

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **037523**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2021.04.07**

(51) Int. Cl. *C10J 3/84* (2006.01)

(21) Номер заявки  
**201891855**

(22) Дата подачи заявки  
**2017.02.16**

---

(54) **СИСТЕМА И СПОСОБ ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАНА**

---

(31) **62/296,730**

(56) US-A1-2013205746  
US-A1-2011062721

(32) **2016.02.18**

(33) **US**

(43) **2019.03.29**

(86) **PCT/IB2017/050879**

(87) **WO 2017/141186 2017.08.24**

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

(72) Изобретатель:  
**Форрест Брок Алан, Лу Сицзя (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 настоящем изобретении описана система выработки энергии, которая приспособлена для достижения высокого КПД получения энергии с улавливанием углерода при использовании твердого или жидкого углеводородного или углеродосодержащего топлива. Более конкретно, сначала осуществляют частичное окисление твердого или жидкого топлива в реакторе частичного окисления для обеспечения выходного потока с повышенным содержанием метана. Выходящий поток частично окисленного топлива может быть охлажден, профильтрован, дополнительно охлажден и затем направлен в систему выработки энергии в качестве сжигаемого топлива. Поток частично окисленного топлива соединяют с потоком сжатого рециркуляционного CO<sub>2</sub> и с кислородом. Поток продуктов горения расширяется в турбине для получения энергии и пропускается через рекуперативный теплообменник. Давление рециркуляционного CO<sub>2</sub> повышают, пропускают его через рекуперативный теплообменник и дополнительно (но не обязательно) через теплообменник системы частичного окисления таким образом, что обеспечивается повышение КПД комбинации систем.

---

**B1**

**037523**

**037523**

**B1**

### Область техники

Настоящее изобретение относится к системам и способам выработки энергии, такой как электрическая энергия. В частности, предлагаемые системы и способы могут обеспечивать топливный материал с повышением содержания метана после частичного окисления топлива.

### Уровень техники

Традиционные средства выработки энергии путем сжигания топлива, как правило, не обеспечивают одновременное решение двух задач: выработки энергии с высокой эффективностью и улавливания углерода. Этот недостаток усугубляется при использовании твердых топлив в реакции горения ввиду твердой фазы (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 CO<sub>2</sub> и/или улучшение возможностей удаления (изоляция) возникающего диоксида углерода.

В одной из публикаций в области высокоэффективной выработки энергии с улавливанием углерода, патент 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 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 H<sub>2</sub>S, CS<sub>2</sub>, сернистый карбонил (COS), HCN и NH<sub>3</sub>. Частично окисленный газообразный продукт охлаждают, отделяют золу и опционально (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 могут иметь такие величины, чтобы исключалась необходимость в повышении давления газообразного топлива. Камера сгорания системы выработки энергии работает в условиях избытка O<sub>2</sub> в последующей реакции сгорания, в результате чего обеспечивается надежное преобразование загрязняющих продуктов сгорания из их восстановленного состояния в окисленные формы, содержащие преимущественно SO<sub>2</sub> и NO. Реактор частичного окисления может обеспечиваться стенками с испарительным охлаждением с использованием потока рециркуляционного CO<sub>2</sub> высокого давления, охлаждающего газообразный продукт частичного окисления перед отделением сажи при температуре примерно 800°C. Дальнейшее охлаждение газообразного продукта частичного окисления до температуры примерно 400°C необходимо для полного сгущения всех мельчайших частиц золы вместе с затвердевшими летучими неорганическими компонентами и их фильтрации для предотвращения осаждения твердой фазы, коррозии и закупорки 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, причем трубы устойчивы к коррозии металлов, 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 для высокоэффективного сгорания твердых топлив с улавливанием углерода.

### Сущность изобретения

В настоящем изобретении предлагаются системы и способы выработки энергии, в которых может осуществляться частичное окисление твердого или жидкого топлива и поток продуктов частичного окисления топлива может быть направлен в систему выработки энергии. В частности, эти системы и способы могут быть сконфигурированы таким образом, чтобы поток продуктов частичного окисления топлива был обогащен метаном.

В одном или нескольких вариантах осуществления настоящего изобретения реализуется предлагаемый способ выработки энергии с использованием установки, объединяющей систему частичного окисления (ЧОК или POX, от англ. Partial OXidation) и систему выработки энергии (СВЭ или PPS, от англ. Power Production System), включающий: соединение твердого или жидкого топлива, кислорода и катализатора в реакторе ЧОК в условиях, достаточных для частичного окисления топлива и формирования потока ЧОК, содержащего газообразное топливо, включающее метан; охлаждение потока ЧОК до температуры примерно 500°C или менее; выделение из потока ЧОК одного или более из твердой фазы (твердых частиц), расплавленных металлов и кислых газов; пропускание потока ЧОК через (противоточный) теп-

лообменник ЧОК, отбор некоторого количества тепла от потока ЧОК путем его охлаждения до температуры примерно 100°C или менее охлаждающим потоком и формирование потока газообразного топлива ЧОК; пропускание потока газообразного топлива ЧОК через влагоотделительный резервуар и отделение по меньшей мере части любой воды, присутствующей в потоке газообразного топлива ЧОК; повышение давления потока газообразного топлива ЧОК до величины примерно 12 МПа или более; сжигание газообразного топлива ЧОК в камере сгорания СВЭ для формирования потока продуктов сгорания под давлением по меньшей мере примерно 10 МПа и при температуре по меньшей мере примерно 800°C; расширение потока продуктов сгорания в турбине СВЭ для генерации энергии и формирования расширенного потока продуктов сгорания СВЭ; причем поток газообразного топлива ЧОК, давление которого повышают, содержит метан в количестве примерно 20 об.% или более, предпочтительно содержит метан в количестве примерно 30 об.% или более, примерно 50 об.% или более, примерно 60 об.% или более, примерно 70 об.% или более, примерно 80 об.% или более, примерно 90 об.% или более или примерно 95 об.% или более от общего объема потока газообразного топлива ЧОК.

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

Катализатор может быть выбран из группы, состоящей из щелочных металлов, щелочноземельных металлов, переходных металлов, их соединений, их комплексных соединений и их сочетаний.

Работа реактора ЧОК может осуществляться при температуре примерно 1000°C или менее, предпочтительно примерно 800°C или менее или примерно 600°C или менее.

Способ может включать дополнительно введение пара в реактор ЧОК.

Охлаждение потока ЧОК, выходящего из реактора ЧОК, может включать пропускание потока ЧОК через конвекционный охладитель в противотоке с охлаждающим потоком, который предпочтительно может включать одно или более из: потока рециркуляционной текучей среды высокого давления, отбираемой из системы СВЭ и возвращаемой в нее; потока воды высокого давления; потока азота; потока O<sub>2</sub> и СО<sub>2</sub> высокого давления; потока жидкого топлива, подаваемого в реактор ЧОК; потока очищенного и охлажденного газообразного топлива ЧОК.

Твердая фаза, выделенная из потока ЧОК, может содержать одно или более из частиц золы, непрореагировавшего угля и катализатора.

Выделение одного или более из твердой фазы, расплавленных металлов и кислых газов из потока ЧОК может включать пропускание потока ЧОК через фильтр частиц и скруббер с водяным орошением.

Перед стадией направления потока ЧОК в теплообменник ЧОК способ может включать пропускание по меньшей части потока ЧОК через каталитический реактор конверсии водяного газа, выполненный для преобразования СО и Н<sub>2</sub>О, содержащихся в потоке ЧОК, в СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>.

Отношение Н<sub>2</sub> к СО в газообразном топливе ЧОК, выходящем из каталитического реактора конверсии водяного газа, находится в диапазоне от примерно 5:1 до примерно 1:1.

Перед стадией направления потока ЧОК в теплообменник ЧОК способ может включать пропускание по меньшей части потока ЧОК через реактор гидролиза сернистого карбонила (COS), выполненный для преобразования COS в Н<sub>2</sub>S.

Поток ЧОК, пропускаемый через теплообменник ЧОК, может быть охлажден охлаждающим потоком, включающим одно или более из потока рециркуляционной текучей среды высокого давления, отбираемой из системы СВЭ и возвращаемой в нее; потока воды высокого давления; потока азота; потока O<sub>2</sub> и СО<sub>2</sub> высокого давления; потока жидкого топлива, подаваемого в реактор ЧОК; потока очищенного и охлажденного газообразного топлива ЧОК.

Перед повышением давления потока газообразного топлива ЧОК до величины примерно 12 МПа или более по меньшей мере часть потока газообразного топлива может быть пропущена через одну или через обе из установки удаления ртути и из установки удаления кислых газов.

По меньшей мере часть потока газообразного топлива ЧОК может быть пропущена через адсорбционную систему со слоем активированного угля, пропитанного серой, для удаления ртути из газообразного топлива ЧОК.

По меньшей мере часть потока газообразного топлива ЧОК может быть пропущена через установку удаления кислых газов, выполненную для удаления части или по существу всего по меньшей мере одного из Н<sub>2</sub>S и СО<sub>2</sub> из потока газообразного топлива ЧОК.

Перед повышением давления потока газообразного топлива ЧОК до величины примерно 12 МПа или более по меньшей мере часть потока газообразного топлива может быть пропущена через установку получения метана, выполненную для преобразования СО и Н<sub>2</sub> в СН<sub>4</sub> и Н<sub>2</sub>О.

Установка получения метана может быть каталитическим устройством, и получение метана может осуществляться с использованием катализатора на основе никеля.

Газообразное топливо ЧОК, выходящее из установки получения метана, может содержать метан в количестве примерно 75 об.% или более.

Установка получения метана может выделять тепло в результате проходящей в ней экзотермической реакции, и это тепло может быть поглощено путем пропускания газообразного топлива ЧОК, выхо-

дящего из установки получения метана, через теплообменник с охлаждающим потоком, который предпочтительно может быть одним или более из потока рециркуляционной текучей среды высокого давления, отбираемой из системы СВЭ и возвращаемой в нее; потока воды высокого давления; потока азота; потока  $O_2$  и  $CO_2$  высокого давления; потока жидкого топлива, подаваемого в реактор ЧОК; потока очищенного и охлажденного газообразного топлива ЧОК.

Способ может включать направление потока газообразного топлива ЧОК, выходящего из установки получения метана, во влагоотделительное устройство, в котором удаляется по меньшей мере часть воды, образовавшейся в реакторе получения метана.

После стадии повышения давления потока газообразного топлива ЧОК до величины примерно 12 МПа или более и перед стадией сжигания газообразного топлива ЧОК в камере сгорания СВЭ способ может включать нагрев сжатого газообразного топлива ЧОК путем его пропускания через теплообменник ЧОК.

Способ может также включать 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; дополнительно (но не обязательно) пропускание охлажденного потока продуктов сгорания СВЭ через водяной охладитель; очистку охлажденного потока продуктов сгорания СВЭ в скруббере СВЭ для формирования потока рециркуляционного  $CO_2$  путем удаления, по существу, всех остальных компонентов; и повышение давления потока рециркуляционного  $CO_2$  в компрессоре СВЭ для формирования потока сжатого рециркуляционного  $CO_2$ .

В одном или нескольких вариантах осуществления настоящего изобретения реализуется предлагаемый комплекс (объединение) системы ЧОК и системы СВЭ. Например, такой комплекс может содержать каталитический реактор ЧОК, приспособленный для частичного окисления жидкого или твердого топлива в присутствии кислорода, катализатора и дополнительно (но не обязательно) пара для формирования потока ЧОК, содержащего газообразное топливо; один или несколько компонентов, приспособленных для охлаждения потока ЧОК; теплообменник ЧОК, приспособленный для отбора тепла из потока ЧОК и обеспечения на выходе охлажденного газообразного топлива ЧОК; опционально (дополнительно, но не обязательно), установку удаления ртути; опционально установку удаления кислых газов; опционально, установку получения метана; опционально теплообменник, выполненный для отбора тепла от потока, выходящего из установки получения метана; компрессор, приспособленный для повышения давления газообразного топлива ЧОК до величины примерно 10 МПа или более; камеру сгорания СВЭ, приспособленную для сжигания газообразного топлива ЧОК в присутствии кислорода и потока сжатого рециркуляционного  $CO_2$  и формирования потока продуктов сгорания СВЭ под 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 потока продуктов сгорания СВЭ и передачи тепла потоку сжатого рециркуляционного  $CO_2$ ; компрессор СВЭ, приспособленный для повышения давления потока рециркуляционного  $CO_2$  до величины 10 МПа или более и формирования потока сжатого рециркуляционного  $CO_2$ ; опционально компоненты (контура текучей среды) для направления части потока сжатого рециркуляционного  $CO_2$  в теплообменник ЧОК; опционально, компоненты для направления части потока сжатого рециркуляционного  $CO_2$  в рекуперативный теплообменник СВЭ; опционально компоненты для направления потока сжатого рециркуляционного  $CO_2$  из теплообменника ЧОК в рекуперативный теплообменник СВЭ.

Настоящее изобретение включает, без ограничения, следующие варианты его осуществления.

Вариант 1. Способ выработки энергии с использованием установки, объединяющей систему ЧОК и систему СВЭ, включающий соединение твердого или жидкого топлива, кислорода и катализатора в реакторе ЧОК в условиях, достаточных для частичного окисления топлива и формирования потока ЧОК, содержащего метан; охлаждение потока ЧОК до температуры примерно  $500^\circ C$  или менее; выделение из потока ЧОК одного или более из твердой фазы, расплавленных металлов и кислых газов; пропускание потока ЧОК через теплообменник ЧОК, отбор некоторого количества тепла от потока ЧОК путем его охлаждения до температуры примерно  $100^\circ C$  или менее охлаждающим потоком и формирование потока газообразного топлива ЧОК, содержащего метан; пропускание потока газообразного топлива ЧОК через влагоотделительный резервуар и отделение по меньшей мере части воды, присутствующей в потоке газообразного топлива ЧОК; повышение давления потока газообразного топлива ЧОК до величины примерно 12 МПа или более; сжигание газообразного топлива ЧОК в камере сгорания СВЭ для формирования потока продуктов сгорания с давлением по меньшей мере примерно 10 МПа и при температуре по меньшей мере примерно  $800^\circ C$ ; расширение потока продуктов сгорания в турбине СВЭ для генерации энергии и формирования расширенного потока продуктов сгорания СВЭ; причем поток газообразного топлива ЧОК, давление которого повышают до величины примерно 12 МПа или более, содержит метан в количестве примерно 20 об.% или более от общего объема потока газообразного топлива ЧОК.

Вариант 2. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором катализатор, используемый в реакторе ЧОК, выбирают из группы, состоящей из щелочных металлов, щелочноземельных металлов, переходных металлов, их соединений, их комплексных соединений и их комбинаций.

Вариант 3. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором осуществляют работу реактора ЧОК при температуре примерно 1000°C или менее.

Вариант 4. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, включающий также введение пара в реактор ЧОК.

Вариант 5. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором охлаждение потока ЧОК, выходящего из реактора ЧОК, включает пропускание потока ЧОК через конвекционный охладитель с охлаждающим потоком.

Вариант 6. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором охлаждающий поток содержит одно или несколько из потока рециркуляционной текучей среды высокого давления, отбираемой из системы СВЭ и возвращаемой в нее; потока воды высокого давления; потока азота; потока жидкого топлива, подаваемого в реактор ЧОК; потока  $O_2$  и  $CO_2$  высокого давления; потока очищенного и охлажденного газообразного топлива ЧОК.

Вариант 7. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором твердая фаза, выделенная из потока ЧОК, включает одно или более из частиц золы, непрореагировавшего угля и катализатора.

Вариант 8. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором выделение одного или более из твердой фазы, расплавленных металлов и кислых газов из потока ЧОК включает пропускание потока ЧОК через фильтр частиц и скруббер с водяным орошением.

Вариант 9. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором перед стадией направления потока ЧОК в теплообменник ЧОК по меньшей части потока ЧОК пропускают через каталитический реактор конверсии водяного газа, выполненный для преобразования  $CO$  и  $H_2O$ , содержащихся в потоке ЧОК, в  $CO_2$  и  $H_2$ .

Вариант 10. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором отношение  $H_2$  к  $CO$  в газообразном топливе ЧОК, выходящем из каталитического реактора конверсии водяного газа, находится в диапазоне от примерно 5:1 до примерно 1:1.

Вариант 11. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором перед стадией направления потока ЧОК в теплообменник ЧОК по меньшей части потока ЧОК пропускают через реактор гидролиза сернистого карбонила ( $COS$ ), выполненный для преобразования  $COS$  в  $H_2S$ .

Вариант 12. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором поток ЧОК, пропускаемый через теплообменник ЧОК, охлаждают охлаждающим потоком, включающим одно или более из потока рециркуляционной текучей среды высокого давления, отбираемой из системы СВЭ и возвращаемой в нее; потока воды высокого давления; потока азота; потока жидкого топлива, подаваемого в реактор ЧОК; потока  $O_2$  и  $CO_2$  высокого давления; потока очищенного и охлажденного газообразного топлива ЧОК.

Вариант 13. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором перед повышением давления потока газообразного топлива ЧОК до величины примерно 12 МПа или более по меньшей мере часть потока газообразного топлива пропускают через одну или через обе из установки удаления ртути и установки удаления кислых газов.

Вариант 14. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором по меньшей мере часть потока газообразного топлива ЧОК пропускают через адсорбционную систему со слоем активированного угля, пропитанного серой, для удаления ртути из газообразного топлива ЧОК.

Вариант 15. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором по меньшей мере часть потока газообразного топлива ЧОК пропускают через установку удаления кислых газов, выполненную для удаления части или по существу всего по меньшей мере одного из  $H_2S$  и  $CO_2$  из потока газообразного топлива ЧОК.

Вариант 16. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором перед повышением давления потока газообразного топлива ЧОК до величины примерно 12 МПа или более по меньшей мере часть потока газообразного топлива ЧОК пропускают через установку получения метана, выполненную для преобразования  $CO$  и  $H_2$  в  $CH_4$  и  $H_2O$ .

Вариант 17. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором установка получения метана представляет собой каталитическое устройство и получение метана осуществляют с использованием катализатора на основе никеля.

Вариант 18. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором газообразное топливо ЧОК, выходящее из установки получения метана, содержит метан в количестве примерно 50 об.% или более.

Вариант 19. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, включающий пропускание газообразного топлива ЧОК, выходящего из установки получения метана, через теплообменник с охлаждающим потоком, причем охлаждающий поток опционально содержит одно или более из потока рециркуляционной текучей среды высокого давления, отбираемой из системы СВЭ и возвращаемой в нее; потока воды высокого давления; потока азота; потока  $O_2$  и  $CO_2$  высокого давления; потока жидкого топлива, подаваемого в реактор ЧОК; потока очищенного и охлажденного газообразного топлива ЧОК.

Вариант 20. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, включающий направле-

ние потока газообразного топлива ЧОК, выходящего из установки получения метана, во влагоотделительное устройство, в котором удаляется по меньшей мере часть воды, образовавшейся в реакторе получения метана.

Вариант 21. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, в котором после стадии повышения давления потока газообразного топлива ЧОК до величины примерно 12 МПа или более и перед стадией сжигания газообразного топлива ЧОК в камере сгорания СВЭ способ включает нагрев сжатого газообразного топлива ЧОК путем его пропускания через теплообменник ЧОК.

Вариант 22. Способ по любому предыдущему или следующему варианту, включающий также 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; дополнительно (но не обязательно) пропускание охлажденного потока продуктов сгорания СВЭ через водяной охладитель; очистку охлажденного потока продуктов сгорания СВЭ в скруббере СВЭ для формирования потока рециркуляционного  $\text{CO}_2$  путем удаления, по существу, всех остальных компонентов; повышение давления потока рециркуляционного  $\text{CO}_2$  в компрессоре СВЭ для формирования потока сжатого рециркуляционного  $\text{CO}_2$ .

Вариант 23. Комплекс системы ЧОК и системы СВЭ, содержащий каталитический реактор ЧОК, приспособленный для частичного окисления жидкого или твердого топлива в присутствии кислорода, катализатора и дополнительно (но не обязательно) пара, для формирования потока ЧОК, содержащего метан: один или несколько компонентов, приспособленных для охлаждения потока ЧОК; теплообменник ЧОК, приспособленный для отбора тепла от потока ЧОК и обеспечения на выходе охлажденного газообразного топлива ЧОК; компрессор, приспособленный для повышения давления газообразного топлива ЧОК до величины примерно 10 МПа или более; камеру сгорания СВЭ, приспособленную для сжигания газообразного топлива ЧОК в присутствии кислорода и потока сжатого рециркуляционного  $\text{CO}_2$  и формирования потока продуктов сгорания СВЭ под 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 потока продуктов сгорания СВЭ и передачи тепла потоку сжатого рециркуляционного  $\text{CO}_2$ ; компрессор СВЭ, приспособленный для повышения давления потока рециркуляционного  $\text{CO}_2$  до величины 10 МПа или более и формирования потока сжатого рециркуляционного  $\text{CO}_2$ .

Вариант 24. Комплекс системы ЧОК и системы СВЭ по любому предыдущему или следующему варианту, содержащий также установку удаления ртути.

Вариант 25. Комплекс системы ЧОК и системы СВЭ по любому предыдущему или следующему варианту, содержащий также установку удаления кислых газов.

Вариант 26. Комплекс системы ЧОК и системы СВЭ по любому предыдущему или следующему варианту, содержащий также установку получения метана.

Вариант 27. Комплекс системы ЧОК и системы СВЭ по любому предыдущему или следующему варианту, содержащий также теплообменник для отбора тепла от потока, выходящего из установки получения метана.

Вариант 28. Комплекс системы ЧОК и системы СВЭ по любому предыдущему или следующему варианту, содержащий также компоненты для направления части потока сжатого рециркуляционного  $\text{CO}_2$  в теплообменник ЧОК.

Вариант 29. Комплекс системы ЧОК и системы СВЭ по любому предыдущему или следующему варианту, содержащий также компоненты для направления части потока сжатого рециркуляционного  $\text{CO}_2$  в рекуперативный теплообменник СВЭ.

Вариант 30. Комплекс системы ЧОК и системы СВЭ по любому предыдущему или следующему варианту, содержащий также компоненты для направления потока сжатого рециркуляционного  $\text{CO}_2$  из теплообменника ЧОК в рекуперативный теплообменник СВЭ.

Эти и другие признаки, аспекты и достоинства настоящего изобретения станут очевидными после ознакомления с нижеприведенным подробным описанием со ссылками на прилагаемые чертежи, краткое описание которых приведено ниже. Изобретение охватывает любые комбинации двух, трех, четырех или более вышеуказанных вариантов, а также комбинации любых двух, трех, четырех или более признаков или элементов, указанных в описании, независимо от того, указана или нет комбинация таких признаков или элементов в описании конкретных вариантов. Описание необходимо воспринимать во всей его целостности, так что любые выделяемые признаки или элементы описанного изобретения в любых его аспектах и вариантах должны рассматриваться как сочетаемые, если в описании явно не указано иное.

#### **Краткое описание чертежей**

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

на фиг. 1 - блок-схема одного из вариантов установки, объединяющей системы ЧОК и СВЭ по настоящему изобретению, в которой энергию вырабатывают из газообразного топлива, получаемого в результате частичного окисления жидкого или твердого углеводородного или углеродосодержащего топлива в системе ЧОК;

на фиг. 2 - блок-схема одного из вариантов системы ЧОК, которая может быть объединена с системой СВЭ, причем система ЧОК выполнена для обеспечения потока топлива с повышенным содержанием метана.

### **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 полностью 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 ограничение его объема; приведенные варианты представлены прежде всего для того, чтобы настоящее изобретение соответствовало всем действующим нормативным требованиям. Формы единственного числа, использованные в описании и в прилагаемой формуле изобретения, не исключают множественного числа, если только в явной форме не указано иное.

Системы и способы по настоящему изобретению приспособлены для обеспечения частичного окисления углеродосодержащего 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.

В результате частичного окисления углеродосодержащего топлива в реакторе ЧОК формируется поток продуктов частичного окисления, который может быть охарактеризован в соответствии с содержащимися в нем 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). Поток газообразного топлива, полученного в результате частичного окисления, включающий по меньшей мере часть загрязняющих компонентов или по существу не содержащий таких компонентов, в частности, неокисляемых загрязнений, может быть подан в камеру 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. В способе, раскрытом в этом патенте, выработка энергии осуществляется с использованием преимущественно  $\text{CO}_2$  в качестве рабочей текучей среды. В частности, в способе используется турбина, в которой происходит расширение смеси рециркуляционного потока  $\text{CO}_2$  высокого давления и продуктов сгорания топлива. В процессе горения в качестве окислителя может использоваться чистый кислород, и перед подачей в камеру сгорания окислитель может быть разбавлен рециркуляционным  $\text{CO}_2$ . Горячий выхлопной поток турбины используется для частичного предварительного нагрева рециркуляционного потока  $\text{CO}_2$  высокого давления. Кроме горячего выхлопного потока турбины рециркуляционный поток  $\text{CO}_2$  также нагревается с использованием дополнительного тепла. Например, может использоваться энергия сжатия воздуха, подаваемого на станцию получения  $\text{O}_2$ .

Все загрязняющие компоненты топлива и загрязнения, возникшие в результате сгорания, такие как соединения серы,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Hg}$  и им подобные, отделяются для обезвреживания (захоронения), так что исключается выброс вредных веществ в атмосферу.

Системы и способы по настоящему изобретению могут быть совершенно определенно охарактеризованы как сочетание системы ЧОК с системой СВЭ. Цикл получения энергии, описанный в патенте US 8596075, представляет собой пример системы СВЭ, которая может быть использован в целях настоящего изобретения. В частности, поток газообразного топлива, выходящий из реактора ЧОК, может быть введен в камеру сгорания СВЭ как часть полного потока топлива, подаваемого в камеру сгорания. В цикле горения при высоком давлении газообразное топливо из потока реактора ЧОК должно быть в общем случае сжато до высокого давления, необходимого в камере сгорания системы выработки энергии. Например, поток газообразного топлива реактора ЧОК 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 до примерно 50 МПа, от примерно 15 до примерно 45 МПа или от примерно 20 до примерно 40 МПа.

Комплекс системы ЧОК и системы 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 разные аспекты систем и способов, рассмотренных в настоящем описании.

Поток газообразного топлива реактора ЧОК, получаемый в результате реакции кислорода с твердым или жидким топливом, может содержать различные количества твердых компонентов и расплавленных твердых компонентов, которые могут быть удалены перед введением потока газообразного топлива реактора ЧОК в камеру сгорания СВЭ. В частности, поток газообразного топлива реактора ЧОК может быть охлажден до температуры, при которой может обеспечиваться возможность удаления золы и других твердых материалов. Это существенная стадия для предотвращения загрязнения оборудования системы ЧОК и системы СВЭ, находящегося ниже по потоку. Тепло, высвобождаемое в процессе охлаждения потока газообразного топлива реактора ЧОК, 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 рециркуляционной текучей среды  $\text{CO}_2$ , используемой в системе выработки энергии после охлаждения потока продуктов сгорания и перед подачей рециркуляционной текучей среды  $\text{CO}_2$  в камеру сгорания системы выработки энергии. В частности, это тепло может быть передано рециркуляционной текучей среде  $\text{CO}_2$  после ее сжатия. В других вариантах это тепло может использоваться для нагрева топлива или компонента подаваемого потока топлива перед его подачей в реактор ЧОК для снижения потребления кислорода этим реактором. Дополнительно поток топлива и/или кислорода, подаваемого в реактор ЧОК и/или в камеру сгорания системы выработки энергии, может быть также нагрет теплом, отбираемым при охлаждении потока реактора ЧОК в том же или в другом теплообменнике.

Реактор ЧОК может быть приспособлен для обеспечения выходного потока газообразного топлива с температурой примерно  $600^\circ\text{C}$  или более, примерно  $800^\circ\text{C}$  или более, примерно  $1000^\circ\text{C}$  или более или примерно  $1200^\circ\text{C}$  или более. Более конкретно, температура может быть в диапазоне от примерно  $600$  до примерно  $2000^\circ\text{C}$ , от примерно  $700$  до примерно  $1800^\circ\text{C}$  или от примерно  $800$  до примерно  $1600^\circ\text{C}$ . В различных вариантах охлаждения потока реактора ЧОК (и соответственно газообразного топлива, вводимого затем в камеру сгорания), например примерно до комнатной температуры, может использоваться одна или несколько стадий.

В одном или в нескольких вариантах поток сразу на выходе реактора ЧОК, имеющий вышеуказанную температуру, может быть быстро охлажден до меньшей температуры. Вместо этого или дополнительно к этому поток реактора ЧОК может быть пропущен через один или несколько охлаждающих устройств. Быстрое охлаждение и/или охлаждение понижает температуру потока реактора ЧОК до примерно  $500^\circ\text{C}$  или ниже, до примерно  $400^\circ\text{C}$  или ниже или до примерно  $300^\circ\text{C}$  или ниже.

Быстрое охлаждение может осуществляться путем смешивания потока реактора ЧОК с одной или несколькими охлаждающими текучими средами. Неограничивающие примеры охлаждающих текучих сред, которые могут быть использованы в целях настоящего изобретения, включают поток рециркуляционного продукта реактора ЧОК (то есть по меньшей мере часть продукта реактора ЧОК, который уже был охлажден до температуры охлаждающей текучей среды, затем охлажден в газовом теплообменнике системы ЧОК с последующим отделением жидкой воды), воду с температурой охлаждающей текучей среды, жидкий  $\text{CO}_2$ , их смеси и им подобные текучие среды. Подходящая температура охлаждающей текучей среды может составлять примерно  $150^\circ\text{C}$  или менее, примерно  $100^\circ\text{C}$  или менее, примерно  $75^\circ\text{C}$  или менее или примерно  $60^\circ\text{C}$  или менее. В частности, температура охлаждающей текучей среды может быть в диапазоне от примерно  $10$  до примерно  $150^\circ\text{C}$ , от примерно  $15$  до примерно  $100^\circ\text{C}$  или от примерно  $20$  до примерно  $75^\circ\text{C}$ . 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 ЧОК, и количеством жидкой воды, используемой для быстрого охлаждения.

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

Охлажденный поток реактора ЧОК может быть охлажден дополнительно, например почти до комнатной температуры, с использованием одного или нескольких теплообменников. В частности, теплообменник может быть приспособлен для передачи тепла от охлаждаемого потока реактора ЧОК одной или нескольким частям потока рециркуляционного  $\text{CO}_2$  высокого давления, используемого в системе выработки энергии. Например, тепло может быть передано потоку рециркуляционного  $\text{CO}_2$  высокого давления, полученному с выхода компрессора рециркуляционного  $\text{CO}_2$  и/или рекуперативному теплообменнику, который используется в цикле выработки энергии, в одной или нескольких точках. Выбор температур для подачи тепла в рекуперативный теплообменник СВЭ, а также количество потоков, выходящих из этого теплообменника, нагреваемого 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.

Твердое топливо, используемое в реакторе ЧОК, 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, такой как вода, жидкий  $\text{CO}_2$  и их комбинации. Углеродосодержащее топливо, используемое в реакторе ЧОК, может быть жидким, таким как, например, разогретый битум, и в этом случае нет необходимости в суспендирующей среде.

В некоторых вариантах реактор ЧОК 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  $\text{CO}_2$ , который непрерывно рециркулируется в системе. Предпочтительно поток реактора ЧОК может быть охлажден с использованием вышеуказанного теплообмена, и охлажденный поток ЧОК (то есть газообразное топливо) может использоваться в системе выработки энергии без необходимости дополнительного повышения его давления. В качестве реактора ЧОК может использоваться любой реактор, приспособленный для сжигания углеродосодержащего топлива, особенно когда топливо окисляется 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 ЧОК может использоваться охлаждение испарением, как это описано в патенте US 9416728, выданном Palmer и др., в патенте US 9068743, выданном Palmer и др., и в патенте US 8986002, выданном Palmer и др., и полное содержание которых вводится ссылкой в настоящую заявку. В частности, камера сгорания ЧОК может быть приспособлена для приема потока топлива и источника кислорода для горения топлива. Дополнительно реактор ЧОК может содержать катализатор, и/или катализатор может вводиться в реактор ЧОК, например, в смеси с топливом. В реактор ЧОК дополнительно (но не обязательно) может быть подан поток пара.

В других вариантах реактор ЧОК по настоящему изобретению может быть приспособлен для работы при давлении, которое ниже давления в камере сгорания системы выработки энергии. В таких вариантах давление потока реактора ЧОК для использования в качестве топлива в камере сгорания системы выработки энергии может быть повышено перед вводом в камеру сгорания. В качестве реактора ЧОК может использоваться любое соответствующее 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 ЧОК могут включать внутренние секции теплопередачи, поглощающие лучистое тепло, выделяемое горелкой реактора ЧОК. В таких вариантах часть потока рециркуляционного  $\text{CO}_2$  из системы выработки энергии может быть нагрета и возвращена в систему СВЭ с более высокой температурой. Например, рециркуляционный  $\text{CO}_2$  с температурой примерно  $400^\circ\text{C}$  или выше может быть нагрет в реакторе ЧОК до температуры, находящейся в диапазоне от примерно  $450$  до примерно  $600^\circ\text{C}$ , и возвращен в рекуперативный теплообменник системы выработки энергии, где он может быть смешан с другой частью потока рециркуляционного  $\text{CO}_2$  высокого давления с аналогичной температурой.

Комбинация реактора ЧОК 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 ЧОК высокого давления, который поступает в камеру сгорания системы выработки энергии. Такие загрязняющие компоненты могут включать  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{Hg}$ . Указанные и другие загрязняющие компоненты могут окисляться в камере сгорания системы выработки энергии таким образом, что формируются, например,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{Hg}$ , которые затем могут быть удалены из системы выработки энергии. Например, поток воды, сконденсированной из выходного потока камеры сгорания системы выработки энергии, может быть кислым, содержащим одно или более из кислот  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и растворенных неорганических солей, как это описано в публикации патентной заявки US 2011/0179799. Однако в одном или в нескольких вариантах по существу все загрязняющие компоненты могут быть удалены из потока топлива реактора ЧОК перед его подачей в камеру сгорания СВЭ. Например, как это будет описано ниже, может быть полезно обеспечить поток реактора ЧОК с повышенным содержанием метана, например, содержащим метан в количестве примерно 20% или более, примерно 30% или более, примерно 50% или более, примерно 60% или более, примерно 70% или более, примерно 80% или более, примерно 90% или более, или примерно 95% или более от общего объема потока газообразного топлива ЧОК, подаваемого в камеру сгорания СВЭ. Переработка твердого топлива с использованием реактора ЧОК вместо его непосредственной подачи в камеру сгорания системы выработки энергии может быть особенно полезна ввиду возможности удаления возможных загрязняющих продуктов реакции, в частности золы и другой твердой фазы.

Системы и способы по настоящему изобретению могут быть приспособлены для обеспечения получения по существу всего тепла, высвобождаемого в процессе охлаждения потока реактора ЧОК, предпочтительно охлаждения до почти комнатной температуры, и передачу этого тепла потоку рециркуляционного  $\text{CO}_2$  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 повышение общего КПД системы выработки энергии. Это повышение обусловливается гораздо более высокой теп-

лоемкостью потока рециркуляционного  $\text{CO}_2$  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 рециркуляционного  $\text{CO}_2$ . Дополнительное тепло, отбираемое из быстро охлаждаемого потока реактора ЧОК 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 некоторых вариантах газообразное топливо, выходящее из реактора ЧОК, после быстрого охлаждения и удаления золы может содержать преимущественно  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  с температурой от примерно 250 до примерно 400°C. Для получения чистого  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  или их смесей с различными отношениями  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  может быть отобрана часть этого потока газообразного топлива. Типичные применения для  $\text{H}_2$ , получаемого в промышленных масштабах, могут включать, например, гидросульфурацию и гидрокрекинг на нефтеперерабатывающих заводах и потенциально топливо для транспортных средств. Типичные применения для смесей  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  могут включать, например, производство жидких углеводородов по методу Фишера-Тропша (например, с отношением  $\text{H}_2$  к  $\text{CO}$  в диапазоне от примерно 1,5 до примерно 3, в частности примерно 2,2) и производство метанола (например, с отношением  $\text{H}_2$  к  $\text{CO}$  в диапазоне от примерно 1,5 до примерно 2,5, в частности примерно 2). В каждом случае отношение  $\text{H}_2$  к  $\text{CO}$  должно быть увеличено от величины примерно 1 или менее в потоке газообразного топлива реактора ЧОК, причем это отношение зависит от рабочих параметров реактора ЧОК (например, от температуры и/или давления), от использования  $\text{CO}_2$  или воды в качестве суспендирующей среды для твердого топлива и от отношения  $\text{H}_2$  к углероду в твердом топливе. Суспензия на основе воды газообразного продукта реактора ЧОК с увеличенным содержанием воды будет содержать значительные части  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , преобразуемых в  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}_2$  с отношением  $\text{H}_2$  к  $\text{CO}$  несколько меньше 1. Суспензия на основе  $\text{CO}_2$  имеет гораздо меньшую величину отношения  $\text{H}_2$  к  $\text{CO}$ . Может быть полезным пропустить по меньшей мере часть отделенного, быстро охлажденного потока газообразного топлива реактора ЧОК через каталитический реактор сдвига для преобразования  $\text{CO}$  в  $\text{H}_2$  с использованием реакции с паром, как это выражено формулой (2).



Это может быть осуществлено путем использования части газообразного топлива с температурой от примерно 250 до примерно 400°C после удаления золы и использования катализатора сдвига  $\text{CO}$ , нечувствительного к сере, такого как, например, катализатор на основе кобальта и молибдена, в реакторе сдвига. Часть газообразного топлива, которая была обогащена  $\text{H}_2$ , может быть затем охлаждена путем пропускания через теплообменник системы ЧОК. 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 остальной частью охлажденного потока реактора ЧОК, и поток смеси может быть пропущен через многослойный абсорбер с изменениями давления, предназначенный для отделения  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  с необходимым их отношением в качестве одного непоглощенного компонента, в то время как поглощенные компоненты могут содержать все соединения серы,  $\text{HCN}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и большую часть  $\text{CH}_4$ . Эта непоглощенная часть может также содержать некоторое количество  $\text{N}_2$  и  $\text{Ar}$ , полученных из угля (или другого твердого или жидкого топлива), и кислород, используемый в реакторе ЧОК. Содержание этих инертных компонентов предпочтительно не должно превышать 5%, что приемлемо для газа, подаваемого как в реакторы Фишера-Тропша, так и в реакторы синтеза метанола. Если необходимо получить чистый  $\text{H}_2$ , то в абсорбер с изменениями давления подается только охлажденный газ, получаемый в реакции сдвига. Отходящий газ абсорбера с почти атмосферным давлением, содержащий все загрязняющие компоненты угля и загрязняющие продукты, возникающие в результате ЧОК, в восстановленной форме, сжимают и возвращают в остающееся газообразное топливо ЧОК для сжигания в камере сгорания СВЭ.

Один из вариантов системы выработки энергии с частичным окислением твердого топлива описывается со ссылкой на фиг. 1, причем твердое топливо обеспечивается форме потока 21 угля для частичного окисления в реакторе 4. Поток 21 угля подают в измельчитель 1, в котором осуществляется измельчение крупных частиц с частичным высушиванием и в который подают поток 23 сухого азота при температуре примерно 82°C (180°F), поступающий из установки 6 разделения воздуха, в которую поступает поток 62 воздуха и из которой выходят потоки 32 и 60 кислорода и поток 23 азота. В предпочтительных вариантах поток 23 сухого азота может быть нагрет высокотемпературным выхлопным потоком турбины с высоким содержанием  $\text{CO}_2$ , выходящим из рекуперативного теплообменника в системе СВЭ. Затем уголь дополнительно измельчают, предпочтительно до размера частиц примерно 250 мкм 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  $\text{CO}_2$ , подаваемым под давлением примерно 8,5 МПа или более.  $\text{CO}_2$  в потоке 29 суспендирующей

среды в этом варианте имеет температуру примерно 17°C. CO<sub>2</sub> в потоке 29 суспендирующей среды имеет плотность примерно 865 кг/м<sup>3</sup>. Давление среды, содержащей тонкоизмельченный уголь, перед смешиванием с CO<sub>2</sub> повышают в шлюзовой бункерной системе до величины 8,5 МПа. Из суспендирующего смесителя 3 выходит поток 26 суспензии уголь/CO<sub>2</sub>, 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 выполнена как система подачи сухого материала, в которой тонкоизмельченный уголь увлекается потоком азота и подается в горелку реактора ЧОК. Затем поток 26 закачивают в реактор 4 ЧОК, в котором его соединяют с потоком 56 кислорода, содержащим кислород предпочтительно в мольной концентрации 97% или более. Предпочтительные рабочие характеристики реактора 4 ЧОК: 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 ЧОК. Условия подготовки угольной суспензии могут быть откорректированы соответствующим образом.

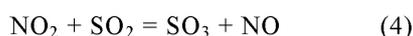
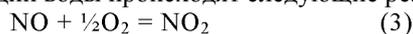
Реактор 4 ЧОК приспособливают для частичного окисления угля и формирования выходного потока, который подают в камеру быстрого охлаждения (не показана), или же этот поток может быть быстро охлажден в самом реакторе ЧОК, как это показано на фиг. 1. Поток реактора ЧОК может представлять собой газообразное топливо, которое содержит один или несколько горючих (то есть окисляемых) компонентов, включающих без ограничения H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, COS, CS<sub>2</sub>, HCN, NH<sub>3</sub>. Кроме того, поток реактора ЧОК может содержать Hg и другие загрязняющие компоненты, производные угля (или другого твердого топлива), а также инертные компоненты (например, N<sub>2</sub> и Ar), происходящие из потока 56 кислорода, и другие компоненты в следовых количествах. Поток реактора ЧОК может также включать один или несколько негорючих компонентов, таких как зола или шлак, которые при необходимости могут быть отфильтрованы.

Поток реактора ЧОК (внутри реактора или в отдельном компоненте оборудования) быстро охлаждают путем смешивания с охлаждающей текучей средой (с потоком 57 жидкой воды в рассматриваемом варианте). Как показано, поток 57 жидкой воды поступает в реактор ЧОК возле основания в дроссельной форсунке. Введение потока быстрого охлаждения обеспечивает охлаждение компонентов потока реактора ЧОК предпочтительно ниже температуры насыщения воды, равной примерно 304°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 ЧОК (или отдельного резервуара быстрого охлаждения), откуда ее отправляют для дальнейшей очистки. Охлажденный поток 58 реактора ЧОК направляют в скруббер 5, содержащий колонну промывки газа водой, на выходе которой установлен картридж тонкой фильтрации, приспособленный для снижения содержания пыли в газообразном топливе примерно до 4 мг/м<sup>3</sup> или менее, примерно до 3 мг/м<sup>3</sup> или менее или примерно до 2 мг/м<sup>3</sup> 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 ЧОК, можно указать систему ЧОК компании GE/Техасо с горелкой для суспензии уголь/вода, причем эта система может быть адаптирована для работы с суспензией уголь/CO<sub>2</sub>.

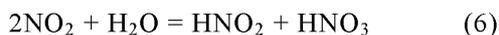
Очищенное газообразное топливо с потоком 55 пара охлаждают в теплообменнике 7. Выходящий поток 59 дополнительно охлаждают с использованием охлаждающей воды в противоточном теплообменнике 9. Жидкую воду 46 отделяют во влагоотделительном резервуаре 8 от входящего потока 61 и перекачивают с помощью насоса 11 обратно в реактор ЧОК вместе с некоторым количеством подпиточной воды из потока 38 для получения потока 57 воды быстрого охлаждения. 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 МПа. 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 СВЭ, в которой его соединяют с кислородом и CO<sub>2</sub>. В рассматриваемом варианте поток 51 смеси O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> содержит 30% O<sub>2</sub> и 70% CO<sub>2</sub> (мольные проценты). Поток 51 смеси O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> предпочтительно нагревают до температуры, подходящей для подачи в камеру 14 сгорания системы выработки энергии. Например, поток 51 смеси O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> может быть нагрет до температуры примерно 746°C в рекуперативном теплообменнике 12. Из рекуперативного теплообменника 12 выходит поток 52 горячего рециркуляционного CO<sub>2</sub> с температурой, подходящей для подачи в камеру 14 сгорания системы выработки энергии. Например, поток 52 горячего рециркуляционного CO<sub>2</sub> может быть нагрет до температуры примерно 746°C.

В камере сгорания системы выработки энергии газообразные продукты сгорания газообразного то-

плива охлаждают вместе с потоком 52 горячего рециркуляционного  $\text{CO}_2$ , в результате чего в рассматриваемом варианте в формируется общий поток 50 продуктов сгорания с температурой примерно  $1150^\circ\text{C}$  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 электрическую 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  $64^\circ\text{C}$ . Поток 53 охлаждают до температуры примерно  $17^\circ\text{C}$  в водяном охладителе 16. Дополнительно охлажденный поток 53 в форме потока 54 поступает в башенный газоочиститель 17, из которого выходит поток 40, 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 40 отделяют в форме потока 39 для дальнейшей обработки. При охлаждении выхлопного газа турбины в рекуперативном теплообменнике 12 ниже температуры конденсации воды происходят следующие реакции:



Вышеуказанные реакции протекают в присутствии жидкой воды, оксидов азота,  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  и избытка кислорода. Концентрации  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  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, примерно 95% оксидов азота преобразуется за один цикл в азотную кислоту в соответствии с нижеприведенной последовательностью реакций.



Азотная кислота, присутствующая в потоке 39 жидкого продукта, будет преобразовывать ртуть, имеющуюся в этом потоке, в дихлорид ртути. Башенный газоочиститель 17 предпочтительно снабжен дополнительной секцией промывки водой и удаления кислых 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 ЧОК 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  $\text{CO}_2$ , и давление этого потока повышают в многоступенчатом компрессоре 19 с охлаждением, содержащем на выходе многоступенчатый насос для плотных текучих сред, до давления, подходящего для подачи в камеру сгорания системы выработки энергии, например, примерно до 30,5 МПа. Поток 35, содержащий  $\text{CO}_2$ , выходит из последней ступени насоса 19 при температуре примерно  $54^\circ\text{C}$ , и часть этого потока, поток 70, нагревают в рекуперативном теплообменнике 12 до температуры примерно  $746^\circ\text{C}$  (поток 52  $\text{CO}_2$  на выходе теплообменника 12).

Установка 6 разделения воздуха в рассматриваемом варианте производит поток, содержащий кислород в количестве 99,5 молярных процентов, под давлением примерно 8,6 МПа, причем этот поток разделяется на два отдельных потока. Один поток 60 нагревают до температуры примерно  $294^\circ\text{C}$  в теплообменнике 7, из которого он выходит в форме потока 56 для использования в реакторе 4 ЧОК для частичного окисления угля. Другой поток 32 смешивают с  $\text{CO}_2$  под давлением примерно 8,6 МПа.  $\text{CO}_2$  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.%  $\text{O}_2$  и 70 мол.%  $\text{CO}_2$ . Давление этого потока 33 разбавленного  $\text{O}_2$  повышают до величины примерно 30,5 МПа в многоступенчатом компрессоре 20 с охлаждением, выходящий из него поток 34 нагревают в рекуперативном теплообменнике 12 до температуры примерно  $746^\circ\text{C}$  и подают в камеру 14 сгорания системы выработки энергии в форме потока 51. Разбавление потока 32 чистого  $\text{O}_2$  существенно для обеспечения 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  $\text{O}_2$  в количестве 30 мол.%, эффективно снижает температуру адиабатического горения в камере 14 сгорания СВЭ до величины примерно  $2400^\circ\text{C}$ . Другую часть потока 30, содержащего  $\text{CO}_2$  (поток 29), направляют в суспендирующий смеситель 3 для обеспечения

сuspенди́рования тонкоизмельченного угля.

Охлаждение быстро охлажденного газа системы ЧОК 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 почти комнатной до примерно 400°C. Это может обеспечиваться путем использования адиабатических воздушных компрессоров в установке 6 разделения воздуха и передачи тепла, выделяющегося при сжатии, части потока рециркуляционного CO<sub>2</sub> высокого давления. В рассматриваемом варианте необходимая внешняя тепловая нагрузка обеспечивается охлаждением быстро охлажденного газа ЧОК в теплообменнике 7 и нагревом двух рециркуляционных потоков высокого давления. Поток 28 рециркуляционного CO<sub>2</sub> высокого давления при температуре примерно 54°C и поток 43 рециркуляционного CO<sub>2</sub> высокого давления при температуре примерно 120°C, выходящий из промежуточной точки рекуперативного теплообменника 12, нагревают для обеспечения объединенного нагретого выходного потока 44 при температуре примерно 294°C, возвращаемого для смешивания с основным рециркуляционным потоком CO<sub>2</sub> в соответствующей температурной точке рекуперативного теплообменника 12. Дополнительно (но необязательно) в рекуперативный теплообменник также может быть возвращен выходящий поток 67 для смешивания с основным рециркуляционным потоком CO<sub>2</sub> в соответствующей температурной точке.

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 газе системы ЧОК 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 одном или нескольких вариантах система ЧОК может быть сконфигурирована для обеспечения потока топлива с повышенным содержанием метана. Такая система ЧОК может включать любые элементы, отличающиеся от указанных в настоящем описании. В частности, такая система ЧОК может содержать каталитический реактор ЧОК, который может быть сконфигурирован для частичного окисления кислородом твердого или жидкого топлива в присутствии катализатора и дополнительно, но не обязательно, пара для формирования потока продуктов ЧОК, характеризующегося повышенным содержанием метана, по сравнению с частичным окислением без катализатора. Катализатор может быть любым катализатором, подходящим для стимулирования получения метана в реакции частичного окисления углеродосодержащего или углеводородного топлива. Например, подходящие катализаторы могут включать щелочные металлы, щелочноземельные металлы, переходные металлы, их соединения, их комплексные соединения и их сочетания. В качестве таких катализаторов может использоваться никель, например никель, осажденный на пористом носителе. Примеры каталитических компонентов реакции ЧОК, которые могут использоваться в различных вариантах осуществления настоящего изобретения для получения потока топлива ЧОК со сравнительно высоким содержанием метана, описаны в публикациях патентных заявок US № 2003/0167961, 2006/0265953, 2007/000177, 2007/083072, 2007/0277437, 2009/0048476, 2009/0090056, 2009/0090055, 2009/0165383, 2009/0166588, 2009/0165379, 2009/0170968, 2009/0165380, 2009/0165381, 2009/0165361, 2009/0165382, 2009/0169449, 2009/0169448, 2009/0165376, 2009/0165384, 2010/0076235, 2011/0031439, 2011/0062721 и 2011/0064648, содержание которых включается ссылкой в настоящую заявку.

В некоторых вариантах система ЧОК, сконфигурированная для обеспечения повышенного содержания метана, может эксплуатироваться в сравнительно мягких условиях. Например, работа реактора ЧОК может осуществляться при температуре примерно 1000°C или менее, примерно 800°C или менее, примерно 600°C или менее или примерно 400°C или менее (например, с нижней предельной температурой примерно 200°C). Более конкретно, реактор ЧОК может работать в диапазоне температур от примерно 300 до примерно 1000°C, от примерно 325 до примерно 900°C, от примерно 350 до примерно 800°C или от примерно 400 до примерно 700°C.

Один из вариантов системы ЧОК, обеспечивающей повышенное содержание метана, описан ниже со ссылками на фиг. 2. Как показано на фиг. 2, поток 115 твердого топлива, поток 56 источника кислорода и поток 116 пара подаются в реактор 4 ЧОК для частичного окисления твердого топлива. Также в реакторе 4 ЧОК может обеспечиваться катализатор. Катализатор может быть закрепленным устройством в реакторе ЧОК, и/или он может быть текучей средой. Например, частицы катализатора могут быть сме-

шаны с топливом в потоке 115. Поток 116, подаваемый в реактор 4 ЧОК, может быть эффективен для обеспечения управления рабочей температурой в требуемом диапазоне и/или для максимизации содержания метана в потоке выходящих продуктов. Поток 85 продуктов, выходящих из реактора 4 ЧОК, может содержать любое сочетание таких компонентов, таких как  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ , уголь,  $CH_4$ ,  $H_2S$ ,  $COS$ ,  $CS_2$ ,  $HCN$  и  $NH_3$ . В одном или нескольких вариантах использование каталитической реакции может быть эффективным для существенного увеличения содержания метана в потоке, выходящем из реактора ЧОК, по сравнению с вариантами, в которых катализатор не используется. Таким образом, поток 85 продуктов, выходящих из реактора 4 ЧОК, может указываться как поток с повышенным содержанием метана. Этот поток может содержать по меньшей мере на 5 об.%, по меньшей мере на 10 об.%, по меньшей мере на 20 об.% или по меньшей мере на 30 об.% (например, от 5 до 95%, от 10 до 75% или от 20 до 60%) больше метана по сравнению с вариантами, в которых катализатор не используется. В некоторых вариантах поток 85 продуктов, выходящих из реактора 4 ЧОК, может содержать метан в количестве по меньшей мере 10 об.%, по меньшей мере 15 об.%, по меньшей мере 20 об.% или по меньшей мере 25 об.% (с верхним пределом содержания метана 95, 85 или 75 об.%) от общего объема продуктов в потоке ЧОК.

Поток 85 продуктов ЧОК подают в конвекционный охладитель 86 для охлаждения потока 85 до примерно  $500^\circ C$  или менее, до примерно  $400^\circ C$  или менее или до примерно  $300^\circ C$  или менее (нижняя предельная величина - примерно  $100^\circ C$ ). Охлаждающий поток, используемый в конвекционном охладителе 86, может включать поток рециркуляционной 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 очищенный и охлажденный поток газообразного топлива системы ЧОК. Вместо охладителя 86 или в дополнение к нему могут использоваться и другие охлаждающие устройства, включая (без ограничения) установку быстрого охлаждения.

Охлажденный поток 87 продуктов ЧОК, выходящий из конвекционного охладителя, направляют в фильтрационную установку 88 для удаления твердой фазы из потока продуктов ЧОК. Поток 117 твердой фазы, выводимой из фильтрационной установки 88, может включать, например, частицы золы, несгоревшего угля и катализатора. Любой катализатор, выделенный из потока 117 твердой фазы, может быть подан в систему восстановления катализатора для его повторного использования, как это описано в публикациях патентных заявок US 2010/0168495 и US 2011/0031439, содержание которых включается ссылкой в настоящую заявку.

Поток 89 охлажденных и профильтрованных продуктов ЧОК, выходящий из фильтрационной установки 88, подают в скруббер 90 с водяным орошением, который может быть сконфигурирован для удаления всех мелких частиц. Кроме того, скруббер 90 с водяным орошением может быть сконфигурирован для удаления любых растворимых кислых газов, таких как  $NH_3$ .

Очищенный поток 91 топлива ЧОК может быть подвергнут одной или несколькими стадиям преобразования для изменения состава потока. Как показано на фиг. 2, очищенный поток 91 топлива системы ЧОК пропускают через разделительное устройство 92 для разделения потока 91 на первый поток 93 и второй поток 94. Первый поток 93 топлива системы ЧОК направляют в установку 95 каталитического гидролиза  $COS$  для преобразования  $COS$  в  $H_2S$ . Второй поток 94 топлива ЧОК направляют в каталитический реактор 96 конверсии водяного газа для преобразования  $CO$  и  $H_2O$  в  $CO_2$  и  $H_2$ . Потоки, выходящие из установки 95 каталитического гидролиза  $COS$  и из каталитического реактора 96 конверсии водяного газа, могут быть объединены в поток 97 топлива системы ЧОК. При необходимости весь поток 91 топлива системы ЧОК может быть обработан с помощью установки 95 каталитического гидролиза  $COS$  или весь поток 91 может быть обработан с помощью каталитического реактора 96 конверсии водяного газа. Например, в одном или нескольких вариантах катализатор, используемый в реакторе 96 конверсии водяного газа, может также обеспечивать гидролиз  $COS$ . То есть установка 95 каталитического гидролиза  $COS$  может быть исключена. Коэффициент разделения разделительного устройства 92 может быть определен отношением  $H_2/CO$  потока 97 топлива системы ЧОК. Например, отношение  $H_2/CO$  в потоке 97 топлива системы ЧОК может быть от примерно 5:1 до примерно 1:1, от примерно 4:1 до примерно 2:1 или примерно 3:1. Отношение может быть определено на основе требуемого окончательного содержания метана в осуществляемом далее процессе получения метана, в котором  $CO+3H_2$  дает  $CH_4+H_2O$ . Например, отношение 3:1 может быть особенно эффективным для получения целевого синтез-газа с содержанием метана, превышающим 90 об.%.

Поток 97 топлива системы ЧОК пропускают через противоточный теплообменник 7 ЧОК для отбора некоторого количества тепла путем охлаждения потока топлива системы ЧОК охлаждающим потоком до температуры примерно  $100^\circ C$  или менее. Например, как показано на фиг. 2, поток 60 кислорода нагревают в противоточном теплообменнике 7 ЧОК потоком 97 топлива системы ЧОК, и он выходит в форме потока 56, который может быть использован в реакторе 4 ЧОК для частичного окисления угля, как показано на фиг. 1. Поток 28 рециркуляционного  $CO_2$  высокого давления и поток 43 рециркуляционного  $CO_2$  высокого давления (ранее были указаны со ссылками на фиг. 1) могут быть нагреты в теплооб-

меннике системы ЧОК для обеспечения объединенного нагретого потока 44, который смешивают с основным потоком рециркуляционного  $\text{CO}_2$  в рекуперативном теплообменнике 12. Выходящий поток 67 также может быть возвращен в рекуперативный теплообменник 12 для смешивания с основным потоком рециркуляционного  $\text{CO}_2$ .

Поток 98 топлива системы ЧОК, выходящий из теплообменника 7 ЧОК, может быть дополнительно охлажден охлаждающей водой в теплообменнике 99, например до температуры примерно  $35^\circ\text{C}$ . Поток 100 топлива системы ЧОК, выходящий из теплообменника 99 с водяным охлаждением, пропускают через влагоотделительное устройство 101, из которого может быть выведен поток 103 водяного конденсата. В зависимости от состава газообразного топлива системы ЧОК, который может варьироваться в зависимости от состава топлива, подвергнутого окислению в реакторе ЧОК, может потребоваться дополнительная очистка газообразного топлива системы ЧОК. В варианте, схема которого приведена на фиг. 2, поток 102 топлива ЧОК пропускают через установку 104 удаления ртути и кислых газов. Потоки кислых газов, выходящих из установки 104, могут включать поток 105  $\text{H}_2\text{S}$  и поток 106  $\text{CO}_2$  (могут быть выведены также и другие кислые газы). Соединение  $\text{H}_2\text{S}$  потока 105 может быть преобразовано в жидкую элементарную серу, например с использованием процесса Клауса, или же может быть преобразовано в серную кислоту, пригодную для предложения в качестве коммерческого продукта, например с использованием способа мокрого катализа для получения серной кислоты. Давление  $\text{CO}_2$  в потоке 106, выводимом из установки выведения кислых газов, может быть повышено, и поток 106 может быть введен в поток 35 сжатого рециркуляционного  $\text{CO}_2$  (фиг. 1), или он может быть использован иным образом, или выведен из системы. В различных вариантах может использоваться отдельная установка выведения ртути, может использоваться отдельная установка выведения кислых газов или может использоваться объединенная установка выведения ртути и кислых газов.

В качестве неограничивающего примера установки выведения ртути можно указать адсорбционную систему со слоем активированного угля, пропитанного серой. В качестве неограничивающих примеров выведения кислых газов может указать использование одного или нескольких химических реагентов, физических растворителей и гибридных растворителей. Конкретные неограничивающие примеры систем выведения кислых газов, которые могут использоваться, включают: системы метаноловых растворителей (например, REC TISOL®); системы композиционных растворителей (например, SULFINOL®, представляющий собой смесь диизопропаноламина (30-45%) или метилдиэтанололамина, сульфолана (диоксид тетрагидропифена) (40-60%) и воды (5-15%)); системы аминовой очистки (например, использующие диэтанолламин, моноэтанолламин, метилдиэтанолламин и диизопропаноламин); SELEXOL™ (диметилэфиры полиэтиленгликоля); и FLEXSORB™ (стерически затрудненные амины). Один из способов может включать использование двухстадийного процесса SELEXOL™ (компания UOP LLC, USA), в котором  $\text{H}_2\text{S}$  выводится на первой стадии, а  $\text{CO}_2$  выводится на второй стадии.

Поток 107 топлива системы ЧОК может быть подан в установку 108 получения метана, которая может быть выполнена для преобразования  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  в  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Установка 108 получения метана может быть каталитическим устройством, в котором используется, например, катализатор на основе никеля. Неограничивающим примером способа получения метана, который может осуществляться в установке 108, является высокотемпературный процесс TREMP™, описанный в патенте US 8530529, содержание которого вводится ссылкой в настоящую заявку.

Поток 109 топлива системы ЧОК, выходящий из установки 108 получения метана, может быть указан как поток газообразного топлива системы ЧОК с повышенным содержанием метана, которое может составлять примерно 50 об.% или более, примерно 60 об.% или более, примерно 70 об.% или более, примерно 80 об.% или более, примерно 90 об.% или более или примерно 95 об.% или более (с верхним пределом 99,9%) от всего объема потока. Тепло, выделяемое при получении метана, может быть использовано в одном или нескольких теплообменниках, которые могут быть интегрированы в установку 108 получения метана или могут использоваться как отдельные компоненты.

Поток 109 топлива ЧОК с повышенным содержанием метана может быть дополнительно охлажден в теплообменнике 110 с охлаждающей водой, например, до температуры примерно  $20^\circ\text{C}$ . Охлажденный поток 111 топлива ЧОК с повышенным содержанием метана может быть подан во влагоотделительное устройство 112 для выведения воды, выделяемой в установке 108 получения метана, в потоке 114.

Давление в охлажденном потоке 113 газообразного топлива системы ЧОК с повышенным содержанием метана может быть повышено с помощью компрессора, показанного на фиг. 1. Например, давление в потоке 113 газообразного топлива ЧОК может быть повышено до примерно 30,5 МПа в компрессоре 10 (фиг. 1), и затем газообразное топливо ЧОК повышенного давления может быть подано в систему выработки энергии. Потоки 103 и 114 конденсата воды могут перекачиваться под давлением, которое несколько выше рабочего давления реактора 4 ЧОК, и эти потоки повышенного давления могут быть нагреты в конвекционном охладителе 86, и/или в теплообменнике 7 системы ЧОК, и/или в теплообменнике 12 СВЭ (фиг. 1) для получения пара, по меньшей мере часть которого может использоваться для подачи в реактор 4 ЧОК.

В одном или нескольких вариантах некоторые компоненты системы ЧОК, показанные на фиг. 2,

могут быть исключены. Например, поток 91 очищенного топлива системы ЧОК, выходящий из скруббера 90 с водяным орошением, может быть направлен напрямую в теплообменник 7 системы ЧОК. Поток 98 газообразного топлива системы ЧОК может быть также охлажден охлаждающей водой в теплообменнике 99 (например, до температуры примерно 20°C), и водяной конденсат может быть отделен во влагоотделительном устройстве 101 и выведен в форме потока 103 водяного конденсата. Охлажденный поток 102 топлива ЧОК, по существу не содержащий жидкой воды, может быть направлен напрямую в компрессор 10 (фиг. 1), где его давление повышается, например, до примерно 30,5 МПа, и затем его направляют в систему выработки энергии. Упрощенная система, показанная на схеме фиг. 2, может быть эффективна, например, для снижения капитальных и эксплуатационных затрат. Более того, общий КПД системы может быть повышен в связи с уменьшением паразитных нагрузок на систему.

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

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

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

соединение твердого или жидкого топлива, кислорода и катализатора в реакторе ЧОК в условиях, достаточных для частичного окисления топлива и формирования потока продукта ЧОК, содержащего метан;

охлаждение потока продукта ЧОК до температуры примерно 500°C или менее;

выделение из охлажденного потока продукта ЧОК одного или более из твердой фазы, расплавленных металлов и кислых газов;

пропускание охлажденного и отфильтрованного потока продукта ЧОК через разделительное устройство для разделения охлажденного и отфильтрованного потока продукта ЧОК на первый отделенный поток и второй отделенный поток, причем первый отделенный поток пропускают через каталитический реактор конверсии водяного газа, выполненный для преобразования CO и H<sub>2</sub>O, содержащихся в охлажденном и отфильтрованном потоке продукта ЧОК, в CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>, второй отделенный поток пропускают через реактор гидролиза сернистого карбонила (COS), выполненный с возможностью преобразования COS в H<sub>2</sub>S, и объединяют первый отделенный поток, выходящий из каталитического реактора конверсии водяного газа, со вторым потоком продукта, выходящим из реактора гидролиза COS, образуя поток топлива ЧОК;

пропускание потока топлива ЧОК через теплообменник ЧОК, отбор некоторого количества тепла от потока топлива ЧОК путем его охлаждения до температуры примерно 100°C или менее посредством охлаждающего потока и формирование потока газообразного топлива ЧОК, содержащего метан;

пропускание потока газообразного топлива ЧОК через влагоотделительный резервуар и отделение по меньшей мере части воды, присутствующей в потоке газообразного топлива ЧОК, с образованием потока отфильтрованного газообразного топлива ЧОК;

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

сжигание отфильтрованного и сжатого газообразного топлива ЧОК в камере сгорания СВЭ для формирования потока продуктов сгорания под давлением по меньшей мере примерно 10 МПа и при температуре по меньшей мере примерно 800°C; и

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

причем поток отфильтрованного газообразного топлива ЧОК, давление которого повышают до величины примерно 12 МПа или более, содержит метан в количестве примерно 20 об.% или более от общего объема потока отфильтрованного газообразного топлива ЧОК, и

перед стадией повышения давления потока газообразного топлива ЧОК до величины примерно 12 МПа или более по меньшей мере часть потока газообразного топлива пропускают через установку получения метана, выполненную для преобразования CO и H<sub>2</sub> в CH<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>O.

2. Способ по п.1, в котором катализатор, используемый в реакторе ЧОК, выбирают из группы, состоящей из щелочных металлов, щелочноземельных металлов, переходных металлов, их соединений, их комплексных соединений и их комбинаций.

3. Способ по п.1 или 2, в котором осуществляют работу реактора ЧОК при температуре примерно 1000°C или менее.

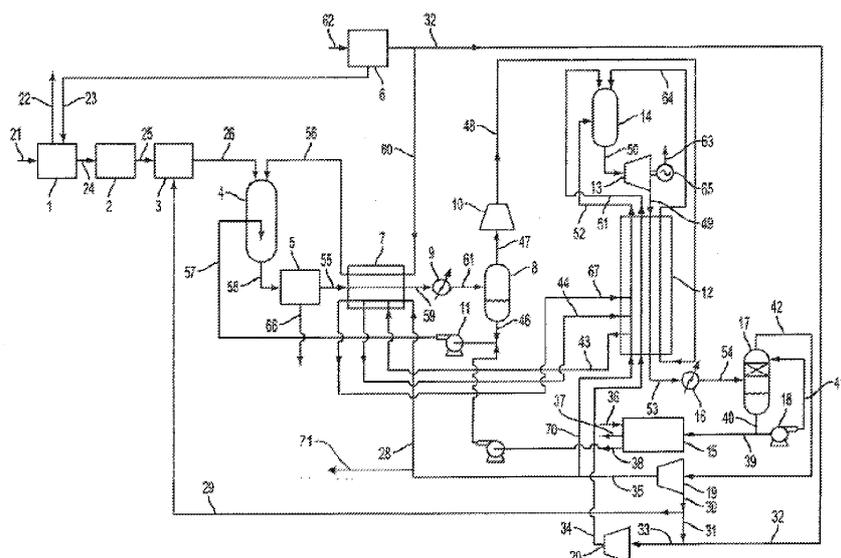
4. Способ по любому из пп.1-3, дополнительно включающий введение пара в реактор ЧОК.
5. Способ по любому из пп.1-4, в котором охлаждение потока продукта ЧОК, выходящего из реактора ЧОК, включает пропускание потока продукта ЧОК через конвекционный охладитель с охлаждающим потоком.
6. Способ по п.5, в котором охлаждающий поток содержит одно или более из потока рециркуляционной текучей среды высокого давления, отбираемой из системы СВЭ и возвращаемой в нее;
  - потока воды высокого давления;
  - потока азота;
  - потока жидкого топлива, подаваемого в реактор ЧОК;
  - потока  $O_2$  и  $CO_2$  высокого давления;
  - потока очищенного и охлажденного газообразного топлива ЧОК.
7. Способ по любому из пп.1-6, в котором твердая фаза, выделенная из охлажденного потока продукта ЧОК, включает одно или более из частиц золы, непрореагировавшего угля и катализатора.
8. Способ по любому из пп.1-7, в котором выделение одного или более из твердой фазы, расплавленных металлов и кислых газов из охлажденного потока продукта ЧОК включает пропускание охлажденного потока продукта ЧОК через фильтр частиц и скруббер с водяным орошением.
9. Способ по п.1, в котором отношение  $H_2$  к  $CO$  в первом отделенном потоке, выходящем из каталитического реактора конверсии водяного газа, находится в диапазоне примерно от 5:1 до примерно 1:1.
10. Способ по любому из пп.1-9, в котором поток топлива ЧОК, пропускаемый через теплообменник ЧОК, охлаждается посредством охлаждающего потока, включающего одно или более из потока рециркуляционной текучей среды высокого давления, отбираемой из системы СВЭ и возвращаемой в нее;
  - потока воды высокого давления;
  - потока азота;
  - потока жидкого топлива, подаваемого в реактор ЧОК;
  - потока  $O_2$  и  $CO_2$  высокого давления;
  - потока очищенного и охлажденного газообразного топлива ЧОК.
11. Способ по любому из пп.1-10, в котором перед повышением давления потока отфильтрованного газообразного топлива ЧОК до величины примерно 12 МПа или более по меньшей мере часть потока отфильтрованного газообразного топлива ЧОК пропускают через одну или через обе из установки удаления ртути и установки удаления кислых газов.
12. Способ по п.11, в котором по меньшей мере часть потока отфильтрованного газообразного топлива ЧОК пропускают через адсорбционную систему со слоем активированного угля, пропитанного серой, для удаления ртути из газообразного топлива ЧОК.
13. Способ по п.11, в котором по меньшей мере часть потока отфильтрованного газообразного топлива ЧОК пропускают через установку удаления кислых газов, выполненную с возможностью удаления части или по существу всего по меньшей мере одного из  $H_2S$  и  $CO_2$  из потока отфильтрованного газообразного топлива ЧОК.
14. Способ по п.1, в котором установка получения метана представляет собой каталитическое устройство.
15. Способ по п.14, в котором получение метана осуществляют с использованием катализатора на основе никеля.
16. Способ по п.14, в котором обогащенное метаном газообразное топливо ЧОК, выходящее из установки получения метана, содержит метан в количестве примерно 50 об.% или более.
17. Способ по п.15 или 16, включающий пропускание обогащенного метаном газообразного топлива ЧОК, выходящего из установки получения метана, через установленный ниже по потоку теплообменник с охлаждающим потоком, причем охлаждающий поток опционально включает одно или более из потока рециркуляционной текучей среды высокого давления, отбираемой из системы СВЭ и возвращаемой в нее;
  - потока воды высокого давления;
  - потока азота;
  - потока  $O_2$  и  $CO_2$  высокого давления;
  - потока жидкого топлива, подаваемого в реактор ЧОК;
  - потока очищенного и охлажденного газообразного топлива ЧОК.
18. Способ по любому из пп.14-17, включающий пропускание потока обогащенного метаном газообразного топлива ЧОК, выходящего из установки получения метана, через сепаратор, в котором удаляется по меньшей мере часть любой воды, образовавшейся в реакторе получения метана.
19. Способ по любому из пп.1-18, включающий после стадии повышения давления потока отфильтрованного газообразного топлива ЧОК примерно до 12 МПа или более и перед стадией сжигания отфильтрованного и сжатого газообразного топлива ЧОК в камере сгорания СВЭ, нагрев отфильтрованного и сжатого газообразного топлива ЧОК путем его пропускания через теплообменник ЧОК.

20. Способ по любому из пп.1-19, дополнительно включающий пропускание расширенного потока продуктов сгорания СВЭ через рекуперативный теплообменник системы СВЭ для отбора тепла от потока продуктов сгорания СВЭ и формирования охлажденного потока продуктов сгорания СВЭ;

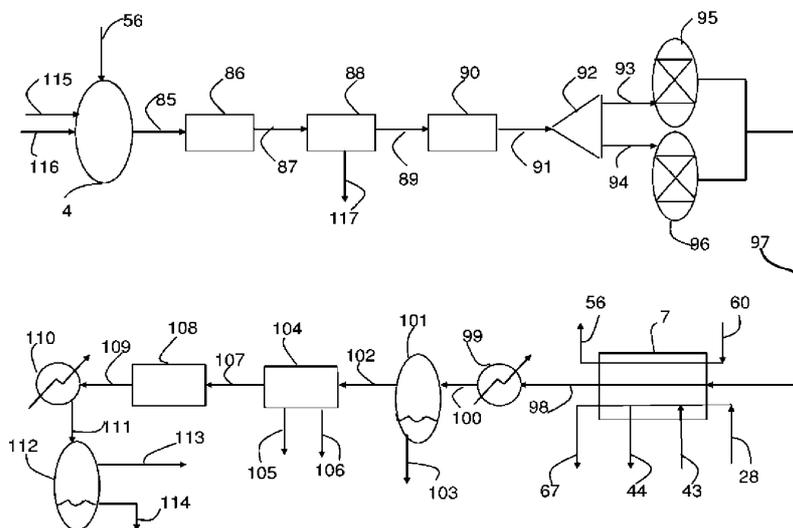
опционально пропускание охлажденного потока продуктов сгорания СВЭ через водяной охладитель;

очистку охлажденного потока продуктов сгорания СВЭ в скруббере СВЭ для формирования потока рециркуляционного CO<sub>2</sub> путем удаления, по существу, всех остальных, не содержащих CO<sub>2</sub> компонентов;

повышение давления потока рециркуляционного CO<sub>2</sub> в компрессоре СВЭ для формирования потока сжатого рециркуляционного CO<sub>2</sub>.



Фиг. 1



Фиг. 2



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2