
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

