

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **035969**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.09.08

(21) Номер заявки
201991138

(22) Дата подачи заявки
2015.09.03

(51) Int. Cl. *C01B 31/20* (2006.01)
B01D 53/62 (2006.01)
C01B 31/24 (2006.01)
F01K 13/00 (2006.01)
F01K 25/10 (2006.01)
F02C 1/08 (2006.01)
F02C 3/34 (2006.01)
F02C 7/143 (2006.01)
F23J 15/02 (2006.01)
F23L 7/00 (2006.01)
F17C 9/04 (2006.01)

(54) СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ЖИДКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ ИЗ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОСТИ

(31) 62/047,744

(32) 2014.09.09

(33) US

(43) 2019.09.30

(62) 201790553; 2015.09.03

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

(72) Изобретатель:
**Аллам Родни Джон (GB), Форрест
Брок Алан, Фетведт Джереми Эрон
(US)**

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

(56) US-A1-2013213049
US-A1-2013104525
US-A1-2012237881
US-A-4498289
US-A1-2012285195

(57) Описан способ, обеспечивающий поток жидкого CO₂ низкого давления. В частности, в настоящем изобретении предлагается способ, в котором содержащий CO₂ поток высокого давления, например рециркуляционный CO₂ поток из процесса генерации мощности с использованием преимущественно CO₂ в качестве рабочего тела, может быть разделен так, что часть его может расширяться и использоваться как охлаждающий поток в теплообменнике для охлаждения остальной части CO₂ потока высокого давления, которая затем может расширяться с формированием потока жидкого CO₂ низкого давления. Способ может использоваться для обеспечения в процессе сжигания топлива чистого CO₂ в жидкой форме, удобной для транспортировки.

035969 B1

035969 B1

Область техники

Настоящее изобретение относится к способу выработки жидкого диоксида углерода. В частности, жидкий диоксид углерода может представлять собой поток диоксида углерода низкого давления, сформированный из диоксида углерода, выработанного в системе и способе генерации мощности/энергии, а конкретно в системе и способе, в которых диоксид углерода используется в качестве рабочего тела.

Уровень техники

Улавливание и удаление углерода является ключевым моментом для любой системы и способа, в которых вырабатывается диоксид углерода (CO_2). Особенно это относится к генерации мощности путем сжигания органического топлива или другого содержащего углеводороды материала. Было предложено несколько способов генерации мощности, в которых может быть обеспечено улавливание и удаление углерода. Одна из публикаций в области высокоэффективной генерации мощности при одновременном улавливании и удалении углерода, а именно патент US 8596075 на имя Allam и др., обеспечивает требуемую эффективность в системах с замкнутым циклом горения в атмосфере кислорода, использующих рециркуляционный поток CO_2 . В такой системе CO_2 улавливается в виде относительно чистого потока высокого давления.

Современные предложения по удалению CO_2 часто требуют транспортировки по магистралям высокого давления высокоплотной, сверхкритической текучей среды под давлением от 100 бар (10 МПа) до 250 бар (25 МПа). Такие магистрали требуют больших капитальных затрат. Перекачиваемый CO_2 или отводится в подземные геологические пласты, такие как глубинные засоленные водоносные горизонты, или может использоваться с экономической выгодой во вторичных методах добычи нефти.

Использование CO_2 во вторичных методах добычи вызывает необходимость доступности его на широких пространствах нефтеносного региона. Это может требовать широкое применение трубопроводной сети, развернутой в регионе, что становится чрезмерно затратным во многих случаях, особенно для морских нефтяных месторождений. Поэтому может быть целесообразным обеспечение больших количеств CO_2 (например, выработанных в системе и способе генерации мощности) в жидком виде, что упростило бы доставку к морским нефтедобывающим платформам. Можно представить себе и другие преимущества использования CO_2 , отобранного из установок генерации мощности, если бы CO_2 можно было обеспечивать в сжиженном состоянии.

Сущность изобретения

В настоящем изобретении предлагается способ выработки потока жидкого диоксида углерода (CO_2) низкого давления, включающий обеспечение содержащего CO_2 потока высокого давления, составляющего приблизительно 60 бар (6 МПа) или более; разделение содержащего CO_2 потока высокого давления на основную часть и охлаждающую часть; расширение охлаждающей части содержащего CO_2 потока высокого давления для понижения ее температуры до приблизительно 0°C или ниже; охлаждение основной части содержащего CO_2 потока высокого давления до температуры приблизительно 5°C или ниже расширенной охлаждающей частью содержащего CO_2 потока высокого давления при пропускании основной части содержащего CO_2 потока высокого давления через теплообменник; расширение охлажденной основной части содержащего CO_2 потока высокого давления до давления, составляющего приблизительно 30 бар (3 МПа) или менее, но превышающего давление в тройной точке диаграммы состояния для CO_2 так, чтобы сформировать поток жидкого CO_2 низкого давления.

В вариантах осуществления настоящего изобретения давление в содержащем CO_2 потоке высокого давления может составлять приблизительно от 60 бар (6 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа).

Охлаждающую часть содержащего CO_2 потока высокого давления расширяют для понижения ее температуры приблизительно до -20°C или ниже.

Основную часть содержащего CO_2 потока высокого давления охлаждают до температуры приблизительно 0°C или ниже.

Содержащий CO_2 поток высокого давления может представлять собой рециркуляционный поток из процесса генерации мощности (производства энергии).

Содержащий CO_2 поток высокого давления может быть, по меньшей мере частично, получен от сжигания углеродсодержащего топлива в процессе генерации мощности.

Углеродсодержащее топливо может включать газообразное топливо или твердое топливо.

Поток жидкого CO_2 низкого давления далее может быть использован в процессе добычи нефти вторичным методом (EOR - от англ. enhanced oil recovery).

В общем, настоящее изобретение обеспечивает системы и способы, пригодные для выработки жидкого CO_2 . В раскрытых системах и способах можно использовать CO_2 от любого источника. Однако особое преимущество эти системы и способы могут иметь в сочетании с системой и способом выработки CO_2 потока высокого давления, в частности CO_2 потока высокого давления, находящегося при температуре окружающей среды. Представленные системы и способы имеют дополнительное преимущество, заключающееся в том, что жидкий CO_2 может вырабатываться, по существу, с высокой чистотой, в частности с низким содержанием кислорода, азота и инертных газов (например, аргона).

В некоторых вариантах выполнения CO_2 источником, который может использоваться при выработ-

ке жидкого CO_2 , может служить система генерации мощности, в частности системы и способы, основанные на сжигании топлива в атмосфере кислорода, и более конкретно способы сжигания, в которых CO_2 служит рабочим телом. Системы и способы генерации мощности, из которых может быть получен CO_2 поток, описаны в патентах US 8596075, 8776532, 8959887, 8986002, 9068743 и патентных заявках US 2010/0300063, 2012/0067054, 2012/0237881, 2013/0213049, содержание которых в полном объеме включено в данное описание в качестве ссылки.

В некоторых вариантах способы выработки потока жидкого диоксида углерода (CO_2) низкого давления могут включать обеспечение CO_2 потока высокого давления, которое составляет приблизительно 60 бар (6 МПа) или более, в частности приблизительно 100 бар (10 МПа) или более, или другие значения в указанном диапазоне давлений. Способы могут также включать отделение части CO_2 потока высокого давления и расширение ее для формирования охлаждающего потока, который может использоваться как холодильный агент. Например, охлаждающий поток может находиться при температуре приблизительно -20°C или менее или в другом, описанном здесь температурном диапазоне. Способы могут включать охлаждение CO_2 потока высокого давления до температуры приблизительно 5°C или менее (предпочтительно приблизительно -10°C или менее) путем пропускания CO_2 потока высокого давления через теплообменник, в котором проходит процесс теплопередачи с охлаждающим потоком. Способы могут также включать расширение CO_2 потока высокого давления так, чтобы сформировать CO_2 поток низкого давления с давлением, пониженным вплоть до приблизительно 6 бар (0,6 МПа). Способы могут включать пропускание CO_2 потока низкого давления через сепаратор, действующий на отделение от этого потока паровой фракции и обеспечивающий поток жидкого CO_2 низкого давления.

Настоящее изобретение может использоваться с системами, выполненными с возможностью выработки потока жидкого диоксида углерода (CO_2) низкого давления. В некоторых вариантах выполнения такие системы могут содержать один или несколько компонентов, выполненных с возможностью обеспечения CO_2 потока высокого давления, один или несколько теплообменников, одно или несколько устройств расширения (например, вентиляей), один или несколько сепараторов и один или несколько дистилляторов. В не служащем ограничением примере система может содержать трубопроводную сеть, выполненную с возможностью пропускания CO_2 потока высокого давления; делитель, выполненный с возможностью разделения CO_2 потока высокого давления на охлаждающую фракцию и основной поток; устройство расширения, выполненное с возможностью расширения и охлаждения охлаждающей фракции CO_2 потока высокого давления; теплообменник, выполненный с возможностью охлаждения основной части CO_2 потока высокого давления за счет нагревания охлажденной охлаждающей фракции CO_2 потока высокого давления; устройство расширения, выполненное с возможностью расширения и охлаждения основной части CO_2 потока высокого давления для формирования двухфазного CO_2 потока низкого давления; сепаратор, выполненный с возможностью удаления паровой фракции из двухфазного CO_2 потока низкого давления; и дистиллятор, выполненный с возможностью удаления по меньшей мере части не являющихся CO_2 компонентов и обеспечения потока жидкого CO_2 низкого давления.

В дополнительных вариантах выполнения настоящее изобретение относится к способам выработки потока жидкого диоксида углерода (CO_2) низкого давления из CO_2 потока высокого давления, поступающего из процесса генерации мощности. В некоторых вариантах выполнения такой способ может включать сжигание углеродного или углеводородного топлива с кислородом в камере (устройстве) сгорания в присутствии потока рециркуляционного CO_2 , находящегося под давлением приблизительно 100 бар (10 МПа) или более и при температуре приблизительно 400°C или более, для формирования выходного потока камеры сгорания, содержащего CO_2 . В частности, выходной поток камеры сгорания может находиться под давлением приблизительно от 200 бар (20 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа). В частности, выходной поток камеры сгорания может иметь температуру приблизительно от 800°C до приблизительно 1600°C . Способ может также включать расширение выходного потока камеры сгорания в турбине для генерации мощности и формирования выходного потока турбины, содержащего CO_2 под давлением приблизительно 50 бар (5 МПа) или менее. В частности, поток турбинных выхлопов может находиться под давлением приблизительно от 20 бар (2 МПа) до приблизительно 40 бар (4 МПа). Способ может включать охлаждение выхлопного потока турбины в теплообменнике за счет передачи тепла нагреваемому рециркуляционному CO_2 потоку. Охлаждение может происходить до температуры приблизительно 80°C или менее, т.е. близкой к температуре окружающей среды. Способ может также включать дополнительное охлаждение выхлопного потока турбины средством охлаждения окружающей среды и отделение водяного конденсата в сепараторе. Способ может включать перекачку насосом CO_2 , содержащегося в выхлопном потоке турбины, с подъемом давления приблизительно до 100 бар (10 МПа) или более для формирования CO_2 потока высокого давления. В частности, CO_2 поток высокого давления может находиться под давлением приблизительно от 100 бар (10 МПа) до приблизительно 500 бар (50 МПа) или приблизительно от 200 бар (20 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа). CO_2 из охлажденного выхлопного потока турбины может быть сжат до первого давления, охлажден для повышения его плотности и затем перекачан насосом с подъемом давления до второго, большего значения, лежащего в указанном выше диапазоне. Часть CO_2 потока высокого давления может быть пропущена снова через

теплообменник для нагрева от охлаждающегося выхлопного потока турбины перед подачей обратно в камеру сгорания. Дополнительный нагрев может быть приложен к этому потоку после сжатия и перед подачей в камеру сгорания так, чтобы этот дополнительный нагрев осуществлялся от источника, отличного от выхлопного потока турбины. Часть CO_2 потока высокого давления (эта часть может содержать некоторое количество CO_2 , выработанного при горении) может охлаждаться до температуры приблизительно 5°C или менее, например, в теплообменнике с использованием холодильного агента. Холодильный агент может содержать часть потока CO_2 высокого давления, которая может использоваться как охлаждающая фракция путем ее расширения до давления, составляющего приблизительно 30 бар (3 МПа) или менее, но превышающего давление в тройной точке диаграммы состояния для CO_2 . Охлаждающая фракция может иметь температуру приблизительно 0°C или менее или приблизительно -20°C или менее. В частных вариантах выполнения охлаждающая фракция CO_2 потока высокого давления может охлаждаться до температуры приблизительно от -55°C до приблизительно 0°C . Часть CO_2 потока высокого давления, охлажденная в теплообменнике охлаждающей CO_2 фракцией, может расширяться с падением давления приблизительно до 6 бар (0,6 МПа) (при этом предпочтительно давление всегда поддерживается выше давления в тройной точке диаграммы состояния для CO_2) так, чтобы сформировать CO_2 поток низкого давления. В частности, охлажденная часть CO_2 потока высокого давления может расширяться с падением давления до уровня приблизительно 30 бар (3 МПа) или менее, но превышающего давление в тройной точке диаграммы состояния для CO_2 .

Описанные выше способы могут включать дополнительные составляющие. Например, в отдельных случаях охлаждение выхлопного потока турбины может происходить до температуры приблизительно 70°C или менее или приблизительно 60°C или менее. Может использоваться один теплообменник или группа теплообменников. Например, может использоваться теплообменник-экономайзер, за которым следует теплообменник с холодной водой. После охлаждения способ может включать пропускание охлажденного выхлопного потока турбины, содержащего CO_2 , через один или несколько сепараторов для отделения от него, по меньшей мере, воды. Также перед стадией перекачки насосом способы могут включать сжатие выхлопного потока турбины, содержащего CO_2 , до давления вплоть до 80 бар (8 МПа) (например, до давления приблизительно от 60 бар (6 МПа) до приблизительно 80 бар (8 МПа)). И еще, способы могут включать увеличение плотности выхлопного потока турбины, содержащего CO_2 , например, путем охлаждения его в теплообменнике холодной водой. Плотность может быть увеличена, например, до значений приблизительно 600 кг/м или более, приблизительно 700 кг/м или более или приблизительно 800 кг/м или более. Перед увеличением плотности поток турбинных выхлопов может быть сжат.

Способы могут также включать после охлаждения основной части CO_2 потока высокого давления в теплообменнике и до упомянутого расширения пропускание основной части CO_2 потока высокого давления через ребойлер. Ребойлер, в частности, может быть объединен с дистиллятором (например, с отгонной колонной). По существу, ребойлер может обеспечивать нагрев дистиллятора.

Способы могут включать дополнительную обработку основной части потока жидкого CO_2 низкого давления. Например, поток жидкого CO_2 низкого давления может представлять собой двухфазную субстанцию, включающую жидкую и паровую фазы. Поэтому способы могут включать пропускание потока жидкого CO_2 низкого давления через сепаратор, выполненный с возможностью отделения от него парового потока. В некоторых вариантах выполнения паровой поток может содержать вплоть до приблизительно 8 мас.% (в частности, приблизительно до 4% или приблизительно до 6%) от потока жидкого CO_2 низкого давления, проходящего через сепаратор. В некоторых вариантах выполнения паровой поток может содержать CO_2 приблизительно от 1 до приблизительно 75 мас.%. В некоторых вариантах выполнения паровой поток может содержать приблизительно от 25 до приблизительно 99 мас.% сочетания N_2 , O_2 и аргона (или других инертных газов). Способы могут также включать пропускание остальной части потока жидкого CO_2 низкого давления (например, после удаления из него паровой фазы) через дистиллятор, например через отгонную колонну, которая может включать ребойлер, как рассмотрено выше.

После стадии дистилляции жидкий CO_2 может быть направлен в насос для увеличения его давления до требуемой величины. Холодный выходной поток из насоса может быть подан в теплообменник, находящийся выше ребойлера по потоку, для увеличения охлаждающей способности CO_2 высокого давления, который расширяется для образования охлаждающего агента. Подогретый CO_2 хладагент и(или) дистиллированный поток из дистилляционной отгонной колонны могут быть обеспечены в компрессор, выдающий поток под давлением, сравнимым с давлением в системе, из которой поступил CO_2 поток высокого давления. Поток паровой фазы из сепаратора может быть также обеспечен в устройство, выполняющее дополнительные сепарационные операции. Альтернативно, поток паровой фазы может выпускаться в атмосферу.

Поток жидкого CO_2 низкого давления, обеспеченный согласно настоящему изобретению, в частности, может содержать кислород только в очень низкой концентрации. В некоторых вариантах выполнения поток жидкого CO_2 низкого давления может иметь содержание кислорода не более 25 ppm, в частности не более 10 ppm. Поток жидкого CO_2 низкого давления может также иметь аналогично малую концентрацию инертных газов, например азота и аргона.

В качестве не служащих ограничением примеров настоящее изобретение может относиться к ниже-следующим вариантам выполнения. Такие примеры предназначены для иллюстрации более широкой сущности изобретения в целом.

В некоторых вариантах выполнения настоящее изобретение может обеспечивать способы выработки потока жидкого диоксида углерода (CO_2) низкого давления. Например, такой способ может включать сжигание углеродного или углеводородного топлива с кислородом в камере сгорания в присутствии потока рециркуляционного CO_2 , находящегося под давлением приблизительно 100 бар (10 МПа) или более и при температуре приблизительно 400°C или более, для формирования выходного потока камеры сгорания, содержащего CO_2 ; расширение выходного потока камеры сгорания в турбине для генерации мощности и формирования выхлопного потока турбины, содержащего CO_2 под давлением приблизительно 50 бар (5 МПа) или менее; охлаждение выхлопного потока турбины в первом теплообменнике для формирования охлажденного выхлопного потока турбины; перекачку насосом CO_2 , содержащегося в охлажденном выхлопном потоке турбины, с подъемом давления приблизительно до 100 бар (10 МПа) или более для формирования CO_2 потока высокого давления; разделение CO_2 потока высокого давления на основную часть и охлаждающую часть; расширение охлаждающей части CO_2 потока высокого давления для понижения его температуры приблизительно до -20°C или менее; охлаждение основной части CO_2 потока высокого давления до температуры приблизительно 5°C или менее расширенной охлаждающей частью CO_2 потока высокого давления при пропускании основной части CO_2 потока высокого давления через второй теплообменник и расширение охлажденной основной части CO_2 потока высокого давления до давления, составляющего приблизительно 30 бар (3 МПа) или менее, но превышающего давление в тройной точке диаграммы состояния для CO_2 так, чтобы сформировать поток жидкого CO_2 низкого давления. В дополнительных вариантах выполнения такой способ может включать одно или несколько следующих положений, которые могут объединяться в любом числе и в любом сочетании. Кроме того, такой способ может включать следующие составляющие, приведенные в данном описании.

Выходной поток камеры сгорания может находиться под давлением приблизительно от 200 бар (20 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа).

Выходной поток камеры сгорания может находиться при температуре приблизительно от 800°C до приблизительно 1600°C.

Поток турбинных выхлопов, содержащий CO_2 , может находиться под давлением приблизительно от 20 бар (2 МПа) до приблизительно 40 бар (4 МПа).

Поток турбинных выхлопов может охлаждаться в теплообменнике до температуры приблизительно 80°C или менее.

Способ может также включать пропускание содержащего CO_2 охлажденного выхлопного потока турбины, через один или несколько сепараторов для отделения от него, по меньшей мере, воды.

Способ может также включать нагревание в теплообменнике выхлопным потоком турбины кислорода или потока рециркуляционного CO_2 или их обоих.

CO_2 поток высокого давления может находиться под давлением приблизительно от 200 бар (20 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа).

Основная часть CO_2 потока высокого давления может охлаждаться до температуры приблизительно от -55°C до приблизительно 0°C.

Способ может также включать после охлаждения основной части CO_2 потока высокого давления, но перед расширением основной части CO_2 потока высокого давления, пропускание основной части CO_2 потока высокого давления через ребойлер.

Ребойлер может быть объединен с отгонной колонной.

Способ может также включать пропускание потока жидкого CO_2 низкого давления через сепаратор, выполненный с возможностью отделения от него парового потока.

Паровой поток может содержать приблизительно 8 мас.% от потока жидкого CO_2 низкого давления, проходящего через сепаратор.

Паровой поток может содержать CO_2 приблизительно от 1 мас.% до приблизительно 75 мас.% и приблизительно от 25 мас.% до приблизительно 99 мас.% один или несколько элементов из группы, включающей N_2 , O_2 и аргон.

Способ может включать направление остальной части потока жидкого CO_2 низкого давления в отгонную колонну.

Поток жидкого CO_2 низкого давления, выходящий из отгонной колонны, может иметь содержание кислорода, не превышающее приблизительно 25 ppm.

Способ может включать перекачку насосом потока жидкого CO_2 низкого давления с подъемом давления по меньшей мере приблизительно до 100 бар (10 МПа).

Способ может включать передачу перекачанного насосом потока жидкого CO_2 в магистраль/трубопровод CO_2 .

Способ может также включать смешивание дистиллятного пара из отгонной колонны с охлаждающей частью CO_2 потока высокого давления, выходящей из второго теплообменника.

Способ может включать добавление смеси дистиллятного пара из отгонной колонны и охлаждающей части CO_2 потока высокого давления, выходящей из второго теплообменника, к охлажденному потоку турбинных выхлопов.

В других иллюстративных вариантах могут использоваться системы, выполненные с возможностью выработки потока жидкого диоксида углерода (CO_2) низкого давления. Например, система может содержать делитель, выполненный с возможностью разделения CO_2 потока высокого давления на первую часть и вторую часть; первое устройство расширения, выполненное с возможностью расширения и охлаждения первой части CO_2 потока высокого давления; теплообменник, предназначенный для охлаждения второй части CO_2 потока высокого давления охлажденной первой частью CO_2 потока высокого давления, выходящей из устройства расширения и второе устройство расширения, выполненное с возможностью расширения второй части CO_2 потока высокого давления так, чтобы сформировать поток жидкого CO_2 низкого давления. В дополнительных вариантах выполнения такая система может включать одно или несколько следующих положений, которые могут объединяться в любом числе и в любом сочетании. Кроме того, такая система может включать любые другие элементы, приведенные в данном описании.

Первое устройство расширения может быть выполнено с возможностью охлаждения CO_2 потока высокого давления до температуры приблизительно -20°C или менее.

Первый теплообменник может быть выполнен с возможностью охлаждения CO_2 потока высокого давления до температуры приблизительно 5°C или менее.

Второе устройство расширения выполнено с возможностью расширения охлажденной второй части CO_2 потока высокого давления до давления, составляющего приблизительно 30 бар (3 МПа) или менее, но превышающего давление в тройной точке диаграммы состояния для CO_2 .

Система может также содержать объединенные отгонную колонну и ребойлер.

Отгонная колонна может быть установлена последовательно ниже по потоку второго устройства расширения, и ребойлер может размещаться последовательно ниже по потоку теплообменника и последовательно выше по потоку второго устройства расширения.

Система может содержать парожидкостный сепаратор, установленный ниже по потоку второго устройства расширения и выше по потоку отгонной колонны.

Система может содержать компрессор, выполненный с возможностью приема первой части CO_2 потока высокого давления из теплообменника.

Система также может содержать камеру сгорания, выполненную с возможностью сжигания углеводородного или углеводородного топлива с кислородом в присутствии потока рециркуляционного CO_2 , находящегося под давлением приблизительно 100 бар (10 МПа) или более и при температуре приблизительно 400°C или более, для формирования выходного потока камеры сгорания, содержащего CO_2 ; турбину, выполненную с возможностью расширения выходного потока камеры сгорания для генерации мощности и формирования выхлопного потока турбины, содержащего CO_2 ; дополнительный теплообменник, выполненный с возможностью охлаждения выхлопного потока турбины; и насос, выполненный с возможностью перекачки CO_2 , содержащегося в охлажденном выхлопном потоке турбины, для формирования CO_2 потока высокого давления.

Ниже приводятся в качестве иллюстрации различные способы и системы, имеющие отношение к изобретению.

Вариант 1. Способ выработки потока жидкого диоксида углерода (CO_2) низкого давления, включающий сжигание углеводородного или углеводородного топлива с кислородом в камере сгорания в присутствии потока рециркуляционного CO_2 , находящегося под давлением приблизительно 100 бар (10 МПа) или более и при температуре приблизительно 400°C или более, для формирования выходного потока камеры сгорания, содержащего CO_2 ; расширение выходного потока камеры сгорания в турбине для генерации мощности и формирования выхлопного потока турбины, содержащего CO_2 под давлением приблизительно 50 бар (5 МПа) или менее; охлаждение выхлопного потока турбины в первом теплообменнике для формирования охлажденного выхлопного потока турбины; перекачку насосом CO_2 , содержащегося в охлажденном выхлопном потоке турбины, с подъемом давления приблизительно до 100 бар (10 МПа) или более для формирования CO_2 потока высокого давления; разделение CO_2 потока высокого давления на основную часть и охлаждающую часть; расширение охлаждающей части CO_2 потока высокого давления для понижения его температуры приблизительно до -20°C или менее; охлаждение основной части CO_2 потока высокого давления до температуры приблизительно 5°C или менее расширенной охлаждающей частью CO_2 потока высокого давления при пропуске основной части CO_2 потока высокого давления через второй теплообменник и расширение охлажденной основной части CO_2 потока высокого давления до давления, составляющего приблизительно 30 бар (3 МПа) или менее, но превышающего давление в тройной точке диаграммы состояния для CO_2 так, чтобы сформировать поток жидкого CO_2 низкого давления.

Вариант 2. Способ любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором давление в выходном потоке камеры сгорания составляет приблизительно от 200 бар (20 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа).

Вариант 3. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором температура в выходном потоке камеры сгорания составляет приблизительно от 800°C до приблизительно 1600°C.

Вариант 4. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором давление в выхлопном потоке турбины, содержащем CO₂, составляет приблизительно от 20 бар (2 МПа) до приблизительно 40 бар (4 МПа).

Вариант 5. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором поток турбинных выхлопов охлаждается в теплообменнике до температуры приблизительно 80°C или менее.

Вариант 6. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, включающий пропускание охлажденного выхлопного потока турбины, содержащего CO₂, через один или несколько сепараторов для отделения от него, по меньшей мере, воды.

Вариант 7. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, включающий нагревание в теплообменнике выхлопным потоком турбины кислорода или потока рециркуляционного CO₂ или их обоих.

Вариант 8. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором давление в CO₂ потоке высокого давления составляет приблизительно от 200 бар (20 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа).

Вариант 9. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором основная часть CO₂ потока высокого давления охлаждается до температуры приблизительно от -55°C до приблизительно 0°C.

Вариант 10. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, включающий после охлаждения основной части CO₂ потока высокого давления, но перед расширением основной части CO₂ потока высокого давления пропускание основной части CO₂ потока высокого давления через ребойлер.

Вариант 11. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором ребойлер объединен с отгонной колонной.

Вариант 12. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, включающий пропускание CO₂ потока низкого давления через сепаратор, выполненный с возможностью отделения от него парового потока.

Вариант 13. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором паровой поток содержит до 8 мас.% от потока жидкого CO₂ низкого давления, пропускаемого через сепаратор.

Вариант 14. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором паровой поток содержит CO₂ приблизительно от 1 мас.% до приблизительно 75 мас.% и приблизительно от 25 мас.% до приблизительно 99 мас.% одного или нескольких элементов из группы, включающей N₂, O₂ и аргон.

Вариант 15. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, включающий направление остальной части потока жидкого CO₂ низкого давления в отгонную колонну.

Вариант 16. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, в котором поток жидкого CO₂ низкого давления, выходящий из отгонной колонны, содержит кислорода не более 25 ppm.

Вариант 17. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, включающий перекачку насосом потока CO₂ низкого давления с подъемом давления по меньшей мере приблизительно до 100 бар (10 МПа).

Вариант 18. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, включающий передачу перекачанного насосом потока жидкого CO₂ в магистраль CO₂.

Вариант 19. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, включающий смешивание дистиллятного пара из отгонной колонны с охлаждающей частью CO₂ потока высокого давления, выходящей из второго теплообменника.

Вариант 20. Способ по любому из предыдущих или последующих вариантов, включающий добавление полученной смеси к охлажденному потоку турбинных выхлопов.

Вариант 21. Система, выполненная с возможностью выработки потока жидкого диоксида углерода (CO₂) низкого давления и содержащая: делитель, выполненный с возможностью разделения CO₂ потока высокого давления на первую часть и вторую часть; первое устройство расширения, выполненное с возможностью расширения и охлаждения первой части CO₂ потока высокого давления; теплообменник, предназначенный для охлаждения второй части CO₂ потока высокого давления охлажденной первой частью CO₂ потока высокого давления, выходящей из устройства расширения; и второе устройство расширения, выполненное с возможностью расширения второй части CO₂ потока высокого давления так, чтобы сформировать поток жидкого CO₂ низкого давления.

Вариант 22. Система по любому из предыдущих или последующих вариантов, в которой первое устройство расширения выполнено с возможностью охлаждения первой части CO₂ потока высокого давления до температуры приблизительно -20°C или менее.

Вариант 23. Система по любому из предыдущих или последующих вариантов, в которой теплообменник выполнен с возможностью охлаждения второй части CO₂ потока высокого давления до температуры приблизительно 5°C или менее.

Вариант 24. Система по любому из предыдущих или последующих вариантов, в которой второе устройство расширения выполнено с возможностью расширения охлажденной второй части CO_2 потока высокого давления до давления, составляющего приблизительно 30 бар (3 МПа) или менее, но превышающего давление в тройной точке диаграммы состояния для CO_2 .

Вариант 25. Система по любому из предыдущих или последующих вариантов, содержащая объединенные отгонную колонну и ребойлер.

Вариант 26. Система по любому из предыдущих или последующих вариантов, в которой отгонная колонна находится последовательно ниже по потоку второго устройства расширения, и в которой ребойлер находится последовательно ниже по потоку теплообменника и последовательно выше по потоку второго устройства расширения.

Вариант 27. Система по любому из предыдущих или последующих вариантов, содержащая парожидкостной сепаратор, установленный ниже по потоку второго устройства расширения и выше по потоку отгонной колонны.

Вариант 28. Система по любому из предыдущих или последующих вариантов, содержащая компрессор, выполненный с возможностью приема первой части CO_2 потока высокого давления из теплообменника.

Вариант 29. Система по любому из предыдущих вариантов, содержащая камеру сгорания, выполненную с возможностью сжигания углеродного или углеводородного топлива с кислородом в присутствии потока рециркуляционного CO_2 , находящегося под давлением приблизительно 100 бар (10 МПа) или более и при температуре приблизительно 400°C или более, для формирования выходного потока камеры сгорания, содержащего CO_2 ; турбину, выполненную с возможностью расширения выходного потока камеры сгорания для генерации мощности и формирования выхлопного потока турбины, содержащего CO_2 ; дополнительный теплообменник, выполненный с возможностью охлаждения выхлопного потока турбины; и насос, выполненный с возможностью перекачки CO_2 , содержащегося в охлажденном выхлопном потоке турбины, для формирования CO_2 потока высокого давления.

Возможность осуществления и преимущества изобретения станут понятны из прочтения нижеследующего подробного изложения и сопровождающих чертежей, кратко описанных далее. Изобретение может включать любую комбинацию раскрытых вариантов выполнения в пределах заявляемого объема притязаний. Данное описание предназначено для прочтения в целом, так что любые разделяемые свойства или элементы раскрытого изобретения в любых различных вариантах их выполнения и толкованиях должны рассматриваться как обладающие возможностью комбинирования до тех пор, пока в контексте ясно не оговорено другое.

Краткое описание чертежей

Далее изобретение писано более подробно со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых без обязательного соблюдения масштаба показано

на фиг. 1 - блок-схема системы, предназначенной для формирования потока жидкого CO_2 низкого давления;

на фиг. 2 - блок-схема системы, предназначенной для формирования потока жидкого CO_2 низкого давления с использованием части потока CO_2 высокого давления, выведенной из процесса генерирования мощности.

Осуществление изобретения

Далее представленная сущность изобретения будет изложена более полно со ссылкой на приводимые в качестве примера варианты выполнения. Эти варианты выполнения представлены так, чтобы данное описание было законченным и исчерпывающим, полностью раскрывая объем изобретения специалисту в данной области техники. Действительно, сущность изобретения может быть реализована во многих различных вариантах и не должна рассматриваться как ограниченная приведенными ниже вариантами выполнения, тем более что эти варианты представлены так, чтобы данное описание удовлетворяло всем действующим нормативным требованиям. В приведенном описании и в приложенной формуле изобретения использование форм единственного числа включает множественность объектов до тех пор, пока не оговорено иное.

Настоящее описание относится к системам и способам, обеспечивающим возможность выработки жидкого диоксида углерода (CO_2) под низким давлением. В частности, системы и способы могут выполняться с возможностью приема потока, содержащего не жидкий CO_2 (например, газообразный или находящийся в сверхкритическом состоянии CO_2), и преобразования по меньшей мере части не жидкого CO_2 в жидкий. Входной поток может содержать фракцию жидкого CO_2 ; однако входной поток предпочтительно содержит не более приблизительно 25 мас.%, не более приблизительно 10 мас.%, не более приблизительно 5 мас.% или не более приблизительно 2 мас.% жидкого CO_2 .

Жидкий CO_2 , выработанный согласно настоящему изобретению, может быть получен с низким давлением, т.е. с давлением выработанного жидкого CO_2 меньшим 50 бар (5 МПа), но большим давления в тройной точке диаграммы состояния для CO_2 , так, чтобы предпочтительно избежать формирования твердого CO_2 . В некоторых вариантах выполнения выработанный жидкий CO_2 может находиться под давлением вплоть до приблизительно 6 бар (0,6 МПа), в частности приблизительно от 30 бар (3 МПа) до при-

близительно 6 бар (0,6 МПа) или приблизительно от 15 бар (1,5 МПа) до приблизительно 6 бар (0,6 МПа). Температура выработанного жидкого CO_2 предпочтительно лежит вблизи температуры в точке росы для данного давления. Например, температура может лежать в диапазоне приблизительно от 5°C до приблизительно -55°C , приблизительно от -5°C до приблизительно -55°C или приблизительно от -15°C до приблизительно -55°C .

Способы выработки жидкого CO_2 согласно вариантам выполнения настоящего изобретения в основном могут включать охлаждение и расширение CO_2 , содержащегося во входном потоке. В зависимости от источника входного потока способы могут включать одну или несколько ступеней сжатия. В предпочтительных вариантах выполнения поступающий CO_2 может находиться под давлением приблизительно 60 бар (6 МПа) или более, приблизительно 100 бар (10 МПа) или более или приблизительно 200 бар (20 МПа) или более. В других вариантах выполнения давление поступающего CO_2 может находиться в диапазоне приблизительно от 60 бар (6 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа). Температура поступающего CO_2 может быть более 10°C или лежать в диапазоне приблизительно от 10°C до приблизительно 40°C , приблизительно от 12°C до приблизительно 35°C или приблизительно от 15°C до приблизительно 30°C . В некоторых вариантах выполнения температура поступающего CO_2 может быть близка к температуре окружающей среды.

Пригодный для выработки жидкого CO_2 вариант представлен на фиг. 1. Как можно видеть на ней, CO_2 поток 24 высокого давления может охлаждаться при пропускании через водяной охладитель 50 (который может быть опционным в зависимости от реальной температуры CO_2 потока высокого давления). CO_2 поток 24 высокого давления затем разделяется на первую часть и вторую часть с использованием делителя 68 (или другого подходящего элемента системы, выполненного с возможностью разделения потока), обеспечивая отведенный CO_2 поток 57 высокого давления, который может расширяться, например, при прохождении через вентиль 58 или другое пригодное устройство, формируя охлаждающий CO_2 поток 56. Остальной CO_2 поток 62 высокого давления проходит через теплообменник 10, где он охлаждается охлаждающим CO_2 потоком 56, выходящим из теплообменника как CO_2 поток 33. Охлажденный CO_2 поток 51 высокого давления, выходящий с холодного края теплообменника 10, может иметь температуру приблизительно 5°C или менее, приблизительно 0°C или менее, приблизительно -10°C или менее или приблизительно -20°C или менее (например, приблизительно от 5°C до приблизительно -40°C или приблизительно от 0°C до приблизительно -35°C). Охлажденный CO_2 поток 51 высокого давления может расширяться, формируя поток жидкого CO_2 . Как показано на фиг. 1, охлажденный CO_2 поток 51 высокого давления сначала проходит через ребойлер 52, представляющий на фиг. 1 часть отгонной колонны 53, и таким образом обеспечивает подачу тепла для проходящего в ней процесса дистилляции, что будет дополнительно описано далее. Прохождение через ребойлер может быть опционным. CO_2 поток 55 высокого давления, выходящий из ребойлера 52, расширяется, формируя поток 35 жидкого CO_2 с температурой и давлением, лежащими в описанных выше диапазонах. На фиг. 1 поток 55 расширяется при прохождении через вентиль 48, но может использоваться любое устройство, пригодное для расширения сжатого CO_2 потока. Например, устройством расширения может быть система, производящая работу, например, турбина, в которой энтальпия CO_2 понижается от входа к выходу, а также понижается выходная температура.

Расширение CO_2 потока высокого давления (например, с давлением в диапазоне приблизительно от 60 бар (6 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа)) с формированием CO_2 потока низкого давления (например, с давлением приблизительно 30 бар (3 МПа) или менее, но превышающим давление в тройной точке диаграммы состояния для CO_2) может привести к образованию двухфазного потока продукта, сформированного смесью газа и жидкости и имеющего такую же общую энтальпию, что и CO_2 поток, поступающий в вентиль (или другое устройство расширения). В частности, температура двухфазной смеси, выходящей из вентиля (или из турбины для иллюстративного альтернативного варианта выполнения, упомянутого ранее), может лежать вблизи температуры точки росы для жидкости при сниженном давлении. На фиг. 1 оба потока, поток 56, выходящий из вентиля 58, и поток 35, выходящий из вентиля 48, могут быть двухфазными потоками. Двухфазный CO_2 поток 35 низкого давления, выходящий из вентиля 48, может пропускаться через сепаратор 9 для обеспечения CO_2 потока 49 паровой фракции и CO_2 потока 36 жидкой фракции.

В вариантах выполнения, в которых входной CO_2 поток высокого давления поступает из системы генерации мощности путем сжигания топлива в атмосфере кислорода, паровая фракция, которая может быть отделена от потока низкого давления жидкого CO_2 , будет содержать большой объем инертных газов (например, азота, избыточного O_2 и благородных газов, таких как аргон), присутствующих в источнике кислорода и источнике топлива (например, в природном газе). В качестве не служащего ограничением примера процесс генерации мощности за счет сжигания топлива в атмосфере кислорода может проводиться при избыточном в 1% потоке кислорода, подаваемом в камеру сгорания, или при потоке кислорода, составленном приблизительно из 99,5% кислорода и 0,5% аргона. Получающийся чистый CO_2 продукт может содержать кислород с концентрацией 2% и аргон с концентрацией 1%.

Согласно настоящему изобретению охлаждение CO_2 продукта, поступающего из системы генера-

ции мощности, как в качестве примера описано выше, средством непрямого охлаждения до температуры, образующейся при резком расширении при прохождении через вентиль до давления, например, 10 бар (1 МПа), приводит к образованию приблизительно 4 мас.% паровой фракции. В различных вариантах выполнения паровая фракция может составлять по массе приблизительно до 6 мас.%, приблизительно до 5 мас.% или приблизительно до 4 мас.% от общего потока жидкого CO_2 (например, потока 35 на фиг. 1). Паровой поток (например, поток 49 на фиг. 1) может содержать CO_2 по массе приблизительно от 1 мас.% до приблизительно 75 мас.% и приблизительно от 25 мас.% до приблизительно 99 мас.% смесь N_2 , O_2 и аргона (или других инертных газов). В других вариантах выполнения паровой поток может содержать приблизительно 60 мас.% или более, приблизительно 65 мас.% или более или приблизительно 70 мас.% или более смеси N_2 , O_2 и аргона (или других инертных газов). Фракция мгновенного испарения (например, поток 49, выходящий из сепаратора 9 на фиг. 1) может быть отведена в атмосферу или уловлена. Создание потока фракции мгновенного испарения обладает преимуществом в вариантах выполнения, в которых входной CO_2 поток, получаемый в процессе горения в атмосфере кислорода, служит для удаления паровой фракции и предотвращает накопление инертного аргона и(или) азота (которые могут присутствовать в сжигаемых природном газе и(или) топливном газе, полученном из угля, и которые могут присутствовать в потоке кислорода, получаемом с установки криогенного разделения воздуха). Для формирования фракции мгновенного испарения может быть целесообразным перед расширением охладить CO_2 поток высокого давления (например, поток 62 на фиг. 1) до температуры приблизительно -30°C или менее или приблизительно -33°C или менее. В вариантах выполнения, в которых входной CO_2 поток высокого давления поступает от источника, который частично или полностью свободен от инертных газов (и опционно кислорода), необходимость в формировании фракции мгновенного испарения может отсутствовать. В вариантах выполнения, в которых в процессе генерации мощности за счет сжигания топлива в атмосфере кислорода используется в качестве топлива природный газ, содержащий значительную долю N_2 , может быть целесообразным установление температуры такой, при которой охлаждение потока 51 обеспечивает удаление большей части N_2 вместе с O_2 и аргоном в потоке 49 при минимальной потере CO_2 .

Предпочтительно основания часть O_2 и аргона (а также других инертных газов) удаляется из входного CO_2 потока с фракцией мгновенного испарения, так что в потоке фракции жидкого CO_2 (например, в потоке 36 на фиг. 1) остается только малая часть N_2 , O_2 и аргона, например, с концентрацией по массе приблизительно 1 мас.% или менее, приблизительно 0,5 мас.% или менее или приблизительно 0,2 мас.% или менее. Эти малые концентрации N_2 , O_2 и аргона могут быть удалены из потока жидкой фракции CO_2 с использованием, например, дистилляционного устройства (например, отгонной колонны 53 на фиг. 1). Альтернативно варианту выполнения с фиг. 1 отгонная секция может быть встроена в нижнюю часть сепаратора-испарителя. В варианты выполнения, в которых используется отгонная колонна, может быть включен ребойлер (компонент 52 на фиг. 1, как рассмотрено выше) для отбора оставшегося доступного тепла от части или всего CO_2 потока высокого давления (например, потока 51 на фиг. 1). Такой нагрев может изменяться для обеспечения необходимого отношения жидкость/пар с целью снижения концентрации кислорода в чистом продукте жидкого CO_2 (поток 54 на фиг. 1). Концентрация кислорода в потоке чистого жидкого CO_2 может составлять не более приблизительно 25 ppm, не более приблизительно 20 ppm или не более приблизительно 10 ppm.

В других вариантах выполнения поток 54 чистого жидкого CO_2 может прокачиваться насосом с увеличением давления и нагреваться в теплообменнике 10 (или в дополнительном теплообменнике, или в ином средстве) для подачи в магистраль CO_2 . В частности, давление в потоке поставочного жидкого CO_2 при прокачке может возрастать до значения приблизительно от 100 бар (10 МПа) до приблизительно 250 бар (25 МПа).

Возвращаясь к фиг. 1 можно видеть, что давление продукта 63, отходящего сверху отгонной колонны 53, может быть затем понижено, при необходимости, например, в вентиле 64, и затем этот продукт может быть объединен с CO_2 потоком 33. Объединенные потоки могут сжиматься в компрессоре 34 для обеспечения возвратного CO_2 потока 21 высокого давления, который может быть, например, объединен с входным CO_2 потоком 24 высокого давления или добавлен к другому, содержащему CO_2 потоку (см. фиг. 2).

Вышеприведенные варианты формирования потока жидкого CO_2 низкого давления могут быть экономически предпочтительными, потому что приблизительно 95% или более, приблизительно 96% или более или приблизительно 97% или более от общей массы CO_2 , содержащегося в потоке чистого CO_2 низкого давления (например, в потоке 35 на фиг. 1), могут быть удалены в виде именно потока жидкого CO_2 низкого давления. В описанных выше вариантах выполнения приблизительно от 1,5 до 2,5 мас.% чистого CO_2 продукта может быть выпущено в атмосферу вместе со смешанным потоком N_2 , O_2 и аргона (например, с потоком 49 на фиг. 1), что обеспечивает эффективность очистки CO_2 , составляющую примерно от 97,5% до приблизительно 98,5%. В вариантах выполнения, где вышеописанный способ осуществляется в сочетании с энергетической системой замкнутого цикла, в которой CO_2 используется в качестве рабочего тела, поток 49 предпочтительно выпускается в атмосферу, так как является желательным удаление инертных компонентов для поддержания их парциального давления и концентрации на как

можно более низких уровнях. Опционно поток 59 после понижения давления в вентиле 60 и перед выпуском в атмосферу может быть пропущен через группу каналов в теплообменнике 10 для обеспечения добавочного понижения температуры при охлаждении потока 62.

Такое использование входного CO_2 потока 24 высокого давления обеспечивает уникальную возможность выполнения непрямого охлаждения этого потока. Как описано в связи с вышеприведенными вариантами выполнения, не прямое охлаждение может обеспечиваться путем отделения части CO_2 потока высокого давления при температуре, близкой к окружающей, и затем расширения отделенной части CO_2 потока высокого давления с падением температуры приблизительно до -20°C или менее, приблизительно до -30°C или менее, приблизительно до -40°C или менее (например, приблизительно от -40°C до приблизительно -55°C). Этого можно достичь понижением давления CO_2 потока 24 высокого давления до значений менее приблизительно 20 бар (2 МПа), менее приблизительно 10 бар (1 МПа) или менее 8 бар (0,8 МПа) (например, приблизительно от 20 бар (2 МПа) до приблизительно 5 бар (0,5 МПа) или приблизительно от 12 бар (1,2 МПа) до приблизительно 5 бар (0,5 МПа), в частности приблизительно до 5,55 бар (0,555 МПа)). Получившийся парожидкостный поток (например, поток 56 на фиг. 1) затем используется для непрямого охлаждения в теплообменнике основной части CO_2 потока высокого давления.

Способы по настоящему изобретению имеют особое преимущество при их использовании в сочетании со способом генерации мощности, в котором в качестве рабочего тела используется CO_2 , как, например, в системах, раскрытых в патенте US 8596075, содержание которого в полном объеме включено в данное описание в качестве ссылки. В частности, в таком процессе может использоваться турбина с большим отношением высокое давление/низкое давление, в которой происходит расширение смеси потока рециркуляционного CO_2 высокого давления и продуктов горения, образующихся при сжигании топлива. Может использоваться любое органическое топливо. Предпочтительно топливо представляет собой газообразное топливо, однако не газообразное топливо также не следует исключать. В не служащие ограничением примеры входят природный газ, баллонные газы, топливные газы (например, включая один или несколько компонентов из группы, содержащей H_2 , CO , CH_4 , H_2S и NH_3) и другие подобные горючие газы. Твердые топлива, например уголь, лагнит, нефтяной кокс, битум и т.п., могут также использоваться при наличии необходимых элементов системы (например, при использовании камеры сгорания с неполным окислением или газогенератора для преобразования твердых или тяжелых жидких топлив в газообразную форму). Могут также использоваться жидкие углеводородные топлива. В процессе сжигания в качестве окислителя может использоваться кислород. Горячий выхлопной газ турбины используется для частичного предварительного нагрева потока рециркуляционного CO_2 высокого давления. Рециркуляционный CO_2 поток также нагревается теплом, полученным от энергии сжатия CO_2 в компрессоре, как рассмотрено далее. Все нежелательные примеси, полученные из топлива и продуктов горения, такие как соединения серы, NO , NO_2 , CO_2 , H_2O , Hg и т.п., могут отделяться для удаления без выброса в атмосферу. Включен также каскад сжатия CO_2 , содержащий высокоэффективные блоки, обеспечивающие минимальное потребление мощности. Каскад сжатия CO_2 может, в частности, обеспечивать в топливный компрессор поток рециркуляционного CO_2 , который частично может возвращаться в камеру сгорания и частично направляться в компоненты выработки жидкого CO_2 как входной CO_2 поток высокого давления.

Например, на фиг. 2 представлена система генерации мощности, объединенная с описанными элементами выработки чистого CO_2 продукта, получаемого из входящего в исходное топливо углерода, в виде жидкости под низким давлением с содержанием кислорода в минимальном диапазоне, приведенном в данном описании. Вариант выполнения такой системы описан в приведенном ниже примере со ссылкой на фиг. 2.

Величина общего потока чистого CO_2 продукта может меняться в зависимости от природы используемого топлива. В вариантах выполнения с использованием природного газа общий поток чистого CO_2 продукта может составлять приблизительно от 2,5% до приблизительно 4,5% (например, приблизительно 3,5%) от общего потока рециркуляционного CO_2 через топливный компрессор. В вариантах выполнения с использованием битуминозного угля (например, с месторождения № 6, Иллинойс) общий поток чистого CO_2 продукта может составлять приблизительно от 5% до приблизительно 7% (например, приблизительно 6%) от общего потока рециркуляционного CO_2 через топливный компрессор. Количество рециркуляционного CO_2 , используемого для охлаждения, может лежать в диапазоне приблизительно от 15% до приблизительно 35% или приблизительно от 20% до приблизительно 30% (например, приблизительно 25%) от массы потока чистого CO_2 продукта.

В некоторых вариантах выполнения может использоваться сжиженный природный газ в качестве источника для охлаждения таким образом, как описано в патентной заявке US 2013/0104525, содержание которой в полном объеме включено в данное описание в качестве ссылки. В частных вариантах выполнения сжиженный природный газ может нагреваться до температуры, приближенной к температуре конденсации CO_2 , содержащегося в турбинных выхлопах (например, при давлении приблизительно от 20 бар (2 МПа) до приблизительно 40 бар (4 МПа)). Поток турбинных выхлопов, выходящий из водяного сепаратора, может обезвоживаться в осушителе до достижения точки росы ниже приблизительно -50°C , перед тем как он будет переведен в жидкое состояние путем охлаждения с использованием сжиженного

природного газа, который в свою очередь нагревается. Теперь жидкий CO_2 может быть сжат до давления приблизительно от 200 бар (20 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа) при перекачке многоступенчатым центробежным насосом. Природный газ высокого давления будет находиться при температуре, обычно лежащей в диапазоне приблизительно от -23°C (для турбинных выхлопов, выходящих из теплообменника-экономайзера под давлением приблизительно 20 бар (2 МПа)) до приблизительно 0°C (для турбинных выхлопов, выходящих из теплообменника-экономайзера под давлением приблизительно 40 бар (4 МПа)), при соблюдении разницы в 5°C с температурой в точке росы для CO_2 при этих давлениях. Этот холодный природный газ высокого давления может использоваться для предварительного охлаждения CO_2 , находящегося под высоким давлением приблизительно от 60 бар (6 МПа) до приблизительно 400 бар (40 МПа), перед его расширением с получением жидкого CO_2 в диапазоне давлений приблизительно от 6 бар (0,6 МПа) до приблизительно 30 бар (3 МПа).

Понижение температуры может производиться за счет дополнительного охлаждения при расширении CO_2 высокого давления, как описано выше, до температуры охлажденного чистого CO_2 продукта, что при расширении до требуемого давления для жидкого CO_2 продукта приводит к образованию газовой фракции, содержащей приблизительно от 50 мас.% до приблизительно 80 мас.% ($\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{Ar}$). Полезный эффект заключается в существенном снижении количества дополнительного CO_2 , который должен быть рециркулирован для охлаждения.

Пример.

Далее варианты выполнения настоящего изобретения иллюстрируются следующим примером, представленным для пояснения сущности изобретения и не служащим для ограничения его объема. Ниже описан вариант выполнения объединенных системы и способа генерации мощности и системы и способа выработки жидкого CO_2 низкого давления, как показано на фиг. 2.

Согласно фиг. 2 поток 42 природного газа (который в представленном примере представляет собой чистый метан), служащий топливом и находящийся под давлением приблизительно 40 бар (4 МПа), сжимается до давления приблизительно 320 бар (32 МПа) в компрессоре 44, обеспечивая поток 43 сжатого топливного природного газа, который в свою очередь поступает в камеру 1 сгорания, где он сжигается в потоке 38 предварительно нагретого окислителя, содержащего приблизительно 23 мас.% кислорода, смешанного приблизительно с 77 мас.% разбавляющего CO_2 . В данном иллюстративном варианте выполнения общее количество кислорода приблизительно на 1 мас.% превышает количество кислорода, необходимое для стехиометрического горения. Продукты горения в камере 1 сгорания разбавляются рециркуляционным потоком 37 нагретого CO_2 , находящимся под давлением приблизительно 304 бара (30,4 МПа) и при температуре 707°C . Выходной поток 39 камеры сгорания при температуре приблизительно 1153°C направляется на вход турбины 2, соединенной с электрогенератором 3 и главным компрессором 4 рециркуляционного CO_2 .

Выходной поток 39 камеры сгорания расширяется в турбине 2, обеспечивая поток 45 турбинных выхлопов под давлением приблизительно 30 бар (3 МПа) и при температуре 747°C , который в свою очередь пропускается через теплообменник-экономайзер 15 и охлаждается приблизительно до 56°C , выходя как охлажденный поток 16 турбинных выхлопов. Охлажденный поток 16 турбинных выхлопов далее снова охлаждается охлаждающей водой в водяном охладителе 7 до температуры, близкой к температуре окружающей среды (поток 17 на фиг. 2). Охлажденный поток 17 турбинных выхлопов пропускается через сепаратор 6, в котором жидкий водяной поток 18 отделяется от дистиллятного потока 19 газообразного CO_2 , который сам разделяется на отдельные потоки (потоки 22 и 20 на фиг. 2).

Основная часть дистиллятного потока 22 газообразного CO_2 поступает в компрессор 4 рециркуляционного CO_2 , работающий совместно с промежуточным охладителем 5 и сжимающий находящийся при окружающей температуре основной дистиллятный поток 22 газообразного CO_2 (получившийся из потока 45 турбинных выхлопов) от давления приблизительно 28,2 бар (2,82 МПа) до приблизительно 63,5 бар (6,35 МПа), т.е. образующий поток 23 сжатого CO_2 .

Поток 20 дистиллятной газообразной фракции CO_2 используется для разбавления потока 28 (под давлением приблизительно 28 бар (2,8 МПа)), содержащего 99,5% O_2 и выработанного на установке 14 криогенного разделения воздуха. Объединенные потоки 20 и 28 формируют окислительный поток 26 низкого давления, сжимаемый приблизительно до 320 бар (32 МПа) (поток 27) в компрессоре 11 с промежуточным охладителем 12. Окислительный поток 27 высокого давления нагревается в теплообменнике-экономайзере, выходя из него как предварительно нагретый поток 38 окислителя под давлением приблизительно 304 бара (30,4 МПа) и с температурой приблизительно 707°C .

Первый отведенный поток 32 при температуре приблизительно 110°C отбирается от нагревающегося рециркуляционного потока CO_2 высокого давления и нагревается приблизительно до 154°C (поток 31 на фиг. 2) в дополнительном теплообменнике 13 от потока теплопередачи (поступающего в дополнительный теплообменник как поток 30 и выходящий из него как поток 29), отводящего тепло сжатия от воздушного компрессора установки 14 криогенного разделения воздуха. Блок разделения воздуха обеспечен подачей 40 атмосферного воздуха и потоком 41 отвода побочного азота, выпускаемого в атмосферу.

Второй отведенный поток 61 при температуре приблизительно 400°C отбирается от нагревающегося рециркуляционного потока CO₂ высокого давления и используется в турбине 2 для внутреннего охлаждения.

Сжатый CO₂ поток 23 при давлении 63,5 бар (6,35 МПа) и температуре 51°C охлаждается в теплообменнике 46 холодной водой, обеспечивая поток 47 при температуре приблизительно 17,5°C с плотностью приблизительно 820 кг/м³, перекачиваемый многоступенчатым центробежным насосом с увеличением давления приблизительно до 305 бар (30,5 МПа). Выходной поток насоса разделяется на две части.

Рециркуляционный CO₂ поток 25 высокого давления, как часть выходного потока насоса, пропускается через теплообменник-экономайзер 15 и действует как поток, от которого отбираются первый и второй отведенные потоки (как описано выше).

Поток 24 как часть выходного потока насоса содержит поток чистого CO₂ продукта, получаемого из углерода, содержащегося в природном газе. Предпочтительно поток 24 может включать избыточное содержание CO₂, используемое для охлаждения. Избыточное содержание CO₂ может составлять вплоть до 50 мас.%, вплоть до 40 мас.% или вплоть до 30 мас.% рециркуляционного CO₂. В некоторых вариантах выполнения избыточное содержание CO₂ может составлять приблизительно от 5 до 45 мас.%, приблизительно от 10 до 40 мас.% или приблизительно от 15 до 35 мас.% рециркуляционного CO₂.

CO₂ поток 24 высокого давления охлаждается до температуры, близкой к окружающей, в водяном охладителе 50 и разделяется на две части. Высокое давление в потоке 57 CO₂ фракции снижается в вентиле 58 приблизительно до 8,2 бар (0,82 МПа) с формированием охлаждающего CO₂ потока 56, представляющего собой двухфазную смесь с температурой приблизительно -4°C. Охлаждающий CO₂ поток 56 пропускается через теплообменник 10, в котором он испаряется и нагревается до температуры, близкой к окружающей, выходя в виде CO₂ потока 33.

Содержащий чистый CO₂ продукт поток 62 высокого давления направляется непосредственно в теплообменник 10, где он охлаждается охлаждающим CO₂ потоком 56 до температуры приблизительно -38°C, выходя в виде содержащего чистый CO₂ продукт охлажденного потока 51. Этот поток затем проходит через небольшой ребойлер 52 в основании отгонной колонны 53, выходя из него как поток 55. Давление в этом потоке снижается приблизительно до 10 бар (1 МПа) в вентиле 48, что формирует двухфазный поток 35 чистого CO₂ продукта, который затем пропускается через сепаратор 9.

Дистиллятный паровой поток 49, выходящий сверху сепаратора 9, включает в себе приблизительно 4 мас.% расхода в двухфазном потоке 35 чистого CO₂ продукта и формируется приблизительно на 30 мас.% из CO₂ и приблизительно на 70 мас.% из комбинации O₂ и аргона. Давление в дистиллятном паровом потоке 49 понижается в вентиле 60, и затем этот поток выпускается в атмосферу (поток 59 на фиг. 2). Опционно поток 59 может быть в теплообменнике 10 нагрет до температуры, близкой к окружающей, обеспечивая дополнительное охлаждение, и затем дополнительно нагрет до температуры, превышающей окружающую, чтобы сформировать восходящий выпускной поток.

Поток 36 жидкого CO₂, выходящий из сепаратора 9 под давлением приблизительно 10 бар (1 МПа), содержит приблизительно 96 мас.% расхода в двухфазном потоке 35 чистого CO₂ продукта. Поток 36 поступает к верху отгонной колонны 53.

Снизу отгонной колонны 53 выходит содержащий жидкий CO₂ продукт поток 54 низкого давления, включающий чистый CO₂, полученный из углерода, содержащегося в первичном топливе, подаваемом в энергетическую систему. В представленном варианте выполнения поток 54 содержит кислорода ниже 10 ppm.

Давление выходящего сверху отгонной колонны 53 потока 63 продукта в вентиле 64 понижается приблизительно до 8 бар (0,8 МПа), и этот поток добавляется к CO₂ потоку 33. Объединенные потоки 33 и 63 сжимаются в компрессоре 34 приблизительно до 28,5 бар (2,85 МПа). Выходной поток 21, сжатый в CO₂ компрессоре 34, смешивается с основной частью отгонного потока 22 газообразного CO₂ и повторно сжимается приблизительно до 305 бар (30,5 МПа) в CO₂ компрессоре 4 и насосе 8.

В представленном выше примере конкретные значения (например, температуры, давления и относительных величин) введены для пояснения рабочих режимов в иллюстративных вариантах выполнения настоящего изобретения. Эти значения не предназначены для ограничения изобретения, и нужно понимать, что они могут изменяться в определенных диапазонах, тем или иным образом раскрытых в данном описании, охватывая дополнительные рабочие варианты выполнения в свете общего представленного описания.

Многие модификации и другие варианты осуществления раскрытой сущности настоящего изобретения могут придти на ум специалисту в данной области, которому приведенная сущность изобретения предоставляет преимущество, заключающееся в идеях, заложенных в вышеприведенное описание и сопровождающие чертежи. Поэтому должно быть понятно, что настоящее изобретение не ограничено конкретными приведенными частными вариантами и модификациями, и в объем изобретения, определяемый приложенной формулой изобретения, должны быть включены другие варианты выполнения. Хотя в данном описании использованы специфические термины, они используются исключительно в общепринятом и описательном смысле, а не в целях внесения ограничений.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ выработки потока жидкого диоксида углерода (CO_2) низкого давления, включающий разделение содержащего CO_2 потока высокого давления, составляющего 60 бар (6 МПа) или более, на основную часть и охлаждающую часть;

расширение охлаждающей части содержащего CO_2 потока высокого давления для понижения ее температуры до 0°C или ниже;

охлаждение основной части содержащего CO_2 потока высокого давления до температуры 5°C или ниже расширенной охлаждающей частью содержащего CO_2 потока высокого давления при пропускании основной части содержащего CO_2 потока высокого давления через теплообменник;

расширение охлажденной основной части содержащего CO_2 потока высокого давления до давления, составляющего 30 бар (3 МПа) или менее, но превышающего давление в тройной точке диаграммы состояния для CO_2 так, чтобы сформировать поток жидкого CO_2 низкого давления.

2. Способ по п.1, в котором давление в содержащем CO_2 потоке высокого давления составляет от 60 бар (6 МПа) до 400 бар (40 МПа).

3. Способ по п.1, в котором охлаждающую часть содержащего CO_2 потока высокого давления расширяют для понижения ее температуры до -20°C или ниже.

4. Способ по п.1, в котором основную часть содержащего CO_2 потока высокого давления охлаждают до температуры 0°C или ниже.

5. Способ по п.1, в котором основную часть содержащего CO_2 потока высокого давления охлаждают до температуры от -55 до 0°C .

6. Способ по п.1, в котором после охлаждения основной части содержащего CO_2 потока высокого давления, но перед ее расширением пропускают ее через ребойлер.

7. Способ по п.6, в котором ребойлер размещен в отгонной колонне.

8. Способ по п.1, в котором пропускают поток жидкого CO_2 низкого давления через сепаратор, выполненный с возможностью отделения от него газового потока.

9. Способ по п.8, в котором газовый поток содержит до 8 мас.% от потока жидкого CO_2 низкого давления, пропускаемого через сепаратор.

10. Способ по п.8, в котором газовый поток содержит от 1 до 75 мас.% CO_2 и от 25 до 99 мас.% одного или нескольких элементов из группы, включающей N_2 , O_2 и аргон.

11. Способ по п.8, в котором направляют оставшуюся после отделения газового потока часть потока жидкого CO_2 низкого давления в отгонную колонну.

12. Способ по п.11, в котором поток жидкого CO_2 низкого давления, выходящий из отгонной колонны, содержит кислород в концентрации не более 25 ppm.

13. Способ по п.11, в котором осуществляют перекачку насосом потока CO_2 низкого давления с повышением давления по меньшей мере до 100 бар (10 МПа).

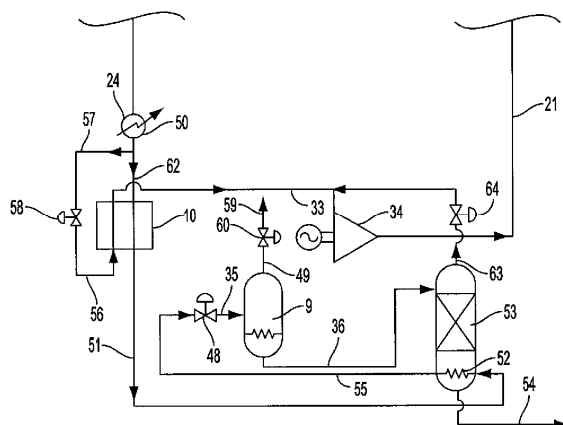
14. Способ по п.1, в котором содержащий CO_2 поток высокого давления представляет собой рециркуляционный поток из процесса генерации мощности.

15. Способ по п.14, в котором содержащий CO_2 поток высокого давления, по меньшей мере частично, получен от сжигания углеродсодержащего топлива в процессе генерации мощности.

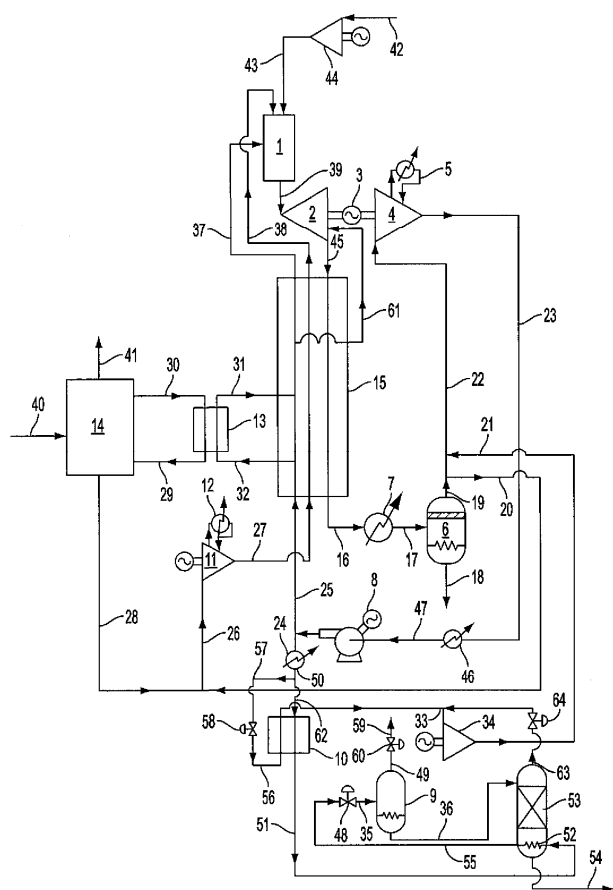
16. Способ по п.15, в котором углеродсодержащее топливо включает газообразное топливо.

17. Способ по п.15, в котором углеродсодержащее топливо включает твердое топливо.

18. Способ по п.1, в котором поток жидкого CO_2 низкого давления используют в процессе добычи нефти вторичным методом.



Фиг. 1



Фиг. 2

