

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **036575**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2020.11.25**

(51) Int. Cl. **F01K 25/10** (2006.01)  
**F02C 3/34** (2006.01)

(21) Номер заявки  
**201892361**

(22) Дата подачи заявки  
**2017.04.20**

---

(54) **СПОСОБ ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ**

---

(31) **62/325,752**

(32) **2016.04.21**

(33) **US**

(43) **2019.05.31**

(86) **PCT/IB2017/052283**

(87) **WO 2017/182980 2017.10.26**

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

(72) Изобретатель:  
**Форрест Брок Алан, Фетведт  
Джереми Эрон, Макгроуди Питер  
Майкл (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)**

(56) **US-A1-2013205746  
EP-A2-0831205  
US-B1-6269624  
GB-A-2484080**

(57) В настоящей заявке описаны системы и способы, в которых может быть осуществлено окисление разбавленного потока углеводородов для обеспечения дополнительной энергии в системе выработки энергии. Окисление может быть осуществлено без существенного горения углеводородов. Таким образом, разбавленные потоки углеводородов, которые иначе необходимо было бы подвергать затратным операциям разделения, могут быть эффективно использованы для улучшения эффективности системы выработки энергии. В частности, предложенные системы и способы могут использовать разбавленный поток углеводородов, содержащий существенное количество диоксида углерода, который может быть получен в процессе добычи углеводородов, таком как нефтедобыча с использованием способов повышения нефтеотдачи, а также традиционном способе добычи углеводородов.

**036575**  
**B1**

**036575**  
**B1**

### Область техники

Настоящее изобретение относится к системам и способам, посредством которых потоки различных газов могут быть подвергнуты окислению для выработки энергии. В частности, поток газа может содержать углеводороды и один или несколько разбавителей. Энергия, вырабатываемая при окислении, может передаваться, например, системе выработки энергии.

### Уровень техники

Во многих производственных процессах возникают потоки газообразных продуктов, которые содержат горючие углеводородные материалы. Во многих случаях такие потоки могут включать углеводороды, а также один или несколько других материалов, которые могут рассматриваться как добавки, загрязняющие или иным образом разбавляющие углеводороды и, таким образом, снижающие их полезность. Диоксид углерода - это пример другого материала, который часто присутствует в смеси с газообразными углеводородами, в частности, в различных процессах нефтеперерабатывающей промышленности. Например, неочищенный природный газ, добываемый из геологических формаций, часто содержит значительные количества диоксида углерода. С другой стороны, диоксид углерода, извлекаемый из геологических формаций, часто содержит значительные количества газообразных углеводородов. Кроме того, производственные газы, которые извлекаются при осуществлении нефтедобычи с использованием способов повышения нефтеотдачи пласта, часто содержат смесь газообразных углеводородов и диоксида углерода. Вышеуказанные потоки смесей газов обычно требуют специальной обработки для разделения компонентов, а именно для обеспечения потока по существу чистых углеводородов, который может быть пригоден для сжигания, и/или для обеспечения потока по существу чистого диоксида углерода, который может быть пригоден для использования в способах повышения нефтеотдачи пласта, или для изоляции (секвестрации), или для других целей. Таким образом, было бы полезно иметь другие возможности для использования потоков, содержащих углеводороды.

### Сущность изобретения

В настоящем изобретении предлагаются системы и способы, которые могут быть использованы для выработки энергии. В частности, предлагаемые системы и способы могут быть выполнены для обработки разбавленного потока углеводородов таким образом, что углеводороды в потоке окисляются без существенного горения и, таким образом, создается дополнительная энергия в цикле выработки энергии.

В настоящем изобретении представлен способ выработки энергии, включающий осуществление горения углеродосодержащего топлива с кислородом в камере сгорания в присутствии потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  для формирования потока продуктов горения, содержащего  $\text{CO}_2$ ;

расширение в турбине потока продуктов горения для выработки энергии и получения выхлопного потока турбины;

охлаждение выхлопного потока турбины в рекуперативном теплообменнике;

удаление некоторой воды из охлажденного выхлопного потока турбины для получения потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$ ;

сжатие по меньшей мере части потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$ ;

опционально отведение части потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  и соединение отведенной части с кислородом перед осуществлением горения;

пропускание сжатого потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  обратно через рекуперативный теплообменник таким образом, что сжатый поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$  нагревается теплом, отбираемым от выхлопного потока турбины;

введение разбавленного потока углеводородов в условиях, при которых углеводороды в разбавленном потоке углеводородов окисляются без существенного горения; и

направление нагретого сжатого потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  в камеру сгорания.

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

Разбавленный поток углеводородов может быть введен таким образом, что углеводороды окисляются внутри рекуперативного теплообменника или внутри дополнительного теплообменника, сконфигурированного для теплообмена с одним или с обоими из потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  и кислорода.

Разбавленный поток углеводородов может быть соединен со сжатым потоком рециркулируемого  $\text{CO}_2$  перед указанной стадией пропускания.

Разбавленный поток углеводородов может быть соединен со сжатым потоком рециркулируемого  $\text{CO}_2$  в рекуперативном теплообменнике.

Разбавленный поток углеводородов может быть соединен со сжатым потоком рециркулируемого  $\text{CO}_2$  в дополнительном теплообменнике.

Часть потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  может быть отведена и соединена с кислородом для формирования разбавленного потока кислорода, и разбавленный поток углеводородов может быть соединен с разбавленным потоком кислорода.

Разбавленный поток кислорода, соединенный с разбавленным потоком углеводородов, может быть пропущен через рекуперативный теплообменник или через дополнительный теплообменник, в котором

осуществляется окисление углеводородов в разбавленном потоке углеводородов.

Разбавленный газообразный углеводород представляет собой продукт, получаемый при нефтедобыче с использованием способов повышения нефтеотдачи пласта.

В одном или нескольких вариантах осуществления изобретения представлен предлагаемый способ выработки энергии, включающий осуществление замкнутого и полузамкнутого цикла Брайтона, в котором в качестве рабочего тела используется  $\text{CO}_2$ ; в качестве источника первого топлива используется углеводородсодержащее топливо, сжигаемое для нагрева рабочего тела; и для повторного использования тепла сгорания топлива используется рекуперативный теплообменник; и добавление разбавленного потока углеводородов к замкнутому или полузамкнутому циклу Брайтона в качестве источника второго топлива, причем углеводороды в разбавленном потоке углеводородов окисляются без существенного горения для обеспечения дополнительного тепла.

В одном или нескольких вариантах осуществления изобретения представлен предлагаемый способ обработки потока отходов, включающий обеспечение потока отходов, содержащего один или более углеводородов и один или более разбавляющих компонентов; и введение потока отходов в замкнутый или полузамкнутый цикл Брайтона так, чтобы углеводороды в потоке отходов окислялись без существенного горения.

В одном или нескольких вариантах осуществления изобретения способ выработки энергии может включать осуществление замкнутого или полузамкнутого цикла выработки энергии, в котором осуществляют циркуляцию  $\text{CO}_2$  в качестве рабочего тела, которое многократно сжимают и расширяют для выработки энергии; обеспечивают горение источника первого топлива в камере сгорания для нагрева рабочего тела после его сжатия и перед его расширением для выработки энергии; и используют рекуперативный теплообменник для повторного использования тепла горения для нагрева рабочего тела. Способ может также включать нагрев рабочего тела теплом, получаемым вне камеры сгорания с использованием источника второго топлива, причем нагрев осуществляют в дополнение к повторно используемому теплу горения, и источник второго топлива представляет собой поток разбавленных углеводородов, которые окисляются без существенного горения для обеспечения тепла, получаемого вне камеры сгорания.

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

Концентрация углеводородов в разбавленном потоке углеводородов может быть ниже нижнего предела взрывоопасности (НПВ) углеводородов.

Углеводороды в разбавленном потоке углеводородов могут быть подвергнуты каталитическому окислению.

В частности, способ может включать стадии, на которых: обеспечивают горение первого топлива с кислородом в камере сгорания в присутствии рабочего тела  $\text{CO}_2$  для получения выхлопного потока; осуществляют расширение выхлопного потока из камеры сгорания в турбине для получения энергии и формирования выхлопного потока турбины; охлаждают выхлопной поток турбины в рекуперативном теплообменнике; очищают выхлопной поток турбины, выходящий из рекуперативного теплообменника, для удаления из рабочего тела, по меньшей мере, воды; подвергают сжатию в компрессоре по меньшей мере часть рабочего тела; пропускают обратно через рекуперативный теплообменник по меньшей мере часть сжатого рабочего тела так, чтобы сжатое рабочее тело нагревалось теплом, отобранном от выхлопного потока турбины; и рециркулируют нагретое сжатое рабочее тело в камеру сгорания.

Разбавленный поток углеводородов может быть введен в рабочее тело после его сжатия в компрессоре и перед пропуском рабочего тела обратно через рекуперативный теплообменник.

Углеводороды в разбавленном потоке углеводородов могут быть подвергнуты окислению внутри рекуперативного теплообменника.

Углеводороды в разбавленном потоке углеводородов могут быть подвергнуты окислению в дополнительном теплообменнике, сконфигурированном для теплообмена с одним или с обоими из рабочего тела и потока кислорода, обеспечивающего кислород в камере сгорания.

Разбавленный поток углеводородов может быть соединен со сжатым рабочим телом в рекуперативном теплообменнике.

Часть сжатого рабочего тела может быть соединена с кислородом для получения разбавленного потока кислорода, и разбавленный поток углеводородов соединяют с разбавленным потоком кислорода.

Разбавленный поток кислорода, соединенный с разбавленным потоком углеводородов, может быть пропущен через рекуперативный теплообменник, в котором осуществляется окисление углеводородов в разбавленном потоке углеводородов.

Разбавленный поток кислорода, соединенный с разбавленным потоком углеводородов, может быть пропущен через дополнительный теплообменник, в котором осуществляется окисление углеводородов в разбавленном потоке углеводородов.

Разбавленный поток углеводородов может быть подан в реактор окисления.

Поток продуктов реакции, выходящий из реактора окисления, может быть подан в рекуперативный теплообменник.

Поток продуктов реакции, выходящий из реактора окисления, подают в дополнительную турбину для выработки энергии.

Часть выхлопного потока турбины может быть подана в реактор окисления так, чтобы она стала частью потока продуктов реакции, который подают в дополнительную турбину.

Разбавленный газообразный углеводород может быть продуктом, получаемым при нефтедобыче с использованием способов повышения нефтеотдачи пласта. В одном или нескольких вариантах осуществления изобретения представлена предлагаемая система выработки энергии, содержащая блок выработки энергии, сконфигурированный для осуществления замкнутого или полужамкнутого цикла Брайтона, причем указанный блок содержит камеру сгорания, сконфигурированную для осуществления горения углеводородосодержащего топлива в присутствии потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$ ; и одно или несколько подающих средств/частей, сконфигурированных для подачи разбавленного потока углеводородов в компонент блока выработки энергии, помимо камеры сгорания.

В настоящем изобретении представлена также система выработки энергии, содержащая блок выработки энергии, сконфигурированный для осуществления замкнутого или полужамкнутого цикла выработки энергии и содержащий камеру сгорания, сконфигурированную для осуществления горения первого топлива в присутствии сжатого рабочего тела  $\text{CO}_2$ ; турбину, сконфигурированную для расширения сжатого рабочего тела  $\text{CO}_2$  для получения расширенного рабочего тела  $\text{CO}_2$ ; компрессор, сконфигурированный для сжатия расширенного рабочего тела  $\text{CO}_2$  для получения сжатого рабочего тела  $\text{CO}_2$ ; рекуперативный теплообменник, сконфигурированный для передачи тепла от расширенного рабочего тела  $\text{CO}_2$ , выходящего из турбины, сжатому рабочему телу  $\text{CO}_2$ , выходящему из компрессора; и одно или несколько подающих средств, сконфигурированных для подачи разбавленного потока углеводородов, в компонент блока выработки энергии, помимо камеры сгорания.

В одном или нескольких других вариантах осуществления изобретения предлагаемая система выработки энергии может быть определена в отношении одного или нескольких следующих положений, которые могут быть объединены в любом количестве и любом порядке.

Подающие средства могут быть сконфигурированы для подачи разбавленного потока углеводородов в рекуперативный теплообменник.

Система выработки энергии может содержать также второй теплообменник, и одно или несколько подающих средств могут быть сконфигурированы для подачи разбавленного потока углеводородов во второй теплообменник.

Подающие средства могут быть сконфигурированы для подачи разбавленного потока углеводородов в линию, содержащую рабочее тело  $\text{CO}_2$ .

Подающие средства могут быть сконфигурированы для подачи разбавленного потока углеводородов в линию ниже по потоку рекуперативного теплообменника и выше по потоку компрессора.

Система выработки энергии может содержать также реактор окисления, и одно или несколько подающих средств могут быть сконфигурированы для подачи разбавленного потока углеводородов в реактор окисления.

Реактор окисления может быть каталитическим реактором окисления.

Реактор окисления может быть сконфигурирован для получения на выходе потока продуктов реакции, который подают в рекуперативный теплообменник.

Реактор окисления может быть сконфигурирован для приема части расширенного рабочего тела  $\text{CO}_2$  выше по потоку рекуперативного теплообменника.

Система выработки энергии может содержать также вторую турбину, сконфигурированную для приема потока продуктов реакции из реактора окисления.

Настоящее изобретение охватывает без ограничения следующие варианты его осуществления.

Вариант осуществления 1. Способ выработки энергии, включающий осуществление замкнутого или полужамкнутого цикла выработки энергии, в котором: осуществляют циркуляцию  $\text{CO}_2$  в качестве рабочего тела, которое многократно сжимают и расширяют для выработки энергии; обеспечивают горение источника первого топлива в камере сгорания для нагрева рабочего тела после его сжатия и перед его расширением для выработки энергии; и используют рекуперативный теплообменник для повторного использования тепла горения для нагрева рабочего тела; и нагрев рабочего тела теплом, получаемым вне камеры сгорания, с использованием источника второго топлива, причем нагрев осуществляют в дополнение к повторно используемому теплу горения и источник второго топлива представляет собой поток разбавленных углеводородов, которые окисляются без существенного горения для обеспечения тепла, получаемого вне камеры сгорания.

Вариант осуществления 2. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором концентрация углеводородов в разбавленном потоке углеводородов ниже нижнего предела взрывоопасности (НПВ) углеводородов.

Вариант осуществления 3. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором углеводороды в разбавленном потоке углеводородов окисляют с использованием катализатора.

Вариант осуществления 4. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором обеспечивают горение первого топлива с кислородом в камере сгорания в присутствии рабочего тела

CO<sub>2</sub> для получения выхлопного потока; выхлопной поток из камеры сгорания расширяют в турбине для получения энергии и формирования выхлопного потока турбины; выхлопной поток турбины охлаждают в рекуперативном теплообменнике; выхлопной поток турбины, выходящий из рекуперативного теплообменника, очищают для удаления из рабочего тела, по меньшей мере, воды; по меньшей мере часть рабочего тела сжимают в компрессоре; по меньшей мере часть сжатого рабочего тела пропускают обратно через рекуперативный теплообменник, так что сжатое рабочее тело нагревается теплом, отобранном от выхлопного потока турбины; и нагретое сжатое рабочее тело рециркулируют в камеру сгорания.

Вариант осуществления 5. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором разбавленный поток углеводородов вводят в рабочее тело после сжатия рабочего тела в компрессоре и перед его пропуском обратно через рекуперативный теплообменник.

Вариант осуществления 6. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором углеводороды в разбавленном потоке углеводородов окисляют в рекуперативном теплообменнике.

Вариант осуществления 7. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором углеводороды в разбавленном потоке углеводородов окисляют в дополнительном теплообменнике, сконфигурированном для теплообмена с одним или с обоими из рабочего тела и потока кислорода, обеспечивающего кислород в камере сгорания.

Вариант осуществления 8. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором разбавленный поток углеводородов соединяют со сжатым рабочим телом в рекуперативном теплообменнике.

Вариант осуществления 9. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором часть сжатого рабочего тела соединяют с кислородом для получения разбавленного потока кислорода и разбавленный поток углеводородов соединяют с разбавленным потоком кислорода.

Вариант осуществления 10. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором разбавленный поток кислорода, соединенный с разбавленным потоком углеводородов, пропускают через рекуперативный теплообменник, в котором осуществляют окисление углеводородов в разбавленном потоке углеводородов.

Вариант осуществления 11. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором разбавленный поток кислорода, соединенный с разбавленным потоком углеводородов, пропускают через дополнительный теплообменник, в котором осуществляют окисление углеводородов в разбавленном потоке углеводородов.

Вариант осуществления 12. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором разбавленный поток углеводородов подают в реактор окисления.

Вариант осуществления 13. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором поток продуктов реакции, выходящий из реактора окисления, подают в рекуперативный теплообменник.

Вариант осуществления 14. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором поток продуктов реакции, выходящий из реактора окисления, подают в дополнительную турбину для выработки энергии.

Вариант осуществления 15. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором часть выхлопного потока турбины подают в реактор окисления так, чтобы она стала частью потока продуктов реакции, который подают в дополнительную турбину.

Вариант осуществления 16. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором разбавленный поток углеводородов является продуктом, получаемым при добыче нефти с использованием способов повышения нефтеотдачи пласта.

Вариант осуществления 17. Система выработки энергии, содержащая: блок выработки энергии, сконфигурированный для осуществления замкнутого или полужамкнутого цикла выработки энергии и содержащий камеру сгорания, сконфигурированную для осуществления горения первого топлива в присутствии сжатого рабочего тела CO<sub>2</sub>; турбину, сконфигурированную для расширения сжатого рабочего тела CO<sub>2</sub> для получения расширенного рабочего тела CO<sub>2</sub>; компрессор, сконфигурированный для сжатия расширенного рабочего тела CO<sub>2</sub> для получения сжатого рабочего тела CO<sub>2</sub>; и рекуперативный теплообменник, сконфигурированный для передачи тепла от расширенного рабочего тела CO<sub>2</sub>, выходящего из турбины, сжатому рабочему телу CO<sub>2</sub>, выходящему из компрессора; и одно или несколько подающих средств, сконфигурированных для подачи разбавленного потока углеводородов, в компонент блока выработки энергии, помимо камеры сгорания.

Вариант осуществления 18. Система выработки энергии по любому из предыдущих или последующих вариантов, в которой одно или несколько подающих средств сконфигурированы для подачи разбавленного потока углеводородов в рекуперативный теплообменник.

Вариант осуществления 19. Система выработки энергии по любому из предыдущих или последующих вариантов, которая содержит также второй теплообменник и в которой одно или несколько подающих средств сконфигурированы для подачи разбавленного потока углеводородов во второй теплообменник.

Вариант осуществления 20. Система выработки энергии по любому из предыдущих или последующих

щих вариантов, в которой одно или несколько подающих средств сконфигурированы для подачи разбавленного потока углеводородов в линию, содержащую рабочее тело  $\text{CO}_2$ .

Вариант осуществления 21. Система выработки энергии по любому из предыдущих или последующих вариантов, в которой одно или несколько подающих средств сконфигурированы для подачи разбавленного потока углеводородов в линию ниже по потоку рекуперативного теплообменника и выше по потоку компрессора.

Вариант осуществления 22. Система выработки энергии по любому из предыдущих или последующих вариантов, содержащая также реактор окисления, и одно или несколько подающих средств сконфигурированы для подачи разбавленного потока углеводородов в реактор окисления.

Вариант осуществления 23. Система выработки энергии по любому из предыдущих или последующих вариантов, в которой реактор окисления представляет собой каталитический реактор окисления.

Вариант осуществления 24. Система выработки энергии по любому из предыдущих или последующих вариантов, в которой реактор окисления сконфигурирован для получения на выходе потока продуктов реакции, который подают в рекуперативный теплообменник.

Вариант осуществления 25. Система выработки энергии по любому из предыдущих или последующих вариантов, в которой реактор окисления сконфигурирован для приема части расширенного рабочего тела  $\text{CO}_2$  выше по потоку рекуперативного теплообменника.

Вариант осуществления 26. Система выработки энергии по любому из предыдущих или последующих вариантов, содержащая также вторую турбину, сконфигурированную для приема потока продуктов реакции из реактора окисления.

### **Краткое описание чертежей**

После вышеприведенного описания изобретения в общих чертах ниже дается описание со ссылками на прилагаемые чертежи, которые необязательно выполнены в масштабе и на которых показаны:

на фиг. 1 - блок-схема энергетической установки в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения, в которых разбавленный поток углеводородов может быть подан на вход различных элементов энергетической установки;

на фиг. 2 - блок-схема энергетической установки в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения, в которых разбавленный поток углеводородов подается в поток рециркулируемого рабочего тела;

на фиг. 3 - блок-схема энергетической установки в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения, в которых разбавленный поток углеводородов подают на вход вспомогательного теплообменника;

на фиг. 4 - блок-схема энергетической установки в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения, в которых разбавленный поток углеводородов соединяют с потоком разбавленного окислителя;

на фиг. 5 - блок-схема энергетической установки в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения, в которых разбавленный поток углеводородов подают на вход каталитического реактора;

на фиг. 6 - блок-схема энергетической установки в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения, в которых разбавленный поток углеводородов вводят в выхлопной поток турбины ниже по потоку турбины и выше по потоку теплообменника;

на фиг. 7 - блок-схема энергетической установки в соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения, в которых разбавленный поток углеводородов подают на вход каталитического реактора вместе с выхлопным потоком турбины с последующим расширением во вспомогательной турбине.

### **Подробное описание осуществления изобретения**

Настоящее изобретение будет описано ниже более подробно. Однако настоящее изобретение может быть осуществлено во многих других формах и не должно рассматриваться ограниченным нижеописанными вариантами, поскольку эти варианты приводятся прежде всего для обеспечения полноты и наглядности описания и передачи в полной мере объема изобретения для специалистов в данной области техники. Формы единственного числа, использованные в настоящем описании и в прилагаемой формуле изобретения, не исключают множественного числа, если только в явной форме не указано иное.

В одном или нескольких вариантах осуществления настоящего изобретения представлены предлагаемые системы и способы выработки энергии, в которых осуществляют окисление разбавленного потока углеводородов без существенного горения для получения дополнительной энергии. Такие системы и способы обеспечивают малозатратное эффективное использование потоков, которые в противном случае потребовали бы использования дорогостоящего и длительного разделения для обеспечения полезных материалов (например, очищенного потока углеводородов и/или очищенного потока одного или более разбавляющих компонентов).

Термин "разбавленный поток углеводородов", как он используется в настоящем описании, означает, что поток содержит один или несколько углеводородов в количествах, превышающих следовые количества, и по меньшей мере один разбавляющий компонент. Разбавленный поток углеводородов может содержать углеводороды в концентрации, которая подходит для обеспечения нужного уровня нагрева

при окислении углеводородов. Концентрация углеводородов в разбавленном потоке углеводородов ограничивается лишь тем, чтобы она была ниже нижнего предела взрывоопасности (НПВ). В частности, концентрация углеводородов в разбавленном потоке может быть ниже НПВ после того, как разбавленный поток смешивают с потоком рециркулируемого  $\text{CO}_2$ , как это будет рассмотрено ниже в настоящем описании.

Углеводороды, содержащиеся в разбавленном потоке углеводородов, предпочтительно находятся в газообразном состоянии. Неограничивающие примеры углеводородов, которые могут содержаться в разбавленном потоке, включают соединения  $\text{C}_1$ - $\text{C}_{10}$ . Предпочтительно разбавленный поток углеводородов содержит соединения  $\text{C}_1$ - $\text{C}_4$ , однако в нем могут присутствовать соединения  $\text{C}_5$ - $\text{C}_{10}$ , особенно когда давление разбавленного потока углеводородов будет повышено. В конкретных вариантах разбавленный поток углеводородов содержит, по меньшей мере, метан. В некоторых вариантах разбавленный поток углеводородов содержит природный газ.

Разбавляющий компонент, присутствующий в разбавленном потоке углеводородов, может быть любым материалом, который снижает концентрацию углеводородов так, чтобы она была в вышеуказанном диапазоне. В конкретных вариантах разбавляющий компонент может содержать  $\text{CO}_2$ . Другие неограничивающие примеры разбавляющих компонентов могут включать азот, воду,  $\text{H}_2\text{S}$  и кислород. В некоторых вариантах разбавитель может содержать главным образом  $\text{CO}_2$  (а именно,  $\text{CO}_2$  составляет более 50 об.% разбавителя), и в частности разбавитель может содержать  $\text{CO}_2$  в количестве примерно 60 об.% или более, примерно 75 об.% или более, примерно 80 об.% или более, примерно 90 об.% или более, примерно 95 об.% или более, примерно 98 об.% или более, примерно 99 об.% или более, примерно 99,5 об.% или более, примерно 99,8 об.% или более. Например, разбавитель может содержать  $\text{CO}_2$  в количестве, находящемся в диапазоне от примерно 60 до примерно 99,9 об.%, от примерно 75 до примерно 99,8 об.% или от примерно 80 до примерно 99,5 об.%.

Разбавленный поток углеводородов может поступать из любого источника, включая промышленные отходы, продукты реакции, потоки, возникающие при добыче углеводородов (например, из нефтяной или газовой скважины) и т.п. При необходимости поток углеводородов из такого источника может быть специально разбавлен путем добавления к этому потоку  $\text{CO}_2$  (или другого разбавляющего компонента). Например, поток отходов может содержать углеводороды в концентрации, превышающей НПВ, и такой поток может быть использован в соответствии с настоящим изобретением путем добавления дополнительного разбавителя. Следует также отметить, что  $\text{CO}_2$ , получаемый из естественных формаций, часто содержит природный газ или другую смесь газообразных углеводородов. В некоторых вариантах разбавленный поток углеводородов может быть получен при добыче нефти с использованием способов повышения нефтеотдачи пласта, таких как, например, способ, раскрытый в патенте US 8869889, выданном Palmer и др., содержание которого вводится ссылкой в настоящую заявку. Способы повышения нефтеотдачи пласта обычно приводят к возникновению производственного потока, содержащего смесь материалов, которые должны быть разделены для обеспечения полезных потоков по существу чистых материалов. Когда при повышении нефтеотдачи пласта используется  $\text{CO}_2$ , получаемые материалы должны специально обрабатываться для отделения  $\text{CO}_2$  от углеводородных продуктов. В вышеупомянутом патенте (Palmer и др.) смесь  $\text{CO}_2$  и углеводородов может использоваться как часть источника топлива, используемого в соответствующих способах производства энергии. В таких способах смесь  $\text{CO}_2$  и углеводородов направляют в камеру сгорания, где эта смесь сгорает, обычно вместе с потоком по существу чистого углеводородного топлива. Для осуществления такого способа необходима специально сконструированная камера сгорания, способная работать на топливах с пониженной величиной БТЕ, причем работа такой камеры сгорания ограничивается только потоками с определенной концентрацией углеводородов (для обеспечения устойчивости пламени в камере сгорания), а также ограничивается суммарным расходом углеводородов с существенным содержанием  $\text{CO}_2$ , которые могут обрабатываться в одной энергетической установке. Кроме того, поскольку относительные концентрации компонентов такого потока  $\text{CO}_2$  и газообразных углеводородов, получаемых при использовании способов повышения нефтеотдачи пласта, могут иметь существенные колебания, такие способы не получили широкого распространения, поскольку в этом случае трудно обеспечивать по существу постоянную температуру пламени в камере сгорания.

В настоящее время приходится расходовать значительные количества энергии и средств для отделения углеводородов от  $\text{CO}_2$ . В случае производства неочищенного природного газа разбавленные углеводороды, добываемые из пласта, обычно высушивают, перегоняют для удаления углеводородов с длинными цепочками (сжиженный природный газ или СПГ), осветляют путем удаления  $\text{H}_2\text{S}$  и других загрязняющих примесей и пропускают через абсорбционную колонну для выведения  $\text{CO}_2$ . Затем очищенный природный газ направляют в трубопровод для использования потребителями, такими как, например, энергетические установки, и чистый  $\text{CO}_2$  выводят, изолируют и/или используют (например, снова для повышения нефтеотдачи пласта). Если  $\text{CO}_2$  используется для повышения нефтеотдачи пласта, то часть нагнетаемого  $\text{CO}_2$ , который извлекают вместе с добываемой нефтью, часто содержит небольшие количества газообразных углеводородов, которые должны быть отделены для обеспечения возможности повторного нагнетания  $\text{CO}_2$  в пласт. Газообразный углеводород с повышенным содержанием  $\text{CO}_2$  должен быть отделен от добываемой нефти и аналогичным образом подвергнут высушиванию и перегонке для удаления любых СПГ. Затем газ должен быть подвергнут повторному сжатию для повторного нагнетания в пласт.

Для осуществления этих процессов необходимо большое количество энергии и расходные материалы, что влечет за собой высокие капитальные и эксплуатационные затраты. Системы и способы, предлагаемые в настоящем изобретении, обеспечивают возможность малозатратного и эффективного использования разбавленных потоков углеводородов для добавления энергии в существующих системах и способах выработки энергии. Например, разбавленные потоки углеводородов могут быть введены в систему, в которой сжигается углеродосодержащее топливо для передачи тепла потоку, давление которого может быть увеличено выше давления окружающей среды (необязательный признак). Аналогично разбавленный поток углеводородов может быть подан в одну или более систем, в которых осуществляется циркуляция рабочего тела для неоднократного нагрева и охлаждения, и/или для неоднократного повышения его давления и расширения. Такое рабочее тело может содержать, например, одно или несколько из  $H_2O$ ,  $CO_2$  и  $N_2$ .

Системы и способы, предлагаемые в настоящем изобретении, могут решить проблемы в отрасли путем извлечения теплоты углеводородов в разбавленном потоке углеводородов без их сжигания. Условия, присущие высокотемпературным системам и способам выработки энергии, могут использоваться для содействия термическому окислению этих углеводородов в разбавленном потоке углеводородов. Например, окисление может осуществляться в теплообменнике. В этом случае обеспечивается возможность использования разбавленных потоков углеводородов в существующих циклах получения энергии с минимальной модификацией процесса, использования существенно более высоких расходов этих потоков и упрощения общего цикла путем исключения некоторых частей оборудования и необходимости использования внешних источников тепла.

Было показано, что использование  $CO_2$  (особенно в сверхкритической форме) в качестве рабочего тела является высокоэффективным средством для выработки энергии в энергетических установках. См., например, патент US 8596075, выданный Allam и др., содержание которого вводится ссылкой в настоящее описание и в котором раскрывается использование непосредственно нагреваемого рабочего тела  $CO_2$  в системе выработки энергии, действующей по кислородно-топливному рекуперативному циклу Брайтона практически с нулевыми выбросами любых потоков в атмосферу. Ранее предлагалось применение  $CO_2$  в качестве рабочего тела в замкнутом цикле, в котором  $CO_2$  неоднократно сжимается и расширяется для выработки энергии с промежуточным нагревом с использованием побочного источника тепла и одного или нескольких теплообменников. См., например, патент US 8783034, выданный Held, содержание которого вводится ссылкой в настоящее описание. Таким образом, в некоторых вариантах разбавленный поток углеводородов может подаваться на вход замкнутого или полузамкнутого цикла Брайтона для повышения эффективности выработки энергии в таком цикле.

Другие примеры систем и способов выработки энергии, в которых может использоваться разбавленный поток углеводородов, указанный в настоящей заявке, раскрыты в следующих патентах: US 9068743, выдан Palmer и др., US 9062608, выдан Allam и др., US 8986002, выдан Palmer и др., US 8959887, выдан Allam и др., US 8869889, выдан Palmer и др., и US 8776532, выдан Allam и др., содержание которых вводится ссылкой в настоящую заявку. В качестве неограничивающего примера может быть указана система выработки энергии, в которой может использоваться разбавленный поток углеводородов и которая выполнена для осуществления горения топлива с  $O_2$  в присутствии циркулирующего рабочего тела  $CO_2$  в камере сгорания, причем предпочтительно  $CO_2$  вводят под давлением, по меньшей мере, примерно 12 МПа (например, от примерно 12 до примерно 60 МПа) и при температуре по меньшей мере примерно 400°C (например, от примерно 400 до примерно 1200°C), для обеспечения потока продуктов сгорания, содержащего  $CO_2$ , причем предпочтительно поток продуктов сгорания имеет температуру по меньшей мере примерно 800°C (например, примерно 1500°C). Ниже указаны основные особенности такой системы, которые могут использоваться по отдельности или в разных сочетаниях.

Поток продуктов сгорания может расширяться в турбине с давлением выхлопного потока примерно 1 МПа или выше (например, от примерно 1 до примерно 7,5 МПа) для выработки энергии и обеспечения выхлопного потока турбины, содержащего  $CO_2$ .

Выхлопной поток турбины может быть пропущен через рекуперативный теплообменник для обеспечения охлажденного выхлопного потока.

Охлажденный выхлопной поток турбины может быть обработан для удаления одного или нескольких вторичных компонентов, за исключением  $CO_2$ , (в частности, воды, и/или  $SO_x$ , и/или  $NO_x$ ) для обеспечения очищенного выхлопного потока, который, в частности, может быть потоком рециркулируемого  $CO_2$ .

Поток рециркулируемого  $CO_2$  может быть сжат, в частности, до давления, при котором  $CO_2$  находится в сверхкритическом состоянии.

$CO_2$  в сверхкритическом состоянии может быть охлажден для повышения плотности (предпочтительно по меньшей мере до примерно 200 кг/м<sup>3</sup>) потока рециркулируемого  $CO_2$ .

Давление потока рециркулируемого  $CO_2$  высокой плотности может быть повышено до величины, подходящей для подачи в камеру сгорания (например, как это уже было указано).

Поток рециркулируемого  $CO_2$  повышенного давления может быть пропущен через рекуперативный теплообменник, использующий тепло, извлекаемое из выхлопного потока турбины.

Затем весь поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$  повышенного давления (или его часть) может быть дополнительно нагрет теплом, которое не извлечено из выхлопного потока турбины (предпочтительно этот дополнительный нагрев осуществляют до, во время или после прохождения через рекуперативный теплообменник), перед рециркуляцией в камеру сгорания.

Нагретый поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$  повышенного давления может быть подан в камеру сгорания.

В одном или нескольких вариантах система выработки энергии, подходящая для подачи на ее вход разбавленного потока углеводородов, как это было уже указано, может быть выполнена для нагрева с использованием других способов вместо способа сжигания углеродосодержащего топлива или в дополнение к нему. В одном из неограничивающих примеров для дополнения или замены тепла, получаемого в результате горения углеродосодержащего топлива в камере сгорания, может использоваться солнечная энергия. Аналогичным образом могут использоваться и другие средства нагрева. В некоторых вариантах может использоваться любая форма тепла, подаваемого в поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$ , с температурой  $400^\circ\text{C}$  или менее. Например, может использоваться сконденсированный пар, выхлоп газовой турбины, потоки адиабатически сжатого газа и/или другие потоки горячих текучих сред, температуры которых могут превышать  $400^\circ\text{C}$ .

В одном или нескольких вариантах энергетическая установка может содержать некоторую комбинацию элементов, показанных на фиг. 1, хотя следует понимать, что могут быть включены также и другие элементы. Как показано на фиг. 1, энергетическая установка 10 (или энергетический блок) может содержать камеру 100 сгорания, сконфигурированную для получения топлива из источника 50 топлива (например, углеродосодержащего топлива) и окислителя из источника 60 окислителя (например, из установки разделения воздуха, производящей, по существу, чистый кислород). Показано множество линий 52, 54 подачи топлива, однако может использоваться только одна или более двух линий подачи топлива. Аналогичным образом, хотя показана лишь одна линия 62 окислителя, однако может использоваться множество таких линий. Топливо сжигают в камере сгорания вместе с окислителем в присутствии потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$ . Поток продуктов сгорания по линии 102 поступает в турбину 110, где он расширяется для выработки энергии в присоединенном генераторе 115. Хотя камера 100 сгорания и турбина 110 показаны как отдельные элементы, следует понимать, что в некоторых вариантах турбина может быть интегрирована в камеру сгорания.

Иначе говоря, отдельный турбинный блок может содержать секцию сгорания и секцию расширения. Соответственно указание в описании направления потоков в камеру сгорания может также пониматься как направление потоков в турбину, сконструированную как для сжигания топлива, так и для расширения продуктов сгорания.

Выхлоп турбины в линии 112 охлаждают в теплообменнике 120 и от него отделяют воду (в линии 132) во влагоотделителе 130 для получения потока по существу чистого рециркулируемого  $\text{CO}_2$ . При необходимости часть потока по существу чистого  $\text{CO}_2$  может быть выведена из установки и/или направлена в другие части установки (например, для охлаждения турбины). Давление потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  повышают в многоступенчатом компрессоре. Как показано на фиг. 1, многоступенчатый компрессор содержит первую ступень 140, вторую ступень 160 и промежуточный охладитель 150. Опционально (то есть дополнительно, но не обязательно) может быть использован один или несколько дополнительных компрессоров или насосов. Поток сжатого рециркулируемого  $\text{CO}_2$  по линии 165 направляют обратно через теплообменник 120 в камеру 100 сгорания. Как показано на фиг. 1 (и описано ниже), в цикл выработки энергии может быть введен разбавленный поток 170 углеводородов. Поток 170 показан в целом как один или несколько потоков, предназначенных для подачи разбавленного потока углеводородов в один из компонентов энергетической установки 10. Этот поток показан сплошной линией со стрелкой справа на фиг. 1. В частности, разбавленный поток 170 углеводородов может не подаваться на вход камеры 100 сгорания.

Как это уже указывалось, внутри цикла выработки энергии рециркуляционный поток, состоящий преимущественно из чистого  $\text{CO}_2$ , в одной или в обеих линиях 135 и 165 может быть разделен на выводимую часть  $\text{CO}_2$ , разбавляющую часть  $\text{CO}_2$  и рециркуляционный поток  $\text{CO}_2$ . Долю  $\text{CO}_2$ , предназначенную для разбавления, определяют из необходимости смешивания с по существу чистым кислородом из установки разделения воздуха и обеспечения окислителя с требуемым отношением  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ . Разбавленный поток 170 углеводородов может быть смешан непосредственно с потоком рециркулируемого  $\text{CO}_2$  (например, с потоком в линии 135, и/или в линии 165, и/или с боковым потоком из линии 135, и/или 165). Доля потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$ , используемого в этой смеси, достаточна для поддержания необходимого массового расхода в контуре рециркуляции и зависит от массового расхода разбавленного потока углеводородов (в этом случае также обеспечивается механизм компенсации изменений расхода разбавленных потоков углеводородов). Остальная часть  $\text{CO}_2$  из выхлопного потока турбины составляет выводимую часть  $\text{CO}_2$ , которая будет очищена и подана в трубопровод для дальнейшего использования или изоляции (захоронения).

Потоки выводимой части  $\text{CO}_2$  и разбавляющей части  $\text{CO}_2$  могут быть сжаты и нагнетаться вместе при обычной работе цикла выработки энергии (то есть могут быть сжаты и перекачиваться с использова-

нием любого способа или комбинации способов, в зависимости от конечного использования выводимой части  $\text{CO}_2$ ). В одном из вариантов эти потоки могут быть направлены в блок очистки  $\text{CO}_2$  (например, с использованием низкотемпературного охлаждения и перегонки) для удаления избыточного  $\text{O}_2$  и любых инертных компонентов и для получения потока  $\text{CO}_2$  высокой очистки под требуемым давлением. Затем разбавляющую часть  $\text{CO}_2$  направляют для смешивания с поступающим  $\text{O}_2$  для формирования окислителя высокого давления, необходимого для камеры сгорания. В другом варианте разбавляющая часть  $\text{CO}_2$  может быть направлена непосредственно на смешивание с  $\text{O}_2$  без удаления загрязняющих примесей. Выводимую часть  $\text{CO}_2$  направляют в трубопровод для дальнейшего использования или изоляции (захоронения).

В одном из вариантов поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$  может быть смешан с разбавленным потоком 170 углеводородов перед сжатием и нагнетанием до давления, необходимого для подачи в камеру сгорания (например, в некоторых вариантах примерно 300 бар). Как показано на фиг. 2, разбавленные углеводороды из источника 171 углеводородов проходят по линии 172 и поступают в линию 135. При этом разбавленные углеводороды подаются из линии 172 в линию 135, содержащую рециркулируемое рабочее тело  $\text{CO}_2$ , ниже по потоку рекуперативного теплообменника 120 и выше по потоку компрессора 140 и/или компрессора 160. Это может быть выполнено отдельно от выводимой части  $\text{CO}_2$  и разбавляющей части  $\text{CO}_2$  для предотвращения загрязнения этих потоков углеводородами и другими соединениями, присутствующими в разбавленном потоке 170 углеводородов. Это может быть выполнено с использованием либо полностью автономного вращающегося оборудования, либо отдельных колес этого вращающегося оборудования, как это было бы возможно в компрессоре со встроенным редуктором. Затем смешанный поток разбавленных углеводородов/рециркулируемого  $\text{CO}_2$  (теперь под давлением примерно 300 бар и при температуре немного выше температуры окружающей среды) направляют в составной теплообменник 120 для нагрева выхлопным потоком турбины в линии 112. Если не указано иное, другие элементы, показанные на фиг. 2, были описаны со ссылками на фиг. 1.

По мере того как поток нагревается в составном теплообменнике 120 до температуры, близкой к температуре выхлопного потока турбины, углеводороды, обеспечиваемые разбавленным потоком 170 углеводородов, подвергаются термическому окислению без существенного горения. Термическое окисление происходит без существенного горения, поскольку условия не обеспечивают возможность формирования устойчивого пламени. Таким образом, отсутствие существенного горения не исключает возникновения некоторого горения, и небольшое количество (например, менее 5 об.%) углеводородов разбавленного потока углеводородов может сгорать, в то время как, по существу, все углеводородные соединения (например, по меньшей мере 95 об.%), доставляемые разбавленным потоком углеводородов, не сгорают, а подвергаются термическому окислению. В некоторых вариантах термическое окисление может происходить в полном отсутствии какого-либо горения углеводородных соединений, обеспечиваемых разбавленным потоком углеводородов. Это термическое окисление может происходить в основном рекуперативном теплообменнике и/или в отдельном теплообменнике, который предназначен для обеспечения этих реакций. В некоторых вариантах термическое окисление может происходить в специально выделенных каналах рекуперативного теплообменника.

Эти реакции окисления становятся возможными благодаря тому, что камера сгорания цикла получения энергии работает с избытком  $\text{O}_2$ , в результате чего в потоке рециркулируемого  $\text{CO}_2$  присутствует остаточный  $\text{O}_2$  в малой концентрации, но с высоким парциальным давлением. Например, поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$  в линии 135 и/или в линии 165 может содержать  $\text{O}_2$  в концентрации от примерно 0,01 до примерно 10 об.%, от примерно 0,1 до примерно 8 об.% или от примерно 0,2 до примерно 5 об.%. В присутствии этого  $\text{O}_2$  увлекаемые углеводороды (а также другие разбавляющие соединения, такие как  $\text{H}_2\text{S}$ ), подаваемые в поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$  из разбавленного потока углеводородов, начинают окисляться внутри каналов теплообменников цикла получения энергии, по мере того как они постепенно нагреваются.

Смесь потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  и разбавленного потока углеводородов предпочтительно регулируют таким образом, чтобы общее содержание углеводородов в смеси было ниже величины НПВ, которая может варьироваться в зависимости от конкретной смеси присутствующих соединений. Таким образом, в некоторых вариантах смесь разбавленного потока углеводородов и потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  может содержать углеводороды в минимальной концентрации по меньшей мере 0,1 об.%, по меньшей мере 0,5 об.%, по меньшей мере 1 об.% или по меньшей мере 2 об.%, и смесь разбавленного потока углеводородов и потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  может содержать углеводороды в максимальной концентрации, которая ниже НПВ, как это было указано выше. В одном из неограничивающих примеров смесь, содержащая преимущественно  $\text{CO}_2$  и метан, может содержать метан в максимальной концентрации менее 5 об.% (например, от примерно 0,01 до примерно 4,95 об.%).

Следует понимать, что условия горения требуют комбинации источника зажигания с топливом и окислителем, подаваемыми в достаточном отношении. Когда концентрация топлива ниже величины НПВ, отношение топливо/окислитель недостаточно для горения. Ниже приведены примеры величины НПВ для различных углеводородов (все в процентах от общего объема): бутан (1,8%); оксид углерода (12,5%); этан (3,0%); этанол (3,3%); этилен (2,7%); бензин (1,2%); метан (5,0%); метанол (6,7%) и пропан (2,1%). На основе известных величин НПВ можно рассчитать величину НПВ для по существу чистого углеводородного топлива, а также для смешанного углеводородного топлива, чтобы надежно обеспечи-

вать концентрацию углеводородов ниже общей величины НПВ для определенного материала или материалов, смешиваемых с потоком рециркулируемого  $\text{CO}_2$ . Поскольку углеводороды в этом смешанном потоке будут разбавлены указанным образом (то есть ниже величины НПВ смеси), "горение" не происходит. В этом случае углеводороды просто окисляются в  $\text{CO}_2$  и воду с выделением физического тепла для потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$ , в результате чего обеспечивается возможность сохранения высокотемпературного тепла выхлопа турбины для дальнейшего использования в теплообменнике. Это дополнительное тепло также снижает необходимость в использовании источников низкотемпературного тепла для оптимизации рекуперативного теплообменника цикла получения энергии. А именно, может быть необязательно использовать тепло из основного компрессора установки разделения воздуха и/или из цикла сжатия горячего воздуха в качестве других источников тепла, помимо турбины.

Выхлоп турбины в линии 112 по рассматриваемому способу охлаждают в основном теплообменнике 120, как в обычной конфигурации цикла получения энергии, такого как показан на фиг. 1, однако его затем направляют в модифицированный охладитель контактного охлаждения, который модернизирован для удаления любых соединений  $\text{SO}_x$  и/или  $\text{NO}_x$ , происходящих из разбавленного потока углеводородов (например, сульфаты или сульфиты, возникающие при окислении соединений, содержащих серу, таких как  $\text{H}_2\text{S}$ , и/или нитраты или нитриты, возникающие при окислении азота). Пример такого способа описан в заявке US 15/298975, поданной 20 октября 2016 г., содержание которой вводится ссылкой в настоящую заявку. Затем очищенный выхлоп турбины разделяют на выводимую часть  $\text{CO}_2$ , разбавляющую часть  $\text{CO}_2$  и поток рециркуляционного  $\text{CO}_2$ , и процесс повторяют с дополнительным разбавленным потоком углеводородов, вводимым в цикл получения энергии.

В некоторых вариантах поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$  и разбавленный поток углеводородов могут быть смешаны в основном, составном теплообменнике, как только поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$  будет нагрет до температуры, подходящей для обеспечения реакций окисления. Вместо этого (или вместе с этим) поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$  и разбавленный поток углеводородов могут быть смешаны в другом, отдельном теплообменнике. В этом случае указанные реакции могут предотвращаться в низкотемпературных секциях составного теплообменника, температура в которых может быть недостаточна для обеспечения возможности осуществления этих реакций. Соответственно поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$  может быть подан в секцию теплообменника с первой температурой, а разбавленный поток углеводородов может быть подан в секцию теплообменника со второй, более высокой температурой, причем температура потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  достаточна для обеспечения окисления углеводородных соединений в разбавленном потоке углеводородов. На фиг. 3 в качестве примера иллюстрируется дополнительный (или вспомогательный), второй теплообменник 167. Через второй теплообменник 167 пропускается часть потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  в форме бокового потока 166, выводимого из линии 165, для нагрева реакцией окисления разбавленного потока углеводородов в линии 172, выходящего из источника 171 углеводородов и подаваемого на вход второго теплообменника 167. Затем нагретый поток рециркулируемого  $\text{CO}_2$  направляют на вход рекуперативного теплообменника 120.

В некоторых вариантах разбавленный поток углеводородов может быть введен в поток окислителя, сформированный как смесь кислорода и разбавляющей части  $\text{CO}_2$ , в соответствующем месте внутри основного теплообменника (или в другом варианте в отдельном специальном теплообменнике), так что температура объединенного потока будет достаточна для поддержания реакций окисления. Используя поток окислителя, можно повысить интенсивность этих реакций (и соответственно снизить необходимое время пребывания) благодаря более высокому парциальному давлению кислорода, присутствующего в таком потоке, по сравнению с парциальным давлением кислорода в потоке рециркулируемого  $\text{CO}_2$ . Например, как показано на фиг. 4, разбавляющая часть  $\text{CO}_2$  отбирается из линии 165 и смешивается в линии 62 с окислителем, поступающим из источника 60 окислителя для формирования разбавленного потока окислителя (например, с отношением  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ , находящимся в диапазоне от примерно 5/95 до примерно 40/60 или от примерно 10/90 до примерно 30/70). Разбавленный поток окислителя может быть пропущен через теплообменник 120 для его нагрева охлаждаемым выхлопным потоком турбины в линии 112. Таким образом, весь разбавленный поток углеводородов, или его часть, может быть введен в разбавленный поток окислителя до или во время прохождения через теплообменник 120. Как показано на фиг. 4, разбавленные углеводороды из источника 171 разбавленных углеводородов пропускаются по линии 172 для подачи в разбавленный поток окислителя в линии 62 ниже по потоку точки, в которой  $\text{CO}_2$  добавляется в линию 165a.

В некоторых вариантах часть потока окислителя может быть введена в смесь разбавленного потока углеводородов и потока рециркулируемого  $\text{CO}_2$  либо выше по потоку основного, составного теплообменника (в других вариантах отдельного, специального теплообменника), либо внутри него. Такое введение может обеспечивать увеличение парциального давления кислорода и повышение интенсивности реакций окисления.

В некоторых вариантах в зоне теплообменника, в которой должно проходить окисление, может использоваться катализатор для содействия реакциям окисления и обеспечения полного окисления. В качестве неограничивающего примера можно указать широко используемые катализаторы конверсии водяного газа (например, оксиды различных металлов, такие как  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$ ). Аналогично могут ис-

пользоваться и другие катализаторы, предназначенные для снижения парциального давления  $O_2$ , которое необходимо в смеси разбавленного потока углеводородов и потока рециркулируемого  $CO_2$ .

Кроме того, каталитическое окисление может осуществляться в специальном реакторе, установленном отдельно от основного теплообменника 120. Как показано на фиг. 5, может использоваться опциональный реактор 180 окисления, и весь разбавленный поток углеводородов, или часть его, может быть направлен непосредственно в этот реактор окисления. В частности, разбавленный поток углеводородов из источника 171 разбавленных углеводородов по линии 172 направляют в реактор 180 окисления, в котором углеводороды окисляются для получения тепла. Кроме того, опционально окислитель может быть отобран из линии 62 (или непосредственно из источника 60 окислителя) и введен в поток 62а для подачи в реактор 180 окисления. В результате окисления разбавленного потока углеводородов в реакторе 180 окисления может формироваться поток 182 продуктов реакции, который может содержать, по существу,  $CO_2$  и  $H_2O$  (с возможным незначительным количеством остаточных углеводородов). Можно ожидать, что температура потока 182 продуктов реакции будет повышаться в результате реакции окисления, и нагретый таким образом поток может быть введен в теплообменник 120 на соответствующем устройстве согласования температур. В некоторых вариантах некоторая часть потока рециркулируемого  $CO_2$  (например, из одной или из обеих линий 135 и 165) может быть введена в разбавленный поток углеводородов и/или в поток 182 продуктов реакции. Как показано на фиг. 5,  $CO_2$  из линии 165b (отходит от линии 165) может быть введен в линию 172 с разбавленными углеводородами по линии 165b' и/или в поток 182 продуктов реакции по линии 165b". Такие добавления могут быть полезны для регулирования температуры реакции окисления в реакторе 180 окисления и/или регулирования температуры самого потока 182 продуктов реакции перед его подачей в основной, составной рекуперативный теплообменник 120. Таким образом, разбавленный поток углеводородов может быть использован, по существу, как источник низкотемпературного тепла, который может рассматриваться как "внешнее тепло" для введения в рекуперативный теплообменник 120 и который может дополнять или заменять другие внешние источники нагрева, например тепло, возвращаемое из установки разделения воздуха, и/или из цикла повторного сжатия горячего газа. Такая схема работы может быть полезной для повышения эффективности за счет снижения требований UL к рекуперативным составным теплообменникам циклов получения энергии, а также обеспечения в то же время дополнительного  $CO_2$  для выведения и дополнительной коррекции потребности в топливе в камере сгорания цикла получения энергии.

В некоторых вариантах разбавленный поток углеводородов может быть смешан с выхлопным потоком турбины так, чтобы реакция окисления углеводородов могла обеспечивать "перегрев" выхлопного потока турбины. Как показано на фиг. 6, разбавленный поток углеводородов из источника 171 может быть подан по линии 172 непосредственно в линию 112 выхлопа турбины выше по потоку теплообменника 120. В этом случае может обеспечиваться увеличение количества тепла, доступного для возврата потоком рециркулируемого  $CO_2$  после прохождения через теплообменник 120. В таких вариантах окислитель из потока 62 окислителя может быть введен в выхлопной поток турбины в зависимости от концентрации остаточного кислорода в выхлопе турбины и от химического состава разбавленного потока 170 углеводородов. На фиг. 6 иллюстрируется такой опциональный вариант, в котором окислитель из линии 62 (или непосредственно из источника 60 окислителя) подают по линии 62а в линию 112 выхлопа турбины. Хотя линия 62а окислителя показана введенной в линию 112 выхлопа турбины выше по потоку точки, в которой по линии 172 вводятся разбавленные углеводороды, следует понимать, что линия 62а окислителя может входить в линию 112 выхлопа турбины ниже по потоку точки, в которой по линии 172 вводятся разбавленные углеводороды, или же линия 62а окислителя может быть подсоединена непосредственно к линии 172 для смешивания с разбавленным потоком углеводородов перед подачей в линию 112 выхлопа турбины.

В других опциональных вариантах, как это показано на фиг. 7, часть выхлопа турбины в линии 112 может быть отведена по линии 112а в реактор 190 окисления, в котором, как это было указано, может использоваться один или более катализаторов, для соединения с разбавленными углеводородами, доставляемыми по линии 172 из источника 171 разбавленных углеводородов.

Кроме того, опционально окислитель из источника 60 окислителя может быть подан в реактор 190 окисления. Линия 112а может быть выполнена для отведения части выходящего рабочего тела  $CO_2$  выше по потоку рекуперативного теплообменника 120 и ниже по потоку турбины 110. Температура потока продуктов реакции, выходящего из реактора 190 окисления по линии 192, будет поднята выше температуры выхлопа турбины в линии 112, и этот поток может быть дополнительно расширен в другой турбине 195 (например, во вспомогательной турбине) для выработки дополнительной энергии. Выхлоп турбины в потоке 197 может быть снова соединен с выхлопом турбины в линии 112 перед подачей в рекуперативный теплообменник 120, или может быть использован для других целей, или может быть выпущен в атмосферу.

В любом из вышеописанных вариантов разбавленный поток углеводородов может быть дополнен другим топливом для компенсации изменений в расходе или в составе разбавленного потока углеводородов. Например, с разбавленным потоком углеводородов может быть смешан поток природного газа.

Системы и способы, раскрытые в настоящей заявке, выгодны для интеграции высокоэффективной

системы выработки энергии, работающей на топливах с низкой величин БТЕ, без необходимости изменений основных компонентов используемого оборудования (напр., камеры сгорания и/или турбины). Способность использования разбавленных потоков углеводородов по предложенным схемам без требования глубокой модернизации оборудования обеспечивает существенный экономический и технологический положительный результаты, такие как, например, снижение или исключение требований GPU и/или повышение повторного использования CO<sub>2</sub>.

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

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ выработки энергии, включающий осуществление замкнутого или полужамкнутого цикла выработки энергии, в котором обеспечивают горение первого топлива с кислородом в камере сгорания в присутствии рециркулируемого рабочего тела CO<sub>2</sub> для получения нагретого выхлопного потока; осуществляют расширение в турбине выхлопного потока из камеры сгорания для получения энергии и формирования выхлопного потока турбины; охлаждают выхлопной поток турбины в рекуперативном теплообменнике посредством передачи по меньшей мере части тепла сгорания от выхлопного потока турбины к рециркулируемому рабочему телу CO<sub>2</sub>; очищают охлажденный выхлопной поток турбины, выходящий из рекуперативного теплообменника, для удаления, по меньшей мере, воды и формирования рециркулируемого рабочего тела CO<sub>2</sub>; подвергают сжатию в компрессоре по меньшей мере часть рециркулируемого рабочего тела CO<sub>2</sub>; пропускают обратно через рекуперативный теплообменник по меньшей мере часть сжатого рециркулируемого рабочего тела CO<sub>2</sub> для нагрева теплом, отобранном от выхлопного потока турбины; рециркулируют нагретое сжатое рабочее тело CO<sub>2</sub> в камеру сгорания; обеспечивают дополнительный нагрев по меньшей мере части сжатого рециркулируемого рабочего тела CO<sub>2</sub> теплом, получаемым вне камеры сгорания с использованием топлива из второго источника, с обеспечением окисления, по существу, без горения, причем источник второго топлива представляет собой разбавленный поток углеводородов, содержащий разбавляющий компонент и один или более углеводородов в концентрации, которая ниже нижнего предела взрывоопасности (НПВ) одного или более углеводородов.
2. Способ по п.1, в котором углеводороды в разбавленном потоке углеводородов окисляют с использованием катализатора.
3. Способ по п.1, в котором разбавленный поток углеводородов вводят в сжатое рециркулируемое рабочее тело CO<sub>2</sub> после выхода из компрессора и перед его пропуском обратно через рекуперативный теплообменник.
4. Способ по п.3, в котором углеводороды в разбавленном потоке углеводородов окисляют в рекуперативном теплообменнике.
5. Способ по п.3, в котором углеводороды в разбавленном потоке углеводородов окисляют в дополнительном теплообменнике, сконфигурированном для теплообмена с сжатым рециркулируемым рабочим телом CO<sub>2</sub>.
6. Способ по п.5, в котором дополнительный теплообменник дополнительно сконфигурирован для теплообмена с потоком кислорода, обеспечивающим кислород в камере сгорания.
7. Способ по любому из пп.3-6, в котором разбавленный поток углеводородов соединяют с рециркулируемым сжатым рабочим телом CO<sub>2</sub> в рекуперативном теплообменнике.
8. Способ по любому из пп.3-6, в котором часть сжатого рециркулируемого рабочего тела CO<sub>2</sub> соединяют с кислородом для получения разбавленного потока кислорода и разбавленный поток углеводородов соединяют с разбавленным потоком кислорода.
9. Способ по п.8, в котором разбавленный поток кислорода, соединенный с разбавленным потоком углеводородов, пропускают через рекуперативный теплообменник, в котором осуществляют окисление углеводородов в разбавленном потоке углеводородов.
10. Способ по п.8, в котором разбавленный поток кислорода, соединенный с разбавленным потоком углеводородов, пропускают через дополнительный теплообменник, в котором осуществляют окисление углеводородов в разбавленном потоке углеводородов.
11. Способ по любому из пп.3-6, в котором разбавленный поток углеводородов подают в реактор

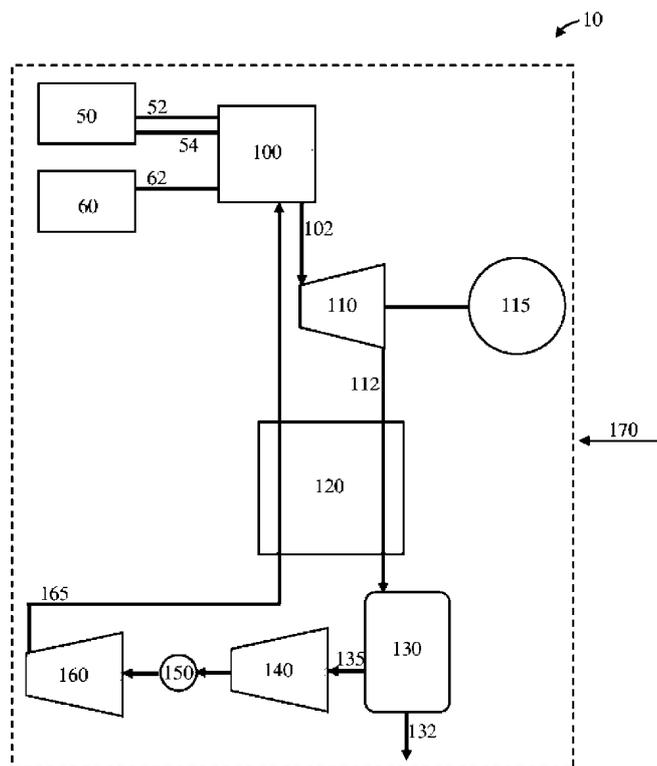
окисления.

12. Способ по п.11, в котором поток продуктов реакции, выходящий из реактора окисления, подают в рекуперативный теплообменник.

13. Способ по п.11, в котором поток продуктов реакции, выходящий из реактора окисления, подают в дополнительную турбину для выработки энергии.

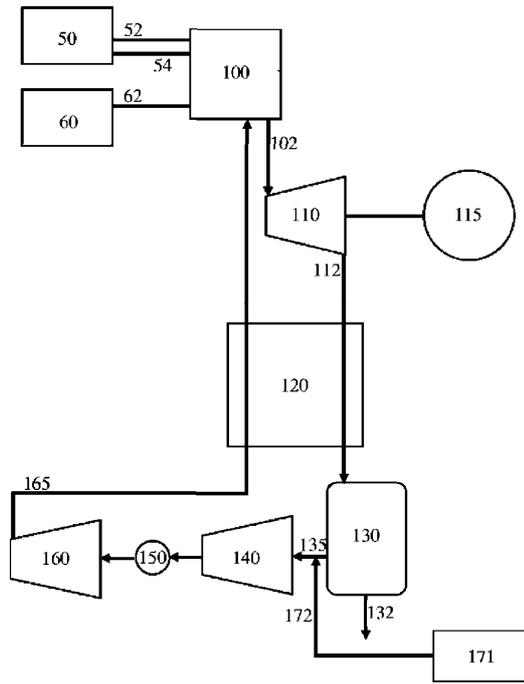
14. Способ по п.13, в котором часть выхлопного потока турбины подают в реактор окисления так, чтобы она стала частью потока продуктов реакции, который подают в дополнительную турбину.

15. Способ по любому из пп.1-14, в котором разбавленный поток углеводородов является продуктом, получаемым при добыче нефти с использованием способов повышения нефтеотдачи пласта.



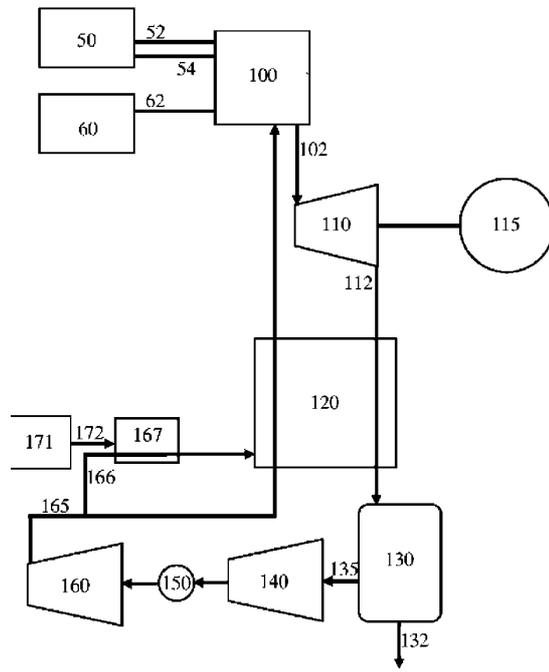
Фиг. 1

↖10



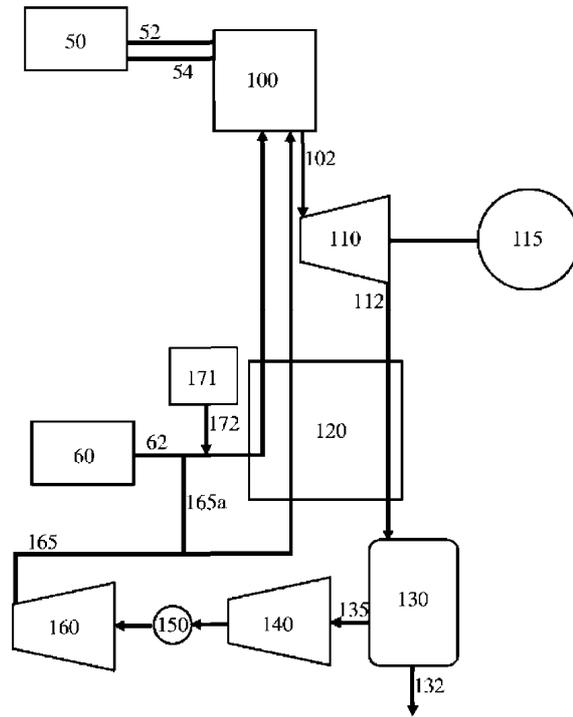
Фиг. 2

↖10



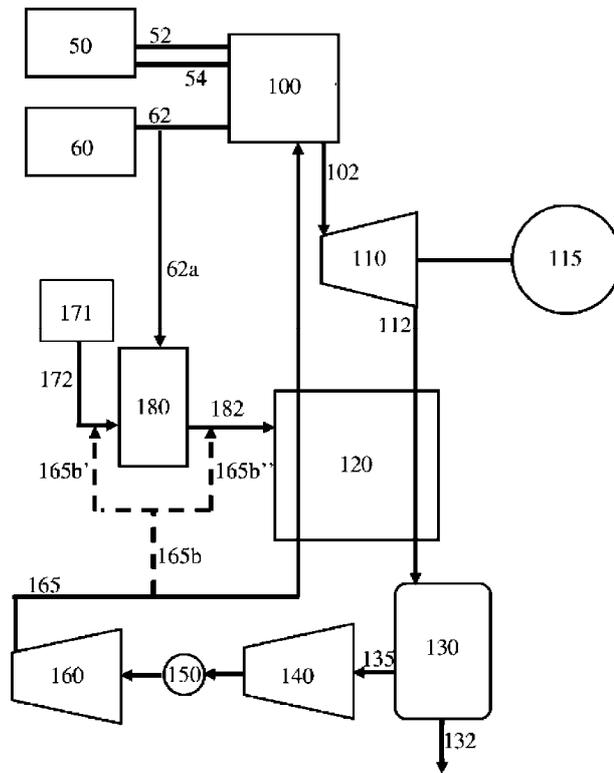
Фиг. 3

↖10



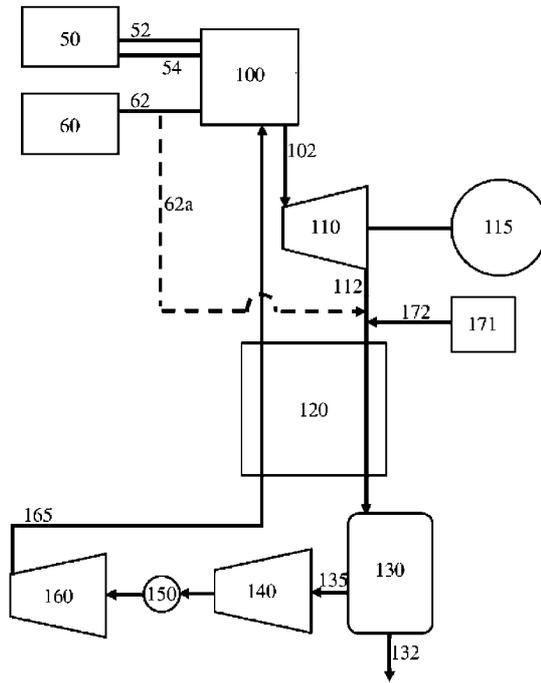
Фиг. 4

↖10



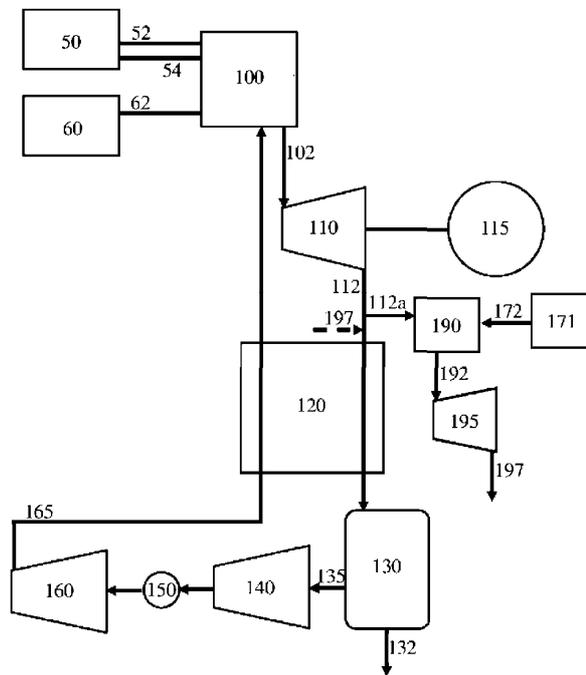
Фиг. 5

↖10



Фиг. 6

↖10



Фиг. 7

