(19) Евразийское патентное ведомство

(11) 034078 (13) B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2019.12.25

(21) Номер заявки
201890316

(22) Дата подачи заявки
2016.08.10

(51) Int. Cl. ***B01D 53/04*** (2006.01)
B01D 53/047 (2006.01)
B01D 53/26 (2006.01)
C10L 3/10 (2006.01)

(54) УСТРОЙСТВО И СИСТЕМА ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ СПОСОБОВ КОРОТКОЦИКЛОВОЙ АДСОРБЦИИ

(31) **62/213,262**
(32) **2015.09.02**
(33) **US**
(43) **2018.07.31**
(86) **PCT/US2016/046361**
(87) **WO 2017/039988 2017.03.09**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ЭКСОНМОБИЛ АПСТРИМ РИСЕРЧ КОМПАНИ (US)

(72) Изобретатель:
Джонсон Роберт А., Декман Гарри В., Келли Брюс Т., Элфке Расселл Х., Рамкумар Шветха (US)

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(56) US-A1-2012312163
US-A-5486227

(57) Обеспечиваются устройства и системы для осуществления способа короткоцикловой адсорбции. Способ короткоцикловой адсорбции может включать пропускание потоков через модули со слоями адсорбента с целью удаления из потока загрязняющих примесей, таких как вода. Как часть способа, модуль со слоями адсорбента продувают продувочным потоком, который подают при температуре менее 450°F (232,2°C). Поток, из которого удалены загрязняющие примеси, может быть использован на установке по производству СПГ или в других последующих процессах, в которых требуется поток, из которого удалены загрязняющие примеси. Способ короткоцикловой адсорбции может включать комбинацию способов TSA и PSA, используемую для удаления загрязняющих примесей из исходного потока.

034078 B1

034078 B1

Перекрестная ссылка на родственные заявки

Настоящая заявка испрашивает приоритет

Предварительной заявки США № 62/213262, поданной 2 сентября 2015 г., озаглавленной "Устройство и система для осуществления способов короткоцикловой адсорбции", во всей полноте включаемой в настоящий документ путем ссылки.

Кроме того, отмечается, что данная заявка родственна Предварительной заявке США № 62/213267, поданной 2 сентября 2015 г., озаглавленной "Устройство и система для осуществления способов короткоцикловой адсорбции", Предварительной заявке США № 62/213270, поданной 2 сентября 2015 г., озаглавленной "Устройство и система для осуществления способов комбинированной короткоцикловой адсорбции со сдвигом температуры и давления" и Предварительной заявке США № 62/213273, поданной 2 сентября 2015 г., озаглавленной "Устройство и система для осуществления способов короткоцикловой адсорбции".

Область техники

Настоящие технологии относятся к системе, связанной с осуществлением усовершенствованного способа короткоцикловой адсорбции. В частности, система относится к осуществлению способа короткоцикловой адсорбции, предназначенному для удаления загрязняющих примесей из исходного потока, например, обезвоживания природного газа, с использованием быстро чередующихся слоев адсорбента. Эта система может быть использована для обезвоживания исходного потока с целью соответствия техническим требованиям, предъявляемым к сжиженному природному газу (СПГ), для установок по производству СПГ и/или техническим требованиям для других установок.

Уровень техники

Разделение газов применяется во многих отраслях промышленности и, как правило, может быть выполнено путем пропускания смеси газов над адсорбентом, который предпочтительно адсорбирует один или несколько компонентов газа и не адсорбирует один или несколько других компонентов газа. Не адсорбированные компоненты отводят как отделенный продукт.

Одним конкретным типом технологии разделения газов является короткоцикловая адсорбция, например, помимо прочего, адсорбция со сдвигом температуры (temperature swing adsorption -TSA), адсорбция со сдвигом давления (pressure swing adsorption -PSA), адсорбция с частичным сдвигом давления (partial pressure swing adsorption - PPSA), короткоцикловая адсорбция со сдвигом давления (rapid cycle pressure swing adsorption - RCPSA), короткоцикловая адсорбция с частичным сдвигом давления (rapid cycle partial pressure swing adsorption - RCPPSA), а также сочетания вышеупомянутых процессов, например, адсорбция со сдвигом давления и температуры. Например, способ PSA основан на том, что газы легче адсорбируются в поровой структуре или в свободном объеме адсорбента, когда газы находятся под давлением. То есть, чем выше давление газа, тем больше количество легко адсорбируемого газа адсорбируется. Когда давление уменьшают, адсорбированный компонент высвобождается, или десорбируется, из адсорбента.

Способы короткоцикловой адсорбции (например, PSA и/или TSA) могут использоваться для отделения газов от газовой смеси благодаря тому, что газы имеют тенденцию к заполнению микропор адсорбента в разной степени. Например, если газовую смесь, такую как природный газ, пропускают под давлением через резервуар с адсорбентом, который более селективен в отношении диоксида углерода, чем в отношении метана, по меньшей мере, часть диоксида углерода селективно адсорбируется адсорбентом, поэтому газ, выходящий из резервуара, обогащен метаном. Когда адсорбент исчерпывает возможность адсорбировать диоксид углерода, его регенерируют путем уменьшения давления, тем самым, высвобождая адсорбированный диоксид углерода. Затем адсорбент, обычно, продувают, и восстанавливают давление. После этого адсорбент готов для следующего цикла адсорбции.

Способы короткоцикловой адсорбции, обычно, включают использование модулей со слоями адсорбента, представляющих собой слои адсорбента, расположенные в корпусе, способном удерживать текучие среды с разным давлением на различных стадиях цикла адсорбции внутри модуля. В таких модулях со слоями адсорбента в структуре слоя используется различный насадочный материал, Например, в модулях со слоями адсорбента используется насадочный кирпич, слой галечника или другая имеющаяся в распоряжении насадка. В качестве усовершенствования, в некоторых модулях со слоями адсорбента в структуре слоя может использоваться специализированная насадка. Специализированная насадка может включать материал со специальной конфигурацией, такой как сотовая структура, керамические формы и т.п.

Кроме этого, различные модули со слоями адсорбента могут быть соединены друг с другом трубопроводами и клапанами с целью управления потоками текучих сред. Организация этих модулей со слоями адсорбента включает координацию циклов для каждого из модулей со слоями адсорбента с остальными модулями со слоями адсорбента в системе. Полный цикл может длиться от нескольких секунд до нескольких минут и включать в себя перемещение множества газообразных потоков через один или несколько модулей со слоями адсорбента.

К сожалению, обычные способы обезвоживания потоков природного газа обычно осуществляют с использованием больших слоев молекулярноситового адсорбента, при этом, цикл адсорбции со сдвигом

температуры длится часами. Для осуществления обычных способов требуются большие и дорогие слои адсорбента, выдерживающие высокое давление, большой запас адсорбента, большая площадь для размещения тяжелого оборудования, капиталовложения и топливо для газовых печей. Действительно, в этих способах фронт адсорбции перемещается по большей части длины слоя адсорбента, а десорбцию осуществляют с использованием сухого газа, нагретого более, чем до 500°F (Фарентейта) (260°C (Цельсия)), нагреваемого при помощи пламенной печи. В обычных способах TSA с использованием молекулярных сит для полного обезвоживания слоев адсорбента в течение каждого цикла применяют высокотемпературный продувочный газ (например, около или даже более 500°F (260°C)). Высокотемпературный продувочный газ применяют в обычных способах TSA с использованием молекулярных сит для минимизации объема требующегося для регенерации газа. Этот способ приемлем исходя из экономических соображений, так как операции с большими объемами регенерирующего газа (например, рециркуляционное сжатие или какой-либо другой способ) более дороги, чем просто нагревание регенерационного газа до более высокой температуры. Так, температура регенерационного газа ограничена, примерно, 500°F (260°C) градусами, чтобы не допустить разрушения молекулярного сита. Хотя, даже при ограничении температуры регенерирующего газа величиной 500°F (260°C), высокотемпературный продувочный газ оказывает негативное влияние, такое как гидротермическое разрушение частиц адсорбента и образование кокса в слое адсорбента, которое ведет к деактивации и соответствующей потере времени. Кроме этого, использование пламенной печи в присутствии на установке природного газа является фактором риска, что влечет за собой дополнительные меры безопасности.

Кроме того, для операций на плавучей буровой размер и вес оборудования обычных способов TSA с использованием молекулярных сит проблематичен из соображений устойчивости и плавучести. В частности, избыточный вес и площадь, занимаемая обычными системами, усложняют буровой плавкомплекс и увеличивают его размер. Кроме того, плавкомплекс может быть удаленным и труднодоступным для пополнения запасов оборудования и топлива. Кроме того, дополнительный размер и сложность сопряжены с увеличением капиталовложений, а также затрат на эксплуатацию плавкомплекса. Кроме того, как указано выше, использование пламенной печи дополнительно затрудняется из-за ограниченности имеющегося пространства.

Таким образом, в промышленности остается потребность в устройствах, способах и системах, обеспечивающих усовершенствование обработки потоков с целью удаления загрязняющих примесей, такой как обработка потоков природного газа перед сжижением с получением сырьевого потока СПГ.

Благодаря настоящим технологиям обеспечивается уменьшение стоимости, размера и веса установок обезвоживания природного газа перед сжижением. Кроме того, остается потребность в способе обезвоживания, в котором не используются продувочные газы, нагретые до более, чем 500°F (260°C), и не используются пламенные нагреватели.

Сущность изобретения

В одном или нескольких вариантах своего осуществления настоящая технология включает способ удаления загрязняющих примесей из газообразного исходного потока. Этот способ включает: a) осуществление одной или нескольких стадий адсорбции; при этом, каждая из одной или нескольких стадий адсорбции включает пропускание газообразного исходного потока при давлении подачи и температуре подачи через модуль со слоями адсорбента для отделения одной или нескольких загрязняющих примесей от газообразного исходного потока с получением потока продукта; b) осуществление одной или нескольких стадий снижения давления; при этом, давление в модуле со слоями адсорбента уменьшают на заданную величину на каждой последовательной стадии снижения давления; c) осуществление одной или нескольких стадий продувки, при этом, каждая из одной или нескольких стадий продувки включает пропускание продувочного потока в модуль со слоями адсорбента, при этом, продувочный поток перемещается противоточно относительно направления движения исходного потока, продувочный поток подают при температуре, по меньшей мере, на 50°F (27,8°C) превышающей температуру подачи (или, по меньшей мере, на 100°F (55,6°C) превышающей температуру подачи), и меньшей 450°F (232,2°C), расход продувочного потока меньше или равен 20 молярным процентам (% мол.) расхода исходного потока (например, продувочный поток может содержать 20% мол. или меньше углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока или, предпочтительно, 10% мол. или меньше углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока); d) осуществление одной или нескольких стадий восстановления давления, при этом, давление в модуле со слоями адсорбента увеличивают на каждой стадии восстановления давления на заданную величину для каждой последовательной стадии восстановления давления; и e) повторение стадий a) - d), по меньшей мере, в одном дополнительном цикле, при этом, длительность цикла составляет период времени, больший, чем 1 с и меньший, чем 600 с, предпочтительно, период времени, больший, чем 2 с и меньший, чем 300 с, или, предпочтительно, период времени, больший, чем 1 секунда и меньший, чем 90 с. Продувочный поток может быть подан при температуре в диапазоне от 200°F (93,3°C) до 450°F (232,2°C) или в диапазоне от 250°F (121,1°C) до 380°F (193,3°C).

В другом варианте осуществления изобретения описывается система, предназначенная для удаления загрязняющих примесей из исходного газообразного потока. Эта система включает: модуль со слоями адсорбента, установку по производству сжиженного природного газа и один или несколько проду-

вочных модулей. Модуль со слоями адсорбента предназначен для отделения загрязняющих примесей от газообразного исходного потока и получения потока продукта, при этом, газообразный исходный поток поступает при температуре подачи. Установка по производству сжиженного природного газа предназначена для приема потока продукта и разделения потока продукта на поток конечного продукта и поток горючего материала. Один или несколько продувочных модулей предназначены для обеспечения продувочного потока для модуля со слоями адсорбента, при этом, продувочный поток образуется из одного из следующих: части потока продукта, потока горючего материала, потока отпарного газа и любого их сочетания; и при этом, продувочный поток подают при температуре, по меньшей мере, на 50°F (27,8°C) превышающей температуру подачи, и меньшей 450°F (232,2°C), и продувочный поток содержит 20% мол. или меньше углеводородов относительно исходного потока. Продувочный поток может быть пропущен через модуль со слоями адсорбента при температуре, по меньшей мере, на 100°F (55,6°C) превышающей температуру подачи, и продувочный поток может содержать 20% мол. или меньше метана относительно исходного потока или, предпочтительно, 10% мол. или меньше метана относительно исходного потока. Один или несколько продувочных модулей могут включать один или несколько компрессоров, предназначенных для сжатия одного из потоков: потока горючего материала, потока отпарного газа или любого их сочетания.

Краткое описание чертежей

Изложенные выше и другие преимущества настоящего изобретения могут стать очевидны по рассмотрении нижеследующего подробного описания и чертежей не имеющих ограничительного характера примеров осуществления изобретения.

Фиг. 1 представляет собой трехмерное изображение системы короткоцикловой адсорбции с шестью модулями со слоями адсорбента и соединительными трубопроводами в соответствии с одним из вариантов осуществления настоящих технологий.

Фиг. 2 представляет собой схему части модуля со слоями адсорбента и соответствующих клапанных узлов и разветвленных трубопроводов в соответствии с одним из вариантов осуществления настоящих технологий.

Фиг. 3 представляет собой схему обычной системы обезвоживания исходного потока с целью получения потока сжиженного природного газа (СПГ).

Фиг. 4 представляет собой примерную схему обезвоживания исходного потока с целью получения потока сжиженного природного газа (СПГ) в соответствии с одним из вариантов осуществления настоящих технологий.

Фиг. 5A, 5B и 5C представляют собой примерные диаграммы, связанные с конфигурацией, показанной на фиг. 4, в соответствии с одним из вариантов осуществления настоящих технологий.

Фиг. 6A, 6B и 6C представляют собой примерные диаграммы, связанные с конфигурацией, показанной на фиг. 4, в соответствии с одним из вариантов осуществления настоящих технологий.

Подробное описание изобретения

Если не указано иное, все технические и научные термины в настоящем документе имеют обычное значение, понятное специалистам в области, к которой принадлежит настоящее изобретение. Показатели единственного числа включают множественное число обозначаемых элементов, если контекст явно не указывает на иное. Точно так же, слово "или" подразумевает включение значение "и", если контекст явно не указывает на иное. Термин "включает" означает "содержит". Все патенты и публикации, упоминаемые в документе, включаются в него во всей полноте путем ссылки, если иное не указано иначе. В случае противоречия значений термина или фразы, настоящее описание, включая пояснение терминов, преобладает. Термины, обозначающие направление, такие как "верхний", "нижний", "верх", "низ", "передний", "задний", "вертикальный" и "горизонтальный", использованы для описания и пояснения взаимоотношений между различными элементами. Следует понимать, что такие термины не означают абсолютной ориентации (например, "вертикальный" компонент может стать горизонтальным при повороте устройства). Материалы, способы и примеры, приведенные в настоящем документе, имеют иллюстративный, а не ограничительный характер.

В настоящем контексте "поток" относится к текучей среде (например, твердой, жидкой и/или газообразной), проводимой через различное оборудование. Оборудование может включать трубопроводы, резервуары, разветвленные трубопроводы, модули или другие надлежащие устройства.

В настоящем контексте объемные проценты даны при стандартных условиях. Стандартные условия нормализованы по температуре 0°C (например, 32°F) и абсолютному давлению 100 килопаскалей (кПа) (бар).

В настоящем контексте "трубопровод" означает трубчатый элемент, образующий канал, по которому что-либо передается. Трубопровод может включать один или несколько элементов из следующих: труба, разветвленный трубопровод, трубка и т.д.

Настоящие технологии относятся к способу короткоцикловой адсорбции, предназначенному для обезвоживания исходного потока (например, природного газа) с использованием быстро чередующихся слоев адсорбента. Способ может включать использование слоев адсорбента с частично сниженным давлением и нагретых противотоком умеренно горячего сухого газообразного продукта для достижения

термически поддерживаемой десорбции продувкой при частичном давлении (например, продувочным потоком). В отличие от обычных подходов, в настоящих технологиях используются низкотемпературные продувочные потоки, которые не могут полностью обезводить слой адсорбента. В результате, температура продувочного потока может быть создана иными средствами, нежели газовые печи, например, только путем сжатия. Благодаря более низкой температуре продувочного потока достигается экономическая выгода, повышается безопасность, а также оптимизируется функционирование. Например, благодаря более низкой температуре может уменьшиться гидротермическое разрушение адсорбента и образование кокса. Кроме этого, настоящие технологии могут быть дешевле, чем обычные системы TSA с использованием молекулярных сит, требовать меньшей площади благодаря использованию слоев адсорбента, а не обычного TSA обезвоживания с использованием молекулярных сит.

Одним из усовершенствований в соответствии с настоящими технологиями является использование продувочного потока с меньшей температурой (например, менее 450°F (232,2°C)), чем в соответствии с обычными подходами. Температура продувочного потока может быть менее 450°F (232,2°C), предпочтительно, менее 360°F (182,2°C). Например, температура продувочного потока может лежать в диапазоне от температуры, приблизительно на 50°F (27,8°C) выше температуры подачи до 450°F (232,2°C), может лежать в диапазоне от температуры, приблизительно на 100°F (55,6°C) выше температуры подачи до 450°F (232,2°C), может лежать в диапазоне от 200°F (93,3°C) до 450°F (232,2°C), может лежать в диапазоне от 250°F (121,1°C) до 380°F (193,3°C) и/или может лежать в диапазоне от 280°F (137,8°C) до 360°F (182,2°C). Продувочный поток также может представлять собой сухой продувочный газ, используемый для нагревания слоя адсорбента во время десорбции. Благодаря более низкой температуре может уменьшиться гидротермическое разрушение адсорбента и образование кокса. Кроме этого, Низкотемпературный продувочный поток может быть получен при помощи сжатия, которое может быть единственным источником тепла для продувочного газа. В некоторых вариантах осуществления изобретения низкотемпературный продувочный газ может быть нагрет только путем сжатия, таким образом, исключается использование пламенного нагревания и, следовательно, уменьшаются капиталовложения и повышается безопасность.

Кроме того, настоящими технологиями могут предусматриваться различные давления для исходного потока и продувочного потока. Например, давление подачи исходного потока может определяться предпочтительным давлением для подаваемого на адсорбцию потока, которое может лежать в диапазоне от 400 фунтов на квадратный дюйм абс. (psia) (2,76 МПа) до 1400 psia (9,65 МПа), в диапазоне от 600 psia (4,13 МПа) до 1200 psia (8,27 МПа). Кроме того, давление продувки продувочного потока может определяться предпочтительным давлением продувки адсорбента, которое может лежать в диапазоне от 200 psia (1,38 МПа) до 800 psia (5,51 МПа), в диапазоне от 400 psia (2,76 МПа) до 600 psia (4,13 МПа).

Кроме того, другим усовершенствованием является то, что продувочный поток содержит часть исходного потока. Например, расход продувочного потока может быть меньше или равен 20 мол.% расхода исходного потока; расход продувочного потока может быть меньше или равен 15 мол.% расхода исходного потока; расход продувочного потока может быть меньше или равен 10 мол.% расхода исходного потока. Кроме того, расход продувочного потока может быть больше или равен 1 мол.% расхода исходного потока; расход продувочного потока может быть больше или равен 3 мол.% расхода исходного потока; или расход продувочного потока может быть больше или равен 5 мол.% расхода исходного потока. В качестве другого примера, продувочный поток может содержать 20 мол.% или менее углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока; или, предпочтительно, 10 мол.% или менее углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока. Кроме этого, продувочный поток может содержать 1 мол.% или более углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока; предпочтительно, 3 мол.% или более углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока или, предпочтительно, 5 мол.% или более углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока. В качестве конкретного примера, продувочный поток, который включает часть метана из исходного потока, может содержать 20 мол.% или менее метана относительно исходного потока, 15 мол.% или менее метана относительно исходного потока, 10 мол.% или менее метана относительно исходного потока или 7 мол.% или менее метана относительно исходного потока.

Кроме этого, продувочный поток может содержать часть исходного потока. Например, часть метана в продувочном потоке может быть больше или равна 1 мол.% метана в исходном потоке; или, предпочтительно, больше или равна 3 мол.% метана в исходном потоке; или, предпочтительно, больше или равна 5 мол.% метана в исходном потоке. Кроме того, часть углеводородов в продувочном потоке может быть больше или равна 1 мол.% углеводородов в исходном потоке; или, предпочтительно, больше или равна 3 мол.% углеводородов в исходном потоке; или, предпочтительно, больше или равна 5 мол.% углеводородов в исходном потоке. В качестве еще одного примера, расход продувочного потока может быть больше или равен 1 мол.% расхода исходного потока; расход продувочного потока может быть больше или равен 3 мол.% расхода исходного потока; или расход продувочного потока может быть больше или равен 5 мол.% расхода исходного потока.

В качестве другого усовершенствования, настоящие технологии обеспечивают обезвоживание посредством способа короткоцикловой адсорбции, такой как способ TSA. Хотя в коротком цикле адсорби-

рующая способность на единицу массы слоя адсорбента может быть меньше, чем при обычном обезвоживании способом TSA с использованием молекулярных сит, без необходимости полной сушки слоя адсорбента (например, непосредственно увеличивая количество адсорбента на единицу объема обрабатываемого потока), использование коротких циклов позволяет уменьшить количество адсорбента по сравнению с обычным обезвоживанием способом TSA с использованием молекулярных сит, причем, необходимое количество адсорбента в 10-100 раз меньше, чем при обычном обезвоживании способом TSA с использованием молекулярных сит, что зависит от конкретной конфигурации. Кроме того, более низкая температура, до которой нагревают слой адсорбента, может быть использована без необходимости полной сушки слоя адсорбента. Следовательно, более низкая температура продувочного потока на стадии продувки настоящих технологий может быть получена только путем сжатия, поэтому уменьшается количество или исключаются дорогостоящие теплообменники или пламенные нагреватели. Кроме того, настоящие технологии позволяют сочетать адсорбцию со сдвигом температуры и адсорбцию со сдвигом давления и, тем самым, дополнительно усовершенствовать данный способ.

В соответствии с настоящими технологиями, продуктовый конец слоя адсорбента поддерживают почти сухим (например, заполнение водой области вблизи продуктового конца меньше 1 моля на килограмм (моль/кг), меньше 0,5 моль/кг или меньше 0,1 моль/кг), но конец подачи слоя адсорбента не обязательно должен быть совершенно сухим. Конец подачи или сторона подачи - это тот конец слоя адсорбента, на который первоначально поступает исходный поток, тогда как продуктовый конец - это часть слоя адсорбента, противоположная концу подачи, с которой исходный поток отводят со слоя адсорбента. Влажность на стадии продувки может быть ниже на стороне подачи слоя адсорбента, но длина слоя адсорбента, на которой присутствует вода, в ходе стадии продувки уменьшается. Например, наполненная адсорбатом область может представлять собой определенную часть слоя адсорбента от конца подачи слоя адсорбента до 10% длины слоя, от конца подачи слоя адсорбента до 40% длины слоя или от конца подачи слоя адсорбента до 75% длины слоя. Продуктовая область может представлять собой определенную часть слоя адсорбента от продуктового конца слоя адсорбента до 10% длины слоя, от продуктового конца слоя адсорбента до 25% длины слоя или от продуктового конца слоя адсорбента до 40% длины слоя. Благодаря использованию только части длины слоя гарантируется, что продуктовый конец слоя адсорбента остается неукоснительно сухим, и обеспечивается чрезвычайно низкая концентрация воды в продукте. Кроме того, благодаря сохранению значительной части продуктового конца слоя адсорбента сухим, обеспечивается гибкость для компенсации неоднородности газовых каналов в тех вариантах осуществления изобретения, где в конструкции адсорбера или слое адсорбента используется структурированный адсорбент, такой как монолит. Перемещение влажного фронта назад на стадии продувки и вперед на стадии адсорбции является основой адсорбирующей способности данного способа. Отчасти, это достигается путем использования ограниченного, рентабельного количества продувочного газа в продувочном потоке в соответствии с данным способом и конфигурацией.

Кроме того, настоящие технологии могут быть интегрированы в различные конфигурации, обеспечивая дополнительные функциональные возможности. Например, настоящие технологии могут быть использованы, помимо прочего, для обезвоживания потока до установки по производству сжиженного природного газа и интегрированы в нее, что может включать удаление загрязняющих примесей в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к СПГ. Другими вариантами интеграции могут быть регенерационная установка криогенного сжижения природного газа, установки с контролируемыми зонами замораживания или другие подобные установки. Независимо от этого, настоящие технологии могут быть использованы для обработки газов, содержащих большие или меньшие количества воды и большое количество CO_2, примерно, 500 частей на миллион мол. (ppm), в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к СПГ. Настоящие технологии также могут быть использованы для удаления загрязняющих примесей в соответствии с другими техническими требованиями, такими как требования по криогенному сжижению газа для регенерационной установки криогенного сжижения природного газа и т.п. Способ частичного нагревания слоя адсорбента с использованием тепловых волн на стадии продувки, совмещенный с короткоцикловой адсорбцией, обеспечивает усовершенствование, такое как экономическая оптимизация, других способов разделения адсорбцией со сдвигом температуры, известных специалистам в данной области.

Существенно, что настоящие технологии обеспечивают различные преимущества. Например, настоящие технологии обеспечивают модульную конструкцию и возможность проектирования с уменьшением занимаемой площади, веса и капитальных затрат на оборудование, предназначенное для обезвоживания исходных потоков (например, природного газа) с использованием быстро чередующихся слоев адсорбента. Настоящие технологии могут быть использованы на установках по производству сжиженного природного газа и иных надлежащих установках. Кроме того, поскольку в этих способах не используются какие-либо пламенные печи, настоящие технологии позволяют исключить использование пламенных печей или высокотемпературных теплообменников. Отсутствие такого оборудования по своей природе безопаснее, так как исключается наличие пламени наряду с другим соответствующим оборудованием, снижается потребление топлива и выбросы парниковых газов благодаря отсутствию горения в печи. Кроме того, настоящие технологии способствуют увеличению гибкости в отношении выбора мате-

риала адсорбента, используемого в процессе, снижению образования пыли благодаря монолитной конструкции слоя адсорбента, уменьшению образования твердых отходов благодаря меньшему количеству адсорбента и/или уменьшению адсорбции тяжелых углеводородов (например, C_{2+}) благодаря малому количеству адсорбента. Настоящие технологии также способствуют уменьшению влияния на технологическое оборудование далее по потоку при переключении слоев адсорбента благодаря модульной конфигурации оборудования короткоцикловой TSA, обеспечивающей возможность замены или автономной регенерации некоторых слоев адсорбента, в то время как остальные модули со слоями адсорбента продолжают обеспечивать сухой продукт, подаваемый в расположенное далее по потоку оборудование (например, установку по производству СПГ или установку криогенного разделения).

В одном или нескольких вариантах своего осуществления система короткоцикловой адсорбции может включать один или несколько продувочных модулей, соединенных жидкостной связью с установкой по производству сжиженного природного газа.

Продувочные модули могут предназначаться для обеспечения продувочного потока для каждого из модулей со слоями адсорбента, при этом, продувочный поток обеспечивается как один из следующих: часть потока продукта, потока горючего материала, потока отпарного газа и любое их сочетание. Например, продувочные модули могут представлять собой или включать один или несколько компрессоров, предназначенных для сжатия одного из потоков: потока горючего материала, потока отпарного газа или любого их сочетания. Кроме того, продувочные модули могут представлять собой или включать одно или несколько устройств снижения давления (например, расширители или клапаны), предназначенных для снижения давления части потока продукта. Часть потока продукта может поступать из любого из модулей со слоями адсорбента системы короткоцикловой адсорбции.

Кроме того, в одном или нескольких вариантах своего осуществления настоящие технологии могут использоваться в любом типе способов короткоцикловой адсорбции. Не имеющие ограничительного характера примеры способов короткоцикловой адсорбции, в которых могут быть использованы настоящие технологии, включают адсорбцию со сдвигом давления (pressure swing adsorption - PSA), адсорбцию со сдвигом разрежения (vacuum pressure swing adsorption - VPSA), адсорбцию со сдвигом температуры (temperature swing adsorption - TSA), адсорбцию с частичным сдвигом давления (partial pressure swing adsorption -PPSA), короткоцикловую адсорбцию со сдвигом давления (rapid cycle pressure swing adsorption - RCPSA), короткоцикловую адсорбцию со сдвигом температуры (rapid cycle thermal swing adsorption - RCTSA), короткоцикловую адсорбцию с частичным сдвигом давления (rapid cycle partial pressure swing adsorption - RCPPSA), а также сочетания этих процессов, например, адсорбция со сдвигом давления и температуры. Примеры динамической короткоцикловой адсорбции описаны в патентных публикациях США №№ 2008/0282892, 2008/0282887, 2008/0282886, 2008/0282885, 2008/0282884 и 2014/0013955, которые во всей полноте включаются в настоящий документ путем ссылки.

Способы, устройства и системы адсорбционного разделения, такие как описанные выше, пригодны для выделения и производства углеводородов, например, в газо- и нефтепереработке. В частности, обеспечиваемые изобретением способы, устройства и системы пригодны для быстрого, крупномасштабного и эффективного отделения различных целевых газов от газовых смесей. В частности, эти способы, устройства и системы могут быть использованы для подготовки исходных продуктов (например, природного газа) путем удаления загрязняющих примесей (например, CO_2, H_2O и тяжелых углеводородов (т.е., углеводородов, включающих, по меньшей мере, два атома углерода)). Обеспечиваемые изобретением способы, устройства и системы пригодны для быстрой подготовки газообразных исходных потоков для различных предприятий, включая разделяющие. Варианты разделения могут включать контроль точки росы; обессеривание и/или детоксификацию; предупреждение коррозии; обезвоживание; повышение теплотворной способности; приведение к требуемым техническим условиям и/или очистку. Примерами предприятий, на которых используется один или несколько вариантов разделения, являются предприятия по производству топливного газа; уплотнительного газа; непитьевой воды; пластового газа; газа системы контроля и управления; хладагента; инертного газа и/или извлечению сжиженных нефтепродуктов.

В некоторых вариантах своего осуществления настоящие технологии могут быть использованы для удаления загрязняющих примесей из исходных потоков, например, кислого газа из потоков углеводородов. Технология удаления кислого газа может быть применена к запасам газа с высоким содержанием кислого газа (например, запасам высокосернистого попутного газа). Количество кислого газа в углеводородных исходных потоках изменяется в широких пределах, например, от нескольких частей на миллион кислого газа до 90 объемных процентов (% об.) кислого газа. Не имеющие ограничительного характера примеры концентраций кислого газа в примерных источниках газа включают концентрации, по меньшей мере: (a) 1 об.% H_2S, 5 об.% CO_2, (b) 1 об.% H_2S, 15 об.% CO_2, (c) 1 об.% H_2S, 60 об.% CO_2, (d) 15 об.% H_2S, 15 об.% CO_2 и (e) 15 об.% H_2S, 30 об.% CO_2. Следовательно, настоящие технологии могут включать использование оборудования для удаления различных загрязняющих примесей, таких как H_2S и CO_2, до заданного уровня. В частности, концентрация H_2S может быть уменьшена до менее, чем 4 ppm, тогда как концентрация CO_2 может быть уменьшена до менее, чем 100 ppm, или менее, чем 50 ppm.

В других вариантах своего осуществления настоящие технологии могут быть использованы для уменьшения содержания воды в потоке до заданного уровня способом короткоцикловой адсорбции. На-

пример, содержание воды в исходном потоке может лежать в диапазоне от нескольких ppm до полного насыщения потока. В частности, содержание воды может лежать в диапазоне от нескольких сотен ppm до полного насыщения, например, от 100 ppm до 1500 ppm в зависимости от давления подачи или от 500 ppm до 1500 ppm в зависимости от давления подачи. Конкретное значение содержания воды в потоке продукта способа короткоцикловой адсорбции может зависеть от точки росы заданного продукта (например, точка росы по воде должна быть меньше наименьшей температуры потока в последующем процессе, таком как сжижение, и зависит от давления подачи и состава сырья). Для получение СПГ содержание воды должно быть меньше 0,1 ppm, так как точка росы может составлять -260°F (-162,2°C). При извлечении газоконденсатных жидкостей (natural gas liquids - NGL) содержание воды может быть менее 1 ppm, так как точка росы может составлять, примерно, -150°F (-101,1°C). Применительно к способам с контролируемыми зонами замораживания (controlled freeze zone -CFZ), содержание воды может быть менее 10 ppm, так как точка росы может составлять, примерно, -60°F (51,1°C). Содержание воды в потоке продукта может быть менее (<) 1,0 объемных частей на миллион (ppmv); <10 ppmv, <1 ppmv, <0,l ppmv. Например, газообразный исходный поток может содержать углеводороды и H_2O, при этом, содержание H_2O в газообразном исходном потоке лежит в диапазоне от 0,2 объемных частей на миллион до состояния насыщения, или концентрация H_2O может лежать в диапазоне от 100 ppmv до 1500 ppmv.

В некоторых вариантах осуществления изобретения газообразный исходный поток, поступающий в процесс короткоцикловой адсорбции или в один из модулей со слоями адсорбента, может быть приведен к требуемым техническим условиям, чтобы предотвратить проблемы, связанные с падением давления при прохождении через тарельчатые клапаны. Падение давление на тарельчатых клапанах может приводить к выпадению жидкости в слое адсорбента. Чтобы исключить выпадение жидкости, газообразный поток может быть нагрет, что уменьшает или исключает выпадение жидкости. Например, газообразный исходный поток может быть пропущен через нагреватель или теплообменник с целью увеличения температуры газообразного исходного потока, по меньшей мере, на 2°F (1,1°C) по меньшей мере, на 5°F (2,8°C) или, по меньшей мере, на 20°F (11,1°C).

Кроме этого, в одном или нескольких вариантах своего осуществления настоящие технологии могут включать особую последовательность технологических операций для удаления загрязняющих примесей, таких как вода. Например, способ может включать стадию адсорбции и стадию регенерации, которые образуют цикл. Стадия адсорбции может включать пропускание газообразного исходного потока с давлением подачи и температурой подачи через модуль со слоями адсорбента с целью отделения одной или нескольких загрязняющих примесей от газообразного исходного потока с получением потока продукта. Исходный поток может быть пропущен через слой адсорбента в прямом направлении (например, от конца подачи слоя адсорбента к продуктовому концу слоя адсорбента). Затем, пропускание газообразного исходного потока может быть прервано для проведения стадии регенерации. Стадия регенерации может включать одну или несколько стадий снижения давления, стадию продувки и одну или несколько стадий восстановления давления. Стадии снижения давления могут включать снижение давления в модуле со слоями адсорбента на заданную величину для каждой из последовательных стадий снижения давления, могут быть одной стадией и/или множеством стадий и могут представлять собой одну или несколько стадий сброса давления. Стадия снижения давления может осуществляться в прямом направлении или, предпочтительно, может осуществляться в противоточном направлении (например, от продуктового конца слоя адсорбента к концу подачи слоя адсорбента). Стадия продувки может включать пропускание продувочного потока через модуль со слоями адсорбента и может представлять собой однократную стадию продувки, продувочный поток может быть направлен противоточно относительно исходного потока.

Продувочный поток может характеризоваться температурными диапазонами, расходами и составом, указанными выше. Например, продувочный поток, который может содержать часть метана исходного потока, может содержать 20 мол.% или меньше метана относительно исходного потока; или 10 мол.% или меньше метана относительно исходного потока. Кроме того, расход продувочного потока может быть меньше или равен 20 мол.% расхода исходного потока; расход продувочного потока меньше или равен 15 мол.% расхода исходного потока; или расход продувочного потока меньше или равен 10 мол.% расхода исходного потока. Кроме этого, расход продувочного потока может быть больше или равен 1 мол.% расхода исходного потока; расход продувочного потока может быть больше или равен 3 мол.% расхода исходного потока; или расход продувочного потока может быть больше или равен 5 мол.% расхода исходного потока. В качестве другого примера, продувочный поток может содержать 20 мол.% или менее углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока; или, предпочтительно, 10 мол.% или менее углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока. Кроме этого, продувочный поток может содержать 1 мол.% или более углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока; предпочтительно, 3 мол.% или более углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока или, предпочтительно, 5 мол.% или более углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока. В качестве конкретного примера, продувочный поток, который включает часть метана из исходного потока, может содержать 20 мол.% или менее метана относительно исходного потока, 15 мол.% или менее метана относительно исходного потока, 10 мол.% или менее метана относительно исходного пото-

ка или 7 мол.% или менее метана относительно исходного потока. Часть метана в продувочном потоке может быть больше или равна 1 мол.% метана в исходном потоке: или, предпочтительно, больше или равна 5 мол.% метана в исходном потоке.

Отходящий поток стадии продувки может быть отведен в качестве топлива в другое оборудование, такое как установка по производству СПГ. Затем может быть выполнена одна или несколько стадий восстановления давления, при этом, давление в модуле со слоями адсорбента увеличивают на каждой стадии восстановления давления на заданную величину для каждой последовательной стадии восстановления давления. Затем цикл может быть повторен в отношении дополнительных потоков. Длительность цикла может составлять период времени, больший чем 1 с, и меньший чем 600 с, больший чем 2 с, и меньший чем 300 с, больший чем 1 с или 2 с, и меньший чем 90 с, больший чем 2 с, и меньший чем 60 с. Настоящие технологии могут быть лучше поняты благодаря ссылкам на фиг. 1-6С далее.

Фиг. 1 представляет собой трехмерное изображение системы 100 короткоцикловой адсорбции с шестью модулями со слоями адсорбента и соединительными трубопроводами. Хотя эта конфигурация является конкретными примером, настоящие технологии в широком смысле относятся к модулям со слоями адсорбента, которые могут быть размещены симметрично, несимметрично и/или в сочетании со множеством арматурных элементов. Кроме этого, эта конкретная конфигурация является примером, ибо другие конфигурации могут содержать отличное число модулей со слоями адсорбента.

В данной системе модули со слоями адсорбента, такие как модуль 102 со слоями адсорбента, могут предназначаться для осуществления способа циклической короткоцикловой адсорбции с целью удаления загрязняющих примесей из исходных потоков (например, текучих, газообразных или жидких). Например, модуль 102 со слоями адсорбента может включать различные трубопроводы (например, трубопровод 104) для направления потока текучей среды через слой адсорбента, на слой адсорбента или со слоя адсорбента внутри модуля 102 со слоями адсорбента. Трубопроводы, отходящие от модуля 102 со слоями адсорбента, могут быть соединены с разветвленным трубопроводом (например, трубопроводом 106) для распределения течения потока к компонентам, от компонентов или между компонентами. Слой адсорбента в модуле со слоями адсорбента может обеспечивать отделение одной или нескольких загрязняющих примесей от исходного потока с образованием потока продукта. Понятно, что модули со слоями адсорбента могут включать другие трубопроводы, предназначенные для управления другими потоками текучих сред, участвующих в процессе, такими как продувочные потоки, потоки снижения давления и т.п. Кроме того, модуль со слоями адсорбента также может включать один или несколько уравнительных резервуаров, таких как уравнительный резервуар 108, которые принадлежат данному модулю со слоями адсорбента и могут предназначаться для одной или нескольких стадий способа короткоцикловой адсорбции.

В качестве одного из примеров, который дополнительно описан ниже со ссылкой на фиг. 2, модуль 102 со слоями адсорбента может включать корпус, который может иметь верхнюю часть и другие части корпуса, образующие, по существу, газонепроницаемый отсек, слой адсорбента, расположенный внутри корпуса, и множество клапанов (например, тарельчатых клапанов), обеспечивающих наличие каналов для текучей среды через отверстия в корпусе между внутренним пространством корпуса и участками, внешними по отношению к внутреннему пространству корпуса. Каждый из тарельчатых клапанов может включать дисковый элемент, входящий в головку клапана, или дисковый элемент, входящий в отдельное клапанное седло, вставленное в головку (не показано). Конфигурация тарельчатых клапанов может соответствовать множеству типов конфигураций тарельчатых клапанов. В качестве одного из примеров, модуль со слоями адсорбента может включать один или несколько тарельчатых клапанов, каждый из которых соединен жидкостной связью с отдельным трубопроводом, принадлежащим отдельному потоку. Тарельчатые клапаны могут обеспечивать жидкостную связь между слоем адсорбента и одним из соответствующих трубопроводов, разветвленных трубопроводов или коллекторов. Термин "в непосредственной жидкостной связи" означает прямое сообщение без промежуточных клапанов или других запорных средств, препятствующих потоку. Понятно, что в рамках объема настоящих технологий могут предусматриваться другие варианты.

Слой адсорбента включает твердый адсорбирующий материал, способный адсорбировать один или несколько компонентов из исходного потока. Такие твердые материалы выбирают так, чтобы они выдерживали физические и химические условия в модуле 102 со слоями адсорбента, эти материалы могут включать металлические, керамические иди другие материалы, в зависимости от процесса адсорбции. Дополнительные примеры адсорбирующих материалов приведены ниже.

Фиг. 2 представляет собой схему 200 части модуля со слоями адсорбента и соответствующих клапанных узлов и разветвленных трубопроводов в соответствии с одним из вариантов осуществления настоящих технологий. Часть модуля 200 со слоями адсорбента, которая может являться частью модуля 102 со слоями адсорбента фиг. 1, включает корпус, который может включать цилиндрическую стенку 214 и цилиндрический изоляционный слой 216, а также верхнее днище 218 и нижнее днище 220. Слой 210 адсорбента расположен между верхним днищем 218, нижним днищем 220 и изоляционным слоем 216, при этом образуются верхняя открытая зона и нижняя открытая зона, каковые открытые зоны образованы, по существу, открытым объемом траектории потока. Такой открытый объем траектории потока в

модуле со слоями адсорбента вмещает газ, предназначенный для различных стадий. Корпус может быть рассчитан на давление от 0 бар абс. или 0,1 бар абс. до 100 бар абс. во внутреннем пространстве.

В верхнем днище 218 и нижнем днище 220 имеются отверстия, в которые могут быть вставлены клапаны, такие как клапанные узлы 222-240, соответственно (например, тарельчатые клапаны). Верхний или нижний открытый объем траектории потока между соответствующим днищем 218 или 220 и слоем 210 адсорбента также может включать распределительные линии (не показаны), которые вводят текучие среды непосредственно в слой 210 адсорбента. В верхнем днище 218 имеются различные отверстия (не показаны), обеспечивающие каналы к впускным разветвленным трубопроводам 242 и 244 и выпускным разветвленным трубопроводам 248, 250 и 252, тогда как в нижнем днище 220 имеются различные отверстия (не показаны), обеспечивающие каналы к впускному разветвленному трубопроводу 254 и выпускным разветвленным трубопроводам 256, 258 и 260. Клапанные узлы 222-240 соединены жидкостной связью с соответствующими разветвленными трубопроводами 242-260. Если клапанные узлы 222-240 представляют собой тарельчатые клапаны, каждый из них может включать дисковый элемент, соединенный со штоком, который может располагаться в стакане клапана или направляющей клапана. Шток может быть соединен с каким-либо приводным устройством (не показано), предназначенным для придания прямолинейного движения соответствующему штоку соответствующего клапана. Понятно, что приводное устройство может приводиться в действие независимо на разных стадиях способа с целью активации одного клапана, или одно приводное устройство может быть использовано для управления двумя или несколькими клапанами. Кроме того, хотя отверстия могут быть, по существу, одинакового размера, отверстия и впускные клапаны для впускных разветвленных трубопроводов могут иметь меньший размер, чем для выпускных разветвленных трубопроводов, при условии, что объем газа, проходящего через впуски, обычно бывает меньше, чем объем продукта, проходящего через выпуски.

В способе короткоцикловой адсорбции цикл включает две или более стадий, каждая из которых занимает определенный временной интервал, сумма которых составляет длительность цикла. Эти стадии включают регенерацию слоя адсорбента после стадии адсорбции с использованием множества способов, включая сдвиг давления, сдвиг разрежения, сдвиг температуры, продувку (любым пригодным для данного способа типом продувочной текучей среды) и их сочетания. Например, цикл PSA может включать стадии подачи или адсорбции, снижения давления (например, сброс давления), продувки и восстановления давления. При осуществлении разделения при высоком давлении, снижение давления и восстановление давления (которое можно назвать выравниванием) могут проводиться за несколько стадий, чтобы уменьшить изменение давления на каждой стадии и повысить эффективность. В некоторых способах короткоцикловой адсорбции, таких как способы с быстрым чередованием слоев адсорбента, существенная часть общей длительности цикла приходится на регенерацию слоя адсорбента. Следовательно, любе сокращение времени регенерации приводит к уменьшению общей длительности цикла. Такое сокращение также может способствовать уменьшению общего размера системы короткоцикловой адсорбции.

Как указано выше, обычные системы обезвоживания обычно основаны на способах TSA и PSA с использованием молекулярных сит. Для обычных систем требуется многочасовое функционирование, в течение которого происходит заполнение модуля с молекулярными ситами адсорбируемым веществом (например, водой) и его нагревание с целью десорбции. В результате, модули с молекулярными ситами очень большие (например, занимают большую площадь и заключают в себе больше адсорбента, чем в соответствии с настоящими технологиями). Чтобы минимизировать необходимый объем газа регенерации и максимально увеличить емкость слоя, слои адсорбента модуля с молекулярными ситами полностью высушивают (например, до уровня, меньшего чем заданный уровень активности воды в продукте), для чего используют продувочный газ с температурой около 500°F (260°C). Кроме того, в соответствии с обычными подходами, поддерживают узкую зону массопереноса или резкий фронт адсорбции, чтобы максимально использовать слой, при этом, поддерживая тщательное обезвоживание. Схема обычного способа, интегрированного в установку по производству СПГ, показана на фиг. 3.

В качестве примера, фиг. 3 представляет собой схему обычной системы 300 обезвоживания исходного потока с образованием потока сжиженного природного газа (СПГ). Как показано на схеме 300, для обработки исходного потока, подаваемого по трубопроводу 304, с целью получения выходящего по трубопроводу 316 потока, такого как поток СПГ, используют различное оборудование, такое как модули 302, 306, 308, 310, 312, 314, 318, 320 и 322.

Выполнение способа начинается в модуле 302 удаления загрязнений, в который поступает исходный поток, и в котором от исходного потока отделяется, по меньшей мере, часть ртути, диоксида углерода (CO_2), сероводорода (H_2S). Выходящий из модуля 302 удаления загрязнений поток является исходным потоком, подаваемым по трубопроводу 304 в теплообменник 306. Теплообменник 306 предназначен для регулирования температуры исходного потока, а также может предназначаться для удаления из этого потока части воды. Например, в теплообменнике температура исходного потока может понижаться, что приводит к конденсации, и конденсат выводят из потока. Поток, выходящий из теплообменника 306, подают в фильтр 308. Фильтр 308 предназначен для удаления твердых частиц и капель жидкости из исходного потока с отрегулированной температурой. Затем, поток, выходящий из фильтра 308, подают в модуль 310 с молекулярными ситами. Модуль 310 с молекулярными ситами предназначен для удаления из

потока дополнительного количества загрязняющих примесей, таких как вода. Обезвоженный поток, выходящий из модуля 310 с молекулярными ситами, подают в теплообменник 312, в котором регулируют температуру потока перед его подачей в установку 314 по производству СПГ. Поток, выходящий из установки 314 по производству СПГ, является конечным продуктом, направляемым на продажу, хранение и/или транспортировку.

Дополнительный поток из установки 314 по производству СПГ может представлять собой поток горючего материала, используемый в данном способе. Например, дополнительный поток из установки 314 по производству СПГ представляет собой боковой поток высокочистого метана пониженного давления, который может быть подан в компрессорный модуль 318 топливного газа. Этот дополнительный поток может быть назван потоком горючего материала, сжигаемого газа, топливного газа или остаточного топливного газа. Часть потока сжатого топливного газа из компрессорного модуля 318 топливного газа нагревают в нагревательном модуле 320, который может представлять собой печь или теплообменник, и который предназначен для термического сдвига температуры с целью десорбции модуля 310 с молекулярными ситами. Этот поток выводят из модуля 310 с молекулярными ситами и пропускают через теплообменный модуль 322 с целью охлаждения (например, понижения температуры этого потока) потока, а также из него может быть удалена часть воды. Этот нагретый поток может быть объединен с любым оставшимся потоком, выходящим из компрессорного модуля 318 топливного газа, в трубопроводе 326 и отпарным газом из трубопровода 324, если таковой имеется, с образованием в трубопроводе 328 топливного потока.

Описанная выше конфигурация предусматривает использование топливного газа в качестве продувочного потока для модуля 310 с молекулярными ситами. В качестве альтернативы, обычный подход может включать способ адсорбции со сдвигом температуры и может предусматривать использование сухого газа для регенерации и рециркуляцию влажного газа регенерации из компрессора в исходный газ. Однако, этот подход сопряжен с увеличением эксплуатационных затрат и большим расходом горячего газа регенерации (например, температура газа больше или равна 500°F (260°C).

Например, исходный поток может быть подан с расходом 750 миллионов стандартных кубических футов газа в сутки (million standard cubic feet per day - MSCFD) ($21{,}2\times10^6$ ст·м^3/сут), при температуре около 86°F (30°C) и с давлением 1175 psia (8,1 МПа). Исходный поток может содержать, главным образом, метан наряду с другими более тяжелыми углеводородами и загрязняющими примесями. В частности, метан (C_1) может составлять около 92 об.%, другие углеводороды (C_{2+}) могут составлять около 8 об.%, сероводород, H_2S, может составлять около 4 ppm, диоксид углерода, CO_2, может составлять около 50 ppm, и вода может составлять около 34 фунтов на MSCF (lb/MSCF) ($54{,}4\times10^{-5}$ кг/ст·м^3). Теплообменник 306 может регулировать температуру исходного потока от, примерно, 86°F (30°C) до, примерно, 68°F (20°C), благодаря чему содержание воды может уменьшиться до 19 lb/MSCF ($30{,}4\times10^{-5}$ кг/ст·м^3). Поток, отводимый из модуля 310 с молекулярными ситами, который пропускают через теплообменник 312 и направляют в установку 314 по производству СПГ, может характеризоваться расходом 750 MSCFD, температурой 68°F (20°C) и давлением 1150 psia (7,9 МПа). Этот поток может содержать менее, примерно, 0,1 ppm воды. Поток, выходящий по трубопроводу 316, может составлять 5,2 миллион тонн в год.

Поток горючего материала, подаваемый в компрессорный модуль 318 топливного газа, может поступать с расходом 52 MSCFD ($1{,}5\times10^6$ ст·м^3/сут), что может составлять, примерно, 7% объема потока, подаваемого в установку 314 по производству СПГ. После компрессорного модуля 318 топливного газа дополнительный топливный поток в трубопроводе 326 может составлять 27 MSCFD ($0{,}76\times10^6$ ст·м^3/сут) (например, 4% объема потока, подаваемого в установку 314 по производству СПГ), тогда как поток, проходящий через теплообменник 320 и поступающий в модуль 310 с молекулярными ситами, может составлять 25 MSCFD ($0{,}70\times10^6$ ст·м^3/сут) (например, 3% объема потока, подаваемого в установку 314 по производству СПГ). Поток, поступающий в модуль 310 с молекулярными ситами, может иметь температуру 550°F (287,8°C) и давление 665 psia (4,6 МПа). После модуля 310 с молекулярными ситами поток, подаваемый в теплообменник 322, может иметь расход 25 MSCFD ($0{,}70\times10^6$ ст·м^3/сут) (например, 3% объема потока, подаваемого в установку 314 по производству СПГ) и давление 600 psia (4,1 МПа). Поток отпарного газа в трубопроводе 324 может иметь расход 19 MSCFD ($0{,}53\times10^6$ ст·м^3/сут) (например, 2,5% объема потока, подаваемого в установку 314 по производству СПГ).

Как указано в данном примере, продувочный поток, поступающий из компрессорного модуля 318 топливного газа, подается при повышенной температуре 550°F (287,8°C). Продувочный поток с такой высокой температурой может привести к гидротермическому разрушению частиц адсорбента и образованию кокса в слое адсорбента, которое ведет к деактивации и соответствующей потере времени.

Кроме того, в данной конфигурации продувочный поток содержит часть исходного потока. Например, если исходное количество для модуля 310 с молекулярными ситами составляет 750 MSCFD, продувочный поток представляет собой сжигаемый газ с расходом 25 MSCFD. Поскольку состав всех этих потоков, по существу, одинаков (например, без части, представляющей собой воду), масса исходного потока, используемая в продувочном потоке, может быть оценена как, приблизительно, 3,3% (например, 25MSCFD/750MSCFD) массы сырья, подаваемого на молекулярные сита. В этом расчете концентрации

H_2S, CO_2 и H_2O не учитываются.

В качестве примера усовершенствования, на фиг. 4 представлена примерная схема 400 обезвоживания исходного потока с получением потока СПГ в соответствии с одним из вариантов осуществления настоящих технологий. Поскольку количество адсорбирующих материалов изменяется линейно в соответствии с длительностью цикла, настоящими технологиями обеспечиваются модули со слоями адсорбента и компоненты, которые занимают меньшую площадь по сравнению с обычными системами, например, с конфигурацией, показанной на фиг. 3. Кроме того, поскольку некоторые модули могут быть использованы аналогично описанному выше, эта конфигурация включает фильтр 404 и модуль 406 со слоями адсорбента, которые нужны для уменьшения загрязнения исходного потока вместо модуля с молекулярными ситами.

Как и способ, показанный на фиг. 3, осуществление данного способа начинается в модуле 302 удаления загрязнений, в который поступает исходный поток, и в котором от него отделяется ртуть, диоксид углерода (CO_2), сероводород (H_2S). В системе удаления загрязнений могут быть использованы способы короткоцикловой адсорбции, способы плотного контакта или другие надлежащие способы. Способы плотного контакта могут включать способы, описанные в публикациях заявок на патент США №№ 20110168019; 20120238793; 20140123620; 20140331862; 20140335002; и 20150352463 и U.S. сер. №№ 14/948422; 15/004348 и 15/009936, каждая из которых во всей полноте включается в настоящий документ путем ссылки. Поток, выходящий из модуля 302 удаления загрязнений, является исходным потоком, подаваемым по трубопроводу 304 в теплообменник 306, в котором происходит отделение воды. Теплообменник 306 предназначен для регулирования температуры исходного потока и для удаления воды до состояния насыщения при температуре, немного меньшей, чем заданная температура подачи. Поток, выходящий из теплообменника 306, подают в теплообменник 402, который может быть вторым теплообменником, предназначенным для нагревания потока на заданную величину (например, по меньшей мере, несколько градусов) для уменьшения процента влажности до менее, чем 100% и исключения или уменьшения риска конденсации воды во время короткоцикловой адсорбции и десорбции. Поток, выходящий из теплообменника 402, подают в фильтровальный модуль 404. Фильтровальный модуль 404 предназначен для удаления из потока твердых частиц и/или капель жидкости. Поток, выходящий из фильтра 404, подают в модуль 406 со слоями адсорбента, который может включать один или несколько модулей со слоями адсорбента, предназначенных для удаления из потока загрязняющих примесей. Модуль 406 со слоями адсорбента может предназначаться для проведения короткоцикловой адсорбции. Модуль 406 со слоями адсорбента может предназначаться для удаления из потока достаточной части H_2O, например, до менее 0,1 ppm. После модуля 406 со слоями адсорбента выходящий из модуля 406 со слоями адсорбента поток продукта охлаждают в теплообменном модуле 312, после чего подают в установку 314 по производству СПГ.

В этой конфигурации поток горючего материала подают в компрессорный модуль 318 топливного газа. В компрессорном модуле 318 топливного газа происходит сжатие потока высокочистого метана пониженного давления с целью повышения давления получаемого потока. Затем, поток, выходящий из компрессорного модуля 318 топливного газа, соединяют с потоком отпарного газа, поступающим по трубопроводу 408, получая продувочный поток. Продувочный поток подают в модуль 406 со слоями адсорбента в качестве продувочного газа процесса короткоцикловой адсорбции. В модуле 406 со слоями адсорбента продувочный поток соединяется с загрязняющими примесями (например, водой), образуя выходящий продувочный поток. Выходящий продувочный поток из модуля 406 со слоями адсорбента может быть подан в теплообменник 415. Теплообменник 415 предназначен для регулирования температуры потока и может предназначаться для удаления части воды из этого потока. Затем, поток, приведенный к требуемым техническим условиям, направляют в трубопровод 416 как поток технологического топливного газа.

В этой конфигурации используется продувочный поток с меньшей температурой чем в обычных подходах с использованием молекулярных сит. В качестве примера, эта конфигурация может быть использована для обработки 750 MSCFD влажного сырья, при этом, используется четыре модуля со слоями адсорбента. Каждый из этих модулей со слоями адсорбента, представленный модулем 406 со слоями адсорбента, может иметь диаметр 0,25 м и длину 0,6 м. В данном примере каждый слой образован параллельными каналами 500×500 мкм в диаметре, разделенными стальными стенками толщиной 50 мкм и покрытыми слоем пористого адсорбента толщиной 60 мкм. В данном примере типичная теплоемкость слоя адсорбента составляет 3,0 Джоуля на грамм адсорбента на градус Кельвина (Дж/г адс./К)\. Каждый слой содержит в целом 22,1 кг адсорбента из общих 88,4 кг, необходимых для всего процесса. Кроме того, в соответствии с настоящими технологиями не требуется узкая зона массопереноса, поэтому для тщательного удаления воды может быть использован широкий спектр адсорбентов. К ним относятся, помимо прочего, силикагель, цеолит 3A, 4A и 5A.

В качестве примера, исходный поток может быть подан с расходом 750 MSCFD, при температуре около 86°F (30°C) и с давлением около 1175 psia (8,1 МПа). Исходный поток может содержать, главным образом, метан наряду с другими более тяжелыми углеводородами и загрязняющими примесями. В частности, метан (C_1) может составлять около 92% об, другие углеводороды (C_{2+}) могут составлять около 8

об.%, сероводород, H_2S, может составлять около 4 ppm, диоксид углерода, CO_2, может составлять около 50 ppm, и вода может составлять около 34 lb/MSCF ($54{,}4\times10^{-5}$ кг/ст·м^3). Теплообменник 306 может регулировать температуру исходного потока от, примерно, 86°F (30°C) до, примерно, 68°F (20°C), благодаря чему содержание воды может уменьшиться до 19 lb/MSCF ($30{,}4\times10^{-5}$ кг/ст·м^3) . Этот поток затем пропускают через второй теплообменник с целью регулирования температуры до 73°F (22,8°C), потом через фильтр 404 и модуль 406 со слоями адсорбента. Поток, отводимый из модуля 406 со слоями адсорбента, пропускают через теплообменник 312 и направляют в установку 314 по производству СПГ. Этот поток может характеризоваться расходом 750 MSCFD, температурой 68°F (20°C) и давлением 1150 psia (7,9 МПа). Этот поток может содержать менее, примерно, 0,1 ppm воды. Поток, выходящий по трубопроводу 316, может составлять 5,2 миллион тонн в год.

Поток горючего материала, подаваемый в компрессорный модуль 318 топливного газа, может иметь расход 50 MCSFD ($1{,}4\times10^6$ ст·м^3/сут), что может составлять около 6,7% потока, поступающего в установку 314 по производству СПГ. Поток, отводимый из компрессорного модуля 318 топливного газа, может быть соединен с отпарным газом (например, 11 MCSFD ($0{,}3\times10^6$ ст·м^3/сут), что составляет 1,5% потока, поступающего в установку 314 по производству СПГ) и направлен в модуль 406 со слоями адсорбента в качестве продувочного потока. Продувочный поток может иметь расход 61 MCSFD ($1{,}72\times10^6$ ст·м^3/сут) (например, 3% потока, поступающего в установку 314 по производству СПГ), температуру 336°F (168,9°C) и давление 622 psia (4,3 МПа). Из модуля 406 со слоями адсорбента выходящий продувочный поток направляют в теплообменник 415 (например, теплообменник продувочного газа), при этом, расход может составлять 63 MCSFD ($1{,}78\times10^6$ ст·м^3/сут) (например, 8,4% потока, поступающего в установку 314 по производству СПГ), температуры около 240°F (115,6 °C) и давление 600 psia (4,1 МПа).

В этой конфигурации продувочный поток содержит часть исходного потока. Например, если количество, подаваемое в модуль 406 со слоями адсорбента, составляет 750 MCSFD, продувочный поток представляет собой комбинацию сжигаемого газа с расходом 50 MCSFD и отпарного газа с расходом 11 MCSFD. Поскольку состав всех этих потоков, по существу, одинаков (например, без части, представляющей собой воду), масса исходного потока, используемая в продувочном потоке, может быть оценена как, приблизительно, 8,1% (например, 61MSCFD/750MSCFD) массы сырья, подаваемого в процесс короткоцикловой адсорбции. В этом расчете концентрации H_2S, CO_2 и H_2O не учитываются.

Например, продувочный поток может содержать 20 мол.% или меньше углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока, 15 мол.% или меньше углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока, 10 мол.% или меньше углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока или 7 мол.% или меньше углеводородов, таких как метан, относительно исходного потока. В других примерах продувочный поток может включать 20 об.% или меньше исходного потока, 15 об.% или меньше исходного потока, 10 об.% или меньше исходного потока или 7 об.% или меньше исходного потока. В других конфигурациях расход продувочного потока может составлять 20 мол.% или меньше расхода исходного потока; расход продувочного потока может составлять 15 мол.% или меньше расхода исходного потока; или расход продувочного потока может составлять 10 мол.% или меньше расхода исходного потока.

Кроме того, продувочный поток может включать часть исходного потока. Например, часть метана в продувочном потоке может быть больше или равна 1 мол.% метана в исходном потоке; или, предпочтительно, больше или равна 3 мол.% метана в исходном потоке; или, предпочтительно, больше или равна 5 мол.% метана в исходном потоке. Кроме того, часть углеводородов в продувочном потоке может быть больше или равна 1 мол.% углеводородов в исходном потоке; или, предпочтительно, больше или равна 3 мол.% углеводородов в исходном потоке; или, предпочтительно, больше или равна 5 мол.% углеводородов в исходном потоке. В качестве еще одного примера, расход продувочного потока может быть больше или равен 1 мол.% расхода исходного потока; расход продувочного потока может быть больше или равен 3 мол.% расхода исходного потока; или расход продувочного потока может быть больше или равен 5 мол.% расхода исходного потока.

В соответствии с диаграммой 400, быстро чередующиеся слои адсорбента регенерируют на стадии продувки при помощи продувочного потока, который нагревают путем компрессии. При такой конфигурации из технологической линии продувочного потока может быть исключен какой-либо теплообменник или печь. Кроме того, в данной конфигурации продувочный поток образуется путем соединения сжатого потока горючего материала (например, сжигаемого газа СПГ) и отпарного газа в трубопроводе 408 из резервуара для хранения СПГ (не показан). Поскольку температура продувочного потока ниже, он может содержать меньше тепла, чем регенерирующий поток в обычном способе, показанном на фиг. 3.

В другом варианте осуществления изобретения фильтр 404 может располагаться между двумя теплообменниками 306 и 402, по потоку после охлаждающего теплообменника 306, но до перегревающего теплообменника 402. В этой конфигурации может быть уменьшена вероятность уноса капель жидкости в перегревающий теплообменник 402. Функцией перегревающего теплообменника 402 является регулирование состояния сырья, подаваемого на слои адсорбента, так, чтобы оно характеризовалось относительной влажностью менее 100%, а унос капель воды в перегревающий теплообменник 402 может препятст-

вовать выполнению этой функции.

Усовершенствование, достигнутое в настоящих технологиях, дополнительно поясняется путем сравнения двух способов. Например, осуществления одинакового обезвоживания исходного потока. Обычный способ TSA с использованием молекулярных сит, показанный на фиг. 3, включает использование трех слоев молекулярных сит, каждый из которых содержит 38102 кг цеолита 4A в качестве адсорбента, всего 114306 кг адсорбента. Способ настоящих технологий, показанный на фиг. 4, включает использование четырех модулей со слоями адсорбента, каждый из которых содержит 22,1 кг цеолита 5A в качестве адсорбента, всего 88,4 кг адсорбента. Количество адсорбента, используемое в обычном способе, в 1293 раза больше, чем количество адсорбента, необходимое для конфигурации фиг. 4. Кроме этого, модули обычного способа TSA с использованием молекулярных сит имеют диаметр около 1,41 м и длину около 6,7 м, тогда как модули со слоями адсорбента настоящих технологий имеют диаметр около 0,25 м и длину около 0,6 м. Следовательно, для оборудования способа настоящих технологий требуется существенно меньшая площадь, чем для обычного способа TSA с использованием молекулярных сит.

Фиг. 5A, 5B и 5C представляют собой примерные диаграммы 500, 520 и 540, связанные с конфигурацией, показанной на фиг. 4, в соответствии с одним из вариантов осуществления настоящих технологий. Диаграммы 500, 520 и 540 описывают распределение по времени и стадии примерного цикла короткоцикловой адсорбции. На диаграмме 500 реакция 502 изменения давления слоя и реакция 504 изменения температуры слоя показаны по оси 506 давления в psia, оси 508 температуры в градусах Фаренгейта относительно оси 510 длительности цикла в секундах для стадий примерного цикла. В качестве примера, цикл на фиг. 5A, 5B и 5C может включать осуществление стадии выдерживания в течение двух секунд, стадии сброса давления в течение шести секунд, стадии продувки в течение двенадцати секунд, второй стадии выдерживания в течение двух секунд, стадии восстановления давления в течение двух секунд и, затем, стадии адсорбции в течение двадцати четырех секунд. Общая длительность одного цикла в этой конфигурации составляет сорок четыре секунды.

На диаграммах 520 и 540 концентрация воды в газе слоя показана относительно длины слоя. Реакция на диаграммах 520 и 540 представляет собой концентрацию воды в газовой фазе и не включает количество воды, адсорбированное в твердом адсорбенте. В частности, диаграмма 520 представляет собой развернутое изображение стадии продувки, показанной на диаграмме 500. На диаграмме 520 реакции 522, 524, 526 и 528 показаны по оси 530 концентрации воды в ppm относительно оси 532 длины слоя в нормализованном положении по длине слоя (например, в единицах нормализованной длины слоя (z/L)). Движение потока на стадии продувки происходит по стрелке 534. Реакция 522 в этом цикле занимает восемь секунд, реакция 524 в этом цикле занимает двенадцать секунд, реакция 526 в этом цикле занимает шестнадцать секунд, и реакция 528 в этом цикле занимает двадцать секунд. Эти реакции отражают процесс удаления воды из слоя на стадии продувки. Кроме того, диаграмма 540 представляет собой развернутое изображение стадии адсорбции, показанной на диаграмме 500. На диаграмме 540 реакции 542, 544, 546 и 548 показаны по оси 550 концентрации воды в ppm относительно оси 552 длины слоя в единицах нормализованной длины слоя z/L. Движение потока на стадии адсорбции происходит по стрелке 554. Реакция 542 в этом цикле занимает двадцать четыре секунды, реакция 544 в этом цикле занимает тридцать две секунды, реакция 546 в этом цикле занимает сорок секунд, и реакция 548 в этом цикле занимает сорок восемь секунд. Кроме того, диаграмма 540 показывает, что, в среднем, только около 80% имеющейся длины слоя используется для адсорбции.

Фиг. 6A, 6B и 6C представляют собой примерные диаграммы 600, 620 и 640, связанные с конфигурацией, показанной на фиг. 4, в соответствии с одним из вариантов осуществления настоящих технологий. В частности, эти диаграммы относятся к распределению по времени цикла, отражаемого диаграммой 500. Диаграммы 600 и 620 дополнительно описывают наполнение слоя водой, а диаграмма 640 описывает температурные профили слоя для временных промежутков примерного цикла способа короткоцикловой адсорбции. На диаграмме 600 реакции 602, 604, 606 и 608 заполнения водой показаны по оси 610 заполнения водой в молях на килограмм (моль/кг) относительно оси 612 длины слоя в нормализованных единицах длины слоя (z/L). Реакция 602 в этом цикле занимает двадцать четыре секунды, реакция 604 в этом цикле занимает тридцать две секунды, реакция 606 в этом цикле занимает сорок секунд, и реакция 608 в этом цикле занимает двадцать секунд. Каждая из реакций 602, 604, 606 и 608 представляет собой степень заполнения водой в разные моменты времени в ходе стадии адсорбции. Передний край фронта адсорбции каждой из реакций 602, 604, 606 и 608 не распространяется на последнюю область слоя адсорбента. В частности, для данного примера, продуктовая область слоя адсорбента представляет собой часть слоя адсорбента от продуктового конца до, примерно, 25% длины слоя от продуктового конца слоя адсорбента, и заполнение водой продуктовой области поддерживается меньшим, примерно, 1 моль/кг.

На диаграмме 620 реакции 622, 624, 626 и 628 заполнения водой показаны по оси 630 заполнения водой в моль/кг относительно оси 632 длины слоя в z/L. Реакция 622 занимает восемь секунд, реакция 624 занимает двенадцать секунд, реакция 626 занимает шестнадцать секунд, и реакция 628 занимает двадцать секунд и отражает развитие заполнения водой слоя на стадии продувки. Как показано на диаграмме 620, заполнение водой уменьшается в течение стадии продувки от начального момента времени в во-

семь секунд (например, реакция 622) до конца стадии продувки в момент времени двадцать секунд (например, реакция 628). На всем протяжении стадии продувки заполнение водой продуктовой области, как видно на фиг. 6А, составляет менее, примерно, 1 моль/кг.

В данной конфигурации на стадии продувки происходит удаление воды из слоя адсорбента. Например, наибольшее содержание воды приходится на конец стадии адсорбции (например, реакция 608), тогда как наименьшее содержание воды приходится на конец стадии продувки (например, реакция 628). Как таковая, концентрация воды, адсорбированной на конце подачи слоя адсорбента, представляет собой разность между реакцией 608 у конца подачи слоя адсорбента и реакцией 628 у конца подачи слоя адсорбента, деленную на реакцию 608, что составляет, примерно, 40% (например, (15 моль/кг - 9 моль/кг) деленное на 15 моль/кг). Следовательно, концентрация адсорбированной слоем адсорбента воды у конца подачи слоя адсорбента может составлять, по меньшей мере, 40% концентрации воды, адсорбированной слоем адсорбента у конца подачи слоя адсорбента в конце стадии адсорбции; может составлять, по меньшей мере, 30% концентрации воды, адсорбированной слоем адсорбента у конца подачи слоя адсорбента в конце стадии адсорбции, или может составлять, по меньшей мере, 20% концентрации воды, адсорбированной слоем адсорбента у конца подачи слоя адсорбента в конце стадии адсорбции.

На диаграмме 640 реакции 642, 644, 646 и 648 заполнения водой показаны по оси 650 температуры в °F относительно оси 652 длины слоя в z/L. Реакция 642 в этом цикле занимает восемь секунд, реакция 644 в этом цикле занимает двенадцать секунд, реакция 646 в этом цикле занимает шестнадцать секунд, и реакция 648 в этом цикле занимает двадцать секунд. Эти реакции отражают изменение температуры слоя адсорбента в течение стадии продувки. Как показано на диаграмме 640, температуры слоя адсорбента увеличивается по мере прохождения стадии продувки от начального момента времени в восемь секунд (например, реакция 642) до конца стадии продувки в момент времени двадцать секунд (например, реакция 648).

Кроме того, в другом примере конфигурация может предусматривать интеграцию с процессом Controlled Freeze Zone™ (CFZ) с целью удаления большого объема CO_2 из природного газа. См., например, патентные публикации США №№ 2009/0266107 и 2010/0018248. Криогенные контролируемые зоны замораживания соответствуют способу криогенной перегонки, направленному на отделение метана от газовых потоков, содержащих большое количество CO_2. Эта система включает метаноотгонную колонну с возвратом флегмы и зоной замораживания в середине для облегчения замерзания и оттаивания CO_2, как известно специалистам в данной области. Головной поток метаноотгонной колонны (например, поток чистого газообразного метана) образует верхний продукт метаноотгонной колонны процесса CFZ, тогда как поток конечного продукта (например, кислый жидкий продукт высокого давления) получают как кубовый продукт. Какие-либо тяжелые углеводороды в сырье, подаваемом в систему CFZ, также удаляются как кубовый продукт. С этой целью по потоку до криогенной системы CFZ необходимо проводить обезвоживание, исключающее образование гидратов в криогенном оборудовании.

Для обезвоживания исходного потока криогенной системы CFZ могут быть использованы способы короткоцикловой адсорбции с быстро чередующимися слоями адсорбента и соответствующие модули для обезвоживания этого потока. В криогенной установке с контролируемыми зонами замораживания для обезвоживания этого потока могут быть использованы различные стадии. Например, эти стадии могут быть аналогичны стадиям, используемым в конфигурации фиг. 4. Как указано выше в отношении фиг. 4, продувочный поток может быть подан с температурой, соответствующей особому диапазону, и может являться частью одного из потоков процесса CFZ, такого как поток газообразного метана. Продувочный поток может быть подан при давлении в диапазоне от 450 psia (3,1 МПа) до 650 psia (4,5 МПа). Как один из примеров стадий процесса обезвоживания, сначала восстанавливают давление в модуле со слоями адсорбента, затем на стадии адсорбции проводят обезвоживание исходного потока. После стадии адсорбции слои адсорбента обрабатывают на различных стадиях регенерации. Стадии регенерации включают одну или несколько стадий сброса давления, на каждой из которых давление в модуле со слоями адсорбента может быть уменьшено, и конечное давление можете быть немного меньше давления продувки. После стадий сброса давления может быть проведена одна или несколько стадий продувки, при этом, каждая стадия продувки может проводиться в противотоке относительно направления движения исходного потока. Продувочный поток, который может представлять собой, главным образом, поток метана, может удалять из слоя адсорбента загрязняющие примеси. В некоторых конфигурациях, для дополнительной интенсификации процесса, также может быть подведено тепло.

В одном или нескольких вариантах осуществления изобретения может быть использован материал, представляющий собой адсорбирующий материал, нанесенный на неадсорбирующий носитель. Не имеющими ограничительного характера примерами адсорбирующих материалов являются оксид алюминия, микропористые цеолиты, углерод, катионогенные цеолиты, цеолиты с высоким содержанием оксида кремния, высококремнеземистые упорядоченные мезопористые материалы, золь-гель материалы, материалы ALPO (aluminum phosphorous and oxygen - фосфористый алюминий и кислород) (микропористые и мезопористые материалы, содержащие, преимущественно, фосфористый алюминий и кислород), материалы SAPO (silicon aluminum phosphorous and oxygen - фосфористый кремний-алюминий и кислород) (микропористые и мезопористые материалы, содержащие, преимущественно, фосфористый кремний-

алюминий и кислород), материалы MOF (metal organic framework - металлорганический каркас) (микропористые и мезопористые материалы с металлорганическим каркасом) и микропористые и мезопористые материалы с каркасом цеолит имидазолат. Другие материалы включают микропористые и мезопористые сорбенты с функциональными группами. Примерами функциональных групп, которые могут быть использованы для удаления CO_2, являются первичные, вторичные, третичные амины и другие непротогенные основные группы, такие как амидины, гуанидины и бигуаниды.

В одном или нескольких вариантах осуществления изобретения модуль со слоями адсорбента может быть использован для отделения загрязняющих примесей от исходного потока. Способ может включать пропускание газообразного исходного потока при давлении подачи через модуль со слоями адсорбента, включающий адсорбирующий контактор, с целью отделения одной или нескольких загрязняющих примесей от газообразного исходного потока с получением потока продукта, при этом, адсорбирующий контактор включает первую часть и вторую часть; прекращение подачи газообразного исходного потока; проведение стадии снижения давления, при этом, на стадии снижения давления происходит уменьшение давления в модуле со слоями адсорбента; проведение стадии продувки, при этом, на стадии продувки происходит уменьшение парциального давления адсорбата в модуле со слоями адсорбента, и, при этом, стадия продувки включает пропускание продувочного потока в среднюю зону распределения продувочного потока между первой частью и второй частью; проведение стадии восстановления давления, при этом, на стадии восстановления давления происходит увеличение давления в модуле со слоями адсорбента; и повторение стадий a) - e), по меньшей мере, в еще одном дополнительном цикле.

Кроме того, в одном или нескольких вариантах осуществления изобретения модуль со слоями адсорбента может включать слой адсорбента, который может быть использован для отделения целевого газа от газообразной смеси. Адсорбент обычно образован из адсорбирующего материала, нанесенного на неадсорбирующую подложку, или контактор. В таких контакторах имеются, по существу, параллельные каналы, в которых 20 об.%, предпочтительно, 15 об.% или менее открытого порового объема контактора, исключая каналы, составляют поры размером более, примерно, 20 Ангстрем. Каналами считается та часть контактора, по которой протекает газ, если стационарный перепад давления приложен между точкой или местом, в котором исходный поток поступает в контактор, и точкой или местом, в котором поток продукта выходит из контактора. В контакторе адсорбент встроен в стенки канала.

В одном или нескольких вариантах осуществления изобретения короткоцикловая адсорбция с быстрым чередованием слоев в соответствии с настоящими технологиями представляет собой короткоцикловую адсорбцию со сдвигом температуры (RCTSA) и адсорбцию со сдвигом давления (PSA). Для RCTSA или сочетания RCTSA и RCPSA общая длительность цикла обычно составляет менее 600 с, менее 300 с, предпочтительно менее 200 с, более предпочтительно менее 100 с, еще более предпочтительно менее 60 с.

Ввиду множества возможных вариантов осуществления изобретения, к которым приложимы принципы раскрытого изобретения, следует признать, что иллюстративные варианты осуществления изобретения являются лишь предпочтительными примерами изобретения и не должны рассматриваться как ограничивающие объем изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ удаления загрязняющих примесей из газообразного исходного потока, включающий этапы, на которых:

a) осуществляют одну или несколько стадий адсорбции, при этом каждая из одной или нескольких стадий адсорбции включает пропускание газообразного исходного потока при давлении подачи и температуре подачи через модуль со слоями адсорбента для отделения одной или нескольких загрязняющих примесей от исходного газообразного потока с получением потока продукта;

b) осуществляют одну или несколько стадий снижения давления, при этом давление в модуле со слоями адсорбента уменьшают на заданную величину на каждой последовательной стадии снижения давления;

c) осуществляют одну или несколько стадий продувки, при этом каждая из одной или нескольких стадий продувки включает пропускание продувочного потока в модуль со слоями адсорбента, при этом продувочный поток перемещается противоточно относительно направления движения исходного потока, причем продувочный поток подают при температуре по меньшей мере на 50°F (27,8°C), превышающей температуру подачи и меньшей 450°F (232,2°C), причем расход продувочного потока меньше или равен 20 молярным процентам (мол.%) расхода исходного потока;

d) осуществляют одну или несколько стадий восстановления давления, при этом давление в модуле со слоями адсорбента увеличивают на каждой стадии восстановления давления на заданную величину для каждой последовательной стадии восстановления давления; и

e) повторяют стадии a)-d) по меньшей мере в одном дополнительном цикле, при этом длительность цикла составляет период времени, больший чем 1 с и меньший чем 600 с.

2. Способ по п.1, в котором продувочный поток подают при температуре в диапазоне от 200°F

(93,3°C) до 450°F (232,2°C).

3. Способ по п.1, в котором продувочный поток подают при температуре в диапазоне от 250°F (121,1°C) до 380°F (193,3°C).

4. Способ по любому из пп.1-3, в котором газообразный исходный поток является углеводородсодержащим потоком, включающим более одного объемного процента углеводородов относительно общего объема газообразного исходного потока.

5. Способ по любому из пп.1-4, в котором газообразный исходный поток содержит углеводороды и H_2O, при этом содержание H_2O лежит в диапазоне от 0,2 объемных частей на миллион до полного насыщения газообразного исходного потока.

6. Способ по любому из пп.1-4, в котором газообразный исходный поток содержит углеводороды и H_2O, при этом содержание H_2O лежит в диапазоне от 100 объемных частей на миллион до 1500 объемных частей на миллион.

7. Способ по любому из пп.1-6, дополнительно включающий пропускание поступающего потока через модуль удаления загрязнений с получением газообразного исходного потока, при этом модуль удаления загрязнений предназначен для снижения содержания диоксида углерода (CO_2) до менее 100 частей на миллион и содержания сероводорода (H_2S) до менее 4 частей на миллион.

8. Способ по любому из пп.1-7, дополнительно включающий нагревание газообразного исходного потока до температуры, превышающей точку росы воды.

9. Способ по п.8, в котором нагревание газообразного исходного потока до температуры, превышающей точку росы воды, дополнительно включает

пропускание газообразного исходного потока через первый теплообменник для снижения температуры газообразного исходного потока;

отведение части H_2O из газообразного исходного потока; и

пропускание газообразного исходного потока через второй теплообменник для увеличения температуры газообразного исходного потока.

10. Способ по любому из пп.1-9, дополнительно включающий

направление потока продукта из модуля со слоями адсорбента в установку по производству сжиженного природного газа (СПГ) и

отведение из установки по производству СПГ потока горючего материала для использования, по меньшей мере, в качестве части продувочного потока.

11. Способ по п.10, дополнительно включающий объединение потока горючего материала из установки по производству СПГ с потоком отпарного газа с получением продувочного потока.

12. Способ по любому из пп.1-11, в котором давление подачи лежит в диапазоне от 400 фунтов на квадратный дюйм абс. (psia) (2,76 МПа) до 1400 psia (9,65 МПа).

13. Способ по любому из пп.1-12, в котором длительность цикла составляет более 2 с и менее 300 с.

14. Способ по любому из пп.1-13, в котором по окончании времени стадии продувки концентрация воды, адсорбированной слоем адсорбента, составляет по меньшей мере 40% концентрации воды, адсорбированной слоем адсорбента по окончании стадии адсорбции.

15. Способ по любому из пп.1-14, в котором модуль со слоями адсорбента включает слой адсорбента, при этом заполнение H_2O продуктовой области продуктового конца слоя адсорбента составляет менее 0,5 моль/кг.

16. Способ по п.15, в котором продуктовая область представляет собой определенную часть слоя адсорбента от продуктового конца слоя адсорбента до 25% длины слоя.

17. Способ по любому из пп.4-16, в котором продувочный поток включает углеводороды, включая метан, причем продувочный поток включает 10 мол.% или менее метана относительно газообразного исходного потока.

18. Система для удаления загрязняющих примесей из газообразного исходного потока, содержащая

модуль со слоями адсорбента, предназначенный для отделения загрязняющих примесей от газообразного исходного потока и получения потока продукта, при этом газообразный исходный поток поступает при температуре подачи;

установку по производству сжиженного природного газа, предназначенную для приема потока продукта и разделения потока продукта на поток конечного продукта и поток горючего материала и

один или несколько продувочных модулей, предназначенных для обеспечения продувочного потока для модуля со слоями адсорбента,

при этом продувочный поток образуется из одного из следующих: части потока продукта, потока горючего материала, потока отпарного газа и любого их сочетания; и при этом продувочный поток подают при температуре по меньшей мере на 50°F (27,8°C), превышающей температуру подачи и меньшей 450°F (232,2°C), и продувочный поток содержит 20 мол.% или меньше углеводородов относительно газообразного исходного потока.

19. Система по п.18, дополнительно включающая модуль удаления загрязнений, предназначенный для приема поступающего потока и получения газообразного исходного потока, при этом модуль удаления загрязнений предназначен для снижения уровня диоксида углерода (CO_2) до менее 100 частей на

миллион и уровня сероводорода (H_2S) до менее 4 частей на миллион.

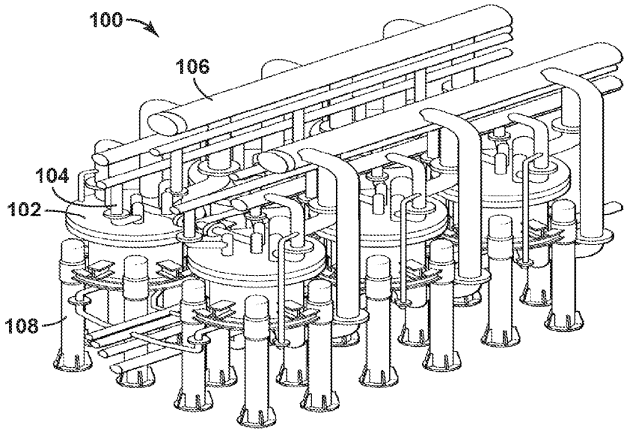
20. Система по любому из пп.18-19, дополнительно включающая первый теплообменник предназначенный для приема газообразного исходного потока; для снижения температуры газообразного исходного потока и для отведения части H_2O от газообразного исходного потока; и второй теплообменник, предназначенный для увеличения температуры газообразного исходного потока, поступающего из первого теплообменника.

21. Система по любому из пп.18-20, дополнительно включающая трубопровод, предназначенный для объединения сжатого потока горючего материала, поступающего с установки по производству СПГ, с потоком отпарного газа с получением продувочного потока.

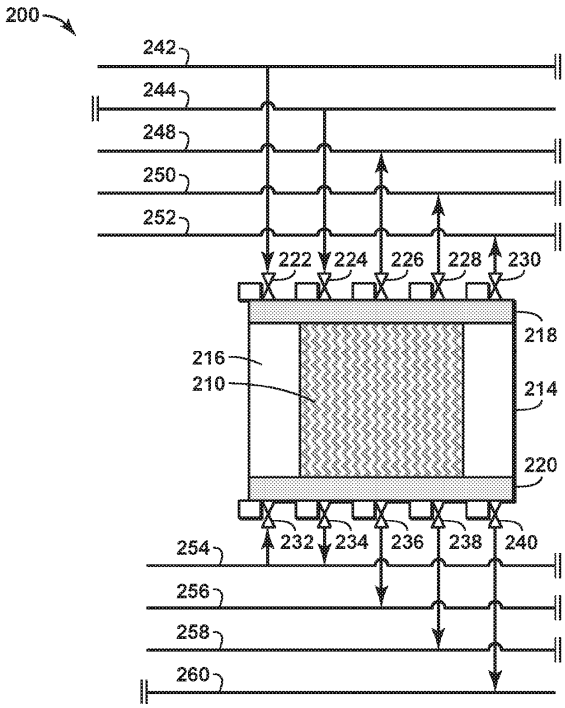
22. Система по любому из пп.18-21, дополнительно включающая теплообменник продувочного потока, предназначенный для приема продувочного потока, выходящего из модуля со слоями адсорбента на стадии продувки; для снижения температуры выходящего продувочного потока и для отведения части H_2O от выходящего продувочного потока.

23. Система по любому из пп.18-22, в которой содержание воды в потоке продукта может быть менее 1 объемной части на миллион.

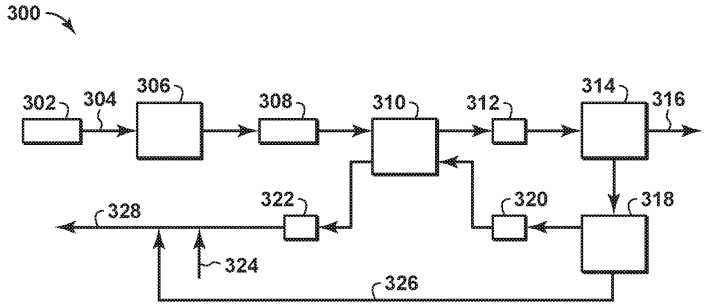
24. Система по любому из пп.18-23, в которой один или несколько продувочных модулей включают один или несколько компрессоров, предназначенных для сжатия одного из потоков: потока горючего материала, потока отпарного газа или любого их сочетания.



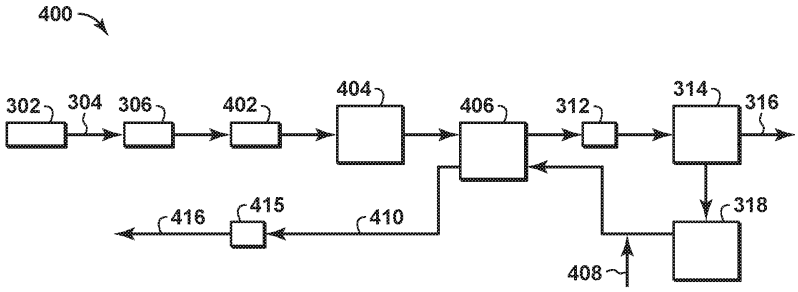
Фиг. 1



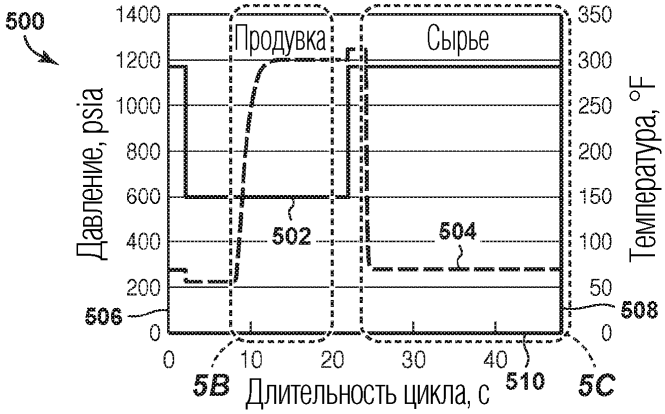
Фиг. 2



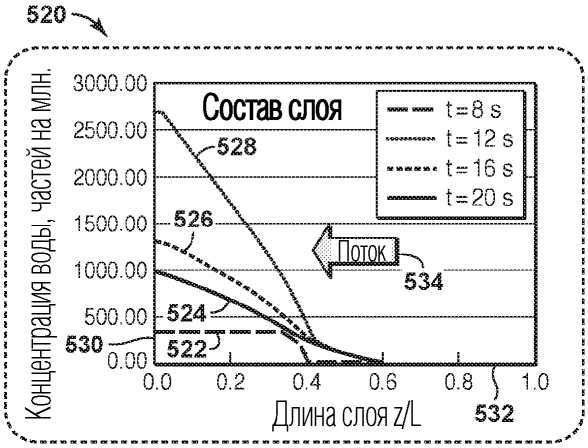
Фиг. 3 (Уровень техники)



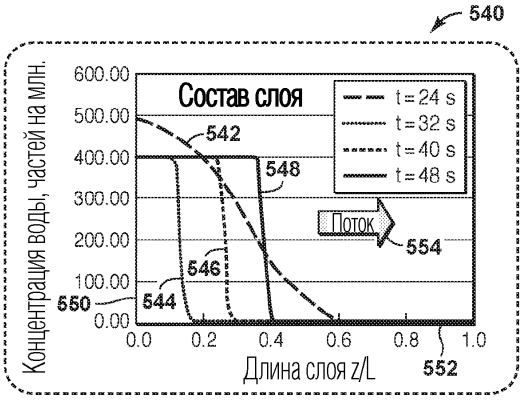
Фиг. 4



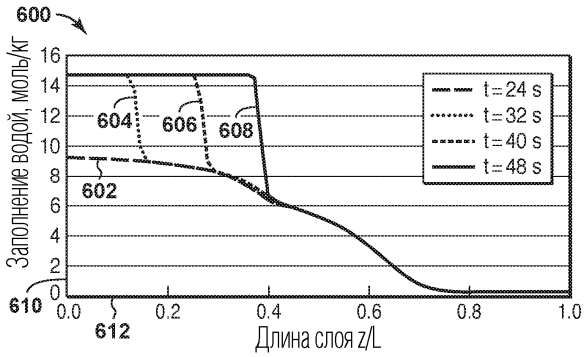
Фиг. 5A



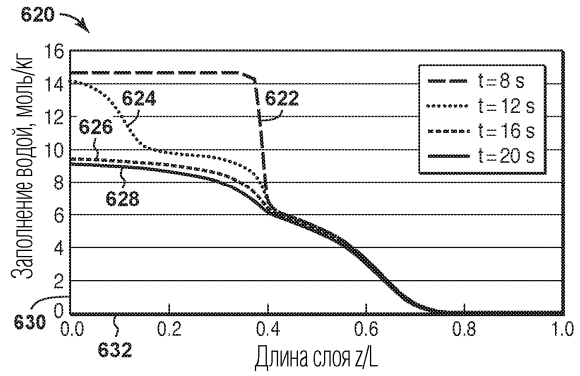
Фиг. 5B



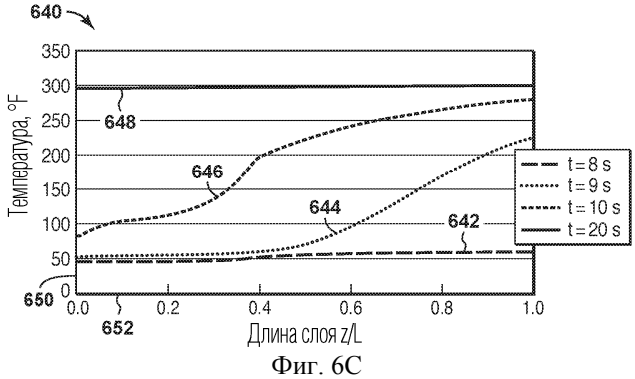
Фиг. 5C



Фиг. 6A



Фиг. 6B



Фиг. 6C

Евразийская патентная организация, ЕАПВ
Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2