

ПНСТ 817-2023
(ISO/TR 27912:2016)

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УЛАВЛИВАНИЕ, ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Системы, технологии и процессы улавливания диоксида углерода

Carbon dioxide capture, transportation and storage. Carbon dioxide capture systems, technologies and processes

ОКС 13.040

Срок действия с 2023-07-01
до 2024-07-01

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным бюджетным учреждением науки "Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им.А.В.Топчиева" Российской академии наук (ИНХС РАН) на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии документа, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 239 "Улавливание, транспортирование и хранение углекислого газа"

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 февраля 2023 г. N 11-пнст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному документу ISO/TR 27912:2016* "Улавливание углекислого газа. Системы, технологии и процессы улавливания диоксида углерода" (ISO/TR 27912:2016 "Carbon dioxide capture - Carbon dioxide capture systems, technologies and processes", MOD) путем изменения отдельных фраз (слов, ссылок, обозначений), которые выделены в тексте курсивом**, а также исключения отдельных терминов, обозначений и сокращений, пунктов, разделов 9-13, приложений А, В, С, D и структурного элемента "Библиография".

* Доступ к международным и зарубежным документам, упомянутым в тексте, можно получить, обратившись в Службу поддержки пользователей.

** В оригинале обозначения и номера стандартов и нормативных документов в разделе "Предисловие" приводятся обычным шрифтом; отмеченные в этом разделе знаком "*" и остальные по тексту документа выделены курсивом. - Примечание изготовителя базы данных.

Внесение указанных технических отклонений направлено на исключение рекламной и коммерческой информации.

Международный документ разработан Техническим комитетом ТК 265 "Улавливание, транспортирование и геологическое хранение двуокиси углерода" Международной организации по стандартизации (ИСО).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5-2012 (пункт 3.5).

Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой указанного международного документа приведено в дополнительном приложении ДА

*Правила применения настоящего стандарта и проведения его мониторинга установлены в ГОСТ Р 1.16-2011** (разделы 5 и 6).*

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии собирает сведения о практическом применении настоящего стандарта. Данные сведения, а также замечания и предложения по содержанию стандарта можно направить не позднее, чем за 4 мес до истечения срока его действия разработчику настоящего стандарта по адресу: 117418 Москва, Нахимовский проспект, д.31, к.2 и/или в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии по адресу: 123112 Москва, Пресненская набережная, д.10, стр.2.

В случае отмены настоящего стандарта соответствующая информация будет опубликована в ежемесячном информационном указателе "Национальные стандарты" и также будет размещена на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.rst.gov.ru)

Введение

Настоящий стандарт разработан с целью апробации международного опыта в Российской Федерации применительно к системам, технологиям и процессам улавливания диоксида углерода и накопления дополнительной информации в отношении объектов стандартизации.

По отношению к ISO/TR 27912:2016 положения настоящего стандарта не содержат разделы, связанные с конкретными примерами зарубежных предприятий по внедрению систем, технологий и процессов улавливания диоксида углерода в связи с возможной неприменимостью отдельных технологических решений в Российской Федерации.

В настоящем стандарте приведена информация о системах, технологиях и процессах улавливания применительно к энергетической отрасли.

Учитывая необходимость поэтапного внедрения новых технологических решений, целью практического применения настоящего стандарта является накопление массива данных в рамках научно-исследовательской деятельности заинтересованных лиц для последующей разработки на основе полученных результатов документов по стандартизации предприятий промышленности по отдельным отраслям.

Положения настоящего стандарта не применяют в рамках осуществления оценки соответствия любой из сторон.

Улавливание и хранение диоксида углерода (CCS) - это набор технических решений, внедрение которых может способствовать смягчению последствий изменения климата. В мире существует множество проектов по улавливанию диоксида углерода.

Такие технологии, как химическая и физическая абсорбция, адсорбция и мембранное разделение, в настоящее время находятся на различных стадиях реализации: от коммерческих (110 МВт) крупномасштабных демонстрационных установок до лабораторных исследовательских установок.

В настоящем стандарте приведено описание систем улавливания CO₂ на основе опубликованных научных статей и других документов. Стандарт содержит следующие сведения:

- границы систем улавливания CO₂;
- технологии, оборудование и процессы;
- потоки CO₂, газовые потоки, выбросы, процессы и отходы;
- процедуры оценки характеристик улавливания;
- вопросы безопасности по каждой системе улавливания;
- вопросы надежности систем улавливания;
- вопросы управления.

1 Область применения

Настоящий стандарт содержит общие положения, связанные с внедрением систем улавливания CO₂,

которые могут быть основой для разработки отдельных отраслевых стандартов по улавливанию CO₂. В стандарте рассматривают технологии, оборудование и процессы улавливания CO₂ с точки зрения международной стандартизации и реализации CCS-проектов.

В настоящем стандарте рассмотрены системы улавливания CO₂, применимые к источникам выбросов CO₂, а также технологии, оборудование и процессы улавливания. *В настоящем стандарте, помимо общих положений, приведена информация для энергетической отрасли. Указанная информация может быть использована в качестве основы для разработки других стандартов и их применения в различных отраслях промышленности.*

Настоящий стандарт не распространяется:

- на промышленное использование CO₂;
- сжатие CO₂ (процесс не описан подробно);
- терминологию, не используемую в настоящем стандарте;
- перспективные направления деятельности.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р ИСО 27917 *Улавливание, транспортирование и хранение углекислого газа. Общие термины*

ПНСТ 813-2023/ИСО 27916:2019 *Улавливание, транспортирование и хранение углекислого газа. Размещение диоксида углерода путем закачки в нефтяные пласты с одновременным увеличением нефтеотдачи*

Примечание - При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования - на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю "Национальные стандарты", который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя "Национальные стандарты" за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р ИСО 27917 и ПНСТ 813-2023, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 абсорбент (absorbent): Вещество, способное поглощать жидкость или газ.

3.2 сродство (affinity): Свойство веществ, позволяющее вступать друг с другом в химическую реакцию.

Примечание - Также определяется как уменьшение энергии Гиббса при переходе от реагирующего вещества к продуктам химической реакции.

3.3 воздухоразделительная установка (air separation unit): Установка, отделяющая кислород, азот и другие инертные газы от воздуха, предназначенная для подачи кислорода с целью газификации или сжигания в процессе CCS.

3.4 алканоламин (alkanolamine): Химическое соединение, которое содержит как гидроксил (-OH), так и амино ($-NH_2$, $-NHR$ и $-NR_2$) функциональные группы в основной цепи алкана.

3.5 амин (amine): Химическое соединение, состоящее из атомов азота, связанных с атомами водорода и/или углерода, имеющее общую формулу R_3N .

3.6 аминокислота (amino acid): Любое из класса органических соединений, в которых атом углерода связан с аминогруппой, карбоксильной группой, атомом водорода и органической боковой группой.

3.7 антиоксидант (antioxidant): Вещество, которое ингибирует окисление или реакции, вызванные кислородом, пероксидами или свободными радикалами.

3.8 цикл Брайтона (Brayton cycle): Термодинамический цикл, описывающий работу теплового двигателя постоянного давления такого, как газотурбинный двигатель.

3.9 капитальные затраты (capital cost): Сумма прямых затрат на оборудование для улавливания CO_2 , которые также известны как инвестиционные затраты или первоначальные затраты.

3.10 катализатор (catalyst): Вещество, увеличивающее скорость реакции, но не входящее в состав ее продуктов.

3.11 энергопотребление CCS (CCS energy consumption): Общая энергия, используемая при эксплуатации проекта CCS.

3.12 химическая абсорбция (chemical absorption): Процесс, при котором CO_2 поглощается в результате химической реакции.

3.13 циркуляционный сухой скруббер (circulating dry scrubber): Тип полусухого FGD с использованием гашеной извести в качестве химического реагента, принцип действия которого основан на применении реактора с циркулирующим слоем и предназначенный для десульфурации дымовых газов.

3.14 блок обработки CO_2 (CO_2 processing unit): Установка, используемая для очистки газа с высоким содержанием диоксида углерода до требуемых характеристик CO_2 .

3.15 деградация (degradation): Процесс, в результате которого снижается функциональная эффективность или чистота химического вещества ввиду физического и химического разрушения или реакции с другими веществами.

3.16 дегидратация (dehydration): Процесс удаления воды из потока или материала.

3.17 демистер (demister): Устройство, предназначенное для удаления капель жидкости или тумана, увлекаемых потоком пара, часто снабженное сосудами для сепарации пара и жидкости.

3.18 десорбция (desorption): Выделение CO_2 из абсорбента или адсорбента.

3.19 прямое охлаждение (direct quench): Процесс, при котором горячий газ охлаждается за счет впрыска воды или прохождения через воду.

3.20 мгновенно выделяющийся газ (flash gas): Газ, отделенный от жидкости посредством понижения давления.

3.21 дымовые газы (flue gas): Газы, образующиеся при сгорании топлива, которые обычно выбрасываются в атмосферу.

3.22 конденсационная сепарация дымовых газов (flue gas condenser): Процесс удаления воды из дымовых газов путем охлаждения.

3.23 обессеривание дымовых газов (flue gas desulfurization): Процесс удаления SO_x из дымовых газов с использованием химических реагентов.

3.24 блок обработки дымовых газов (flue gas desulfurization): Оборудование, используемое для удаления различных загрязняющих веществ (SO_x , NO_x и т.д.) из дымовых газов котлов или нагревателей.

3.25 принудительное окисление; мокрая десульфурация дымовых газов (forced oxidation wet flue gas desulfurization): Тип мокрой FGD с использованием известняка в качестве химического реагента.

3.26 газовая турбина (gas turbine): Двигатель, в котором топливо сжигается в сжатом воздухе или кислороде, а механическая работа восстанавливается за счет расширения горячих продуктов горения.

3.27 газификация (gasification): Реакция, при которой уголь, биомасса, нефтяной кокс или природный газ превращаются в синтетический газ, состоящий в основном из монооксида углерода (CO) и водорода (H₂).

3.28 газификатор (gasifier): Реактор, в котором уголь, биомасса, нефтяной кокс или природный газ преобразуются в синтез-газ, состоящий в основном из монооксида углерода (CO) и водорода (H₂).

3.29 мембрана (membrane): Проницаемый твердый материал, который избирательно разделяет компоненты смеси.

3.30 туман (mist): Мелкие капли жидкости, образовавшиеся в результате ее конденсации.

3.31 отходящий газ (off-gas): Газ, образовавшийся как побочный продукт.

3.32 кислородно-топливное сжигание (oxyfuel combustion): Процесс сжигания топлива с чистым кислородом или смесью кислорода и рециркулируемого дымового газа.

3.33 кислородный котел с CFB (oxy-CFB boiler): Котел, принцип действия которого основан на технологии кислородного сжигания топлива с использованием рециркулируемых дымовых газов.

3.34 кислородно-паровой котел (oxy-PC boiler): Котел, принцип действия которого состоит в использовании технологии, основанной на кислородном сжигании топлива с применением рециркулируемого дымового газа.

3.35 выброс твердых частиц (particulate emission): Выделение твердых и жидких частиц, являющихся побочными продуктами сгорания, с дымовыми газами из дымовой трубы котла, работающего на ископаемом топливе.

3.36 коэффициент проницаемости (permeability rate): Параметр, характеризующий количество газа (или жидкости), прошедшего через мембрану в единицу времени и площади.

3.37 проницаемость (permeance): Количество газа, фактически прошедшего через мембрану на единицу перепада давления.

3.38 физическая абсорбция (physical absorption): Процесс, при котором растворитель физически поглощает газ под давлением и без химической реакции.

3.39 улавливание после сжигания (post-combustion capture): Улавливание диоксида углерода из потока дымовых газов, образующихся при сжигании топливовоздушной смеси.

3.40 улавливание перед сжиганием (pre-combustion capture): Улавливание углекислого газа после обработки топлива перед сжиганием.

3.41 адсорбция при переменном давлении (pressure swing adsorption): Метод разделения газов с помощью физической адсорбции одного газа при высоком давлении и высвобождении его при низком давлении.

3.42 угольная пыль (pulverized coal): Мелкоизмельченный уголь.

3.43 пылеугольный котел (pulverized coal boiler): Котлы энергетических установок, использующие пылевидное топливо или уголь в качестве топлива.

3.44 пылевидное топливо (pulverized fuel): Мелкоизмельченное твердое топливо, такое как уголь или биомасса.

3.45 регенератор (reclaimer): Процесс или установка, которая регенерирует испорченный абсорбент.

3.46 скруббер (scrubber): Устройство газожидкостного контактора, обычно используемое для удаления газообразных и твердых выбросов из потоков дымовых газов.

3.47 стриппер (stripper): Газожидкостное контактное устройство, в котором компонент переводится из жидкой фазы в газовую фазу.

4 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ПГ - парниковые газы;

CCS - улавливание и размещение диоксида углерода;

CCUS - улавливание, утилизация и хранение углерода;

CDS - циркуляционный сухой скруббер;

FGD - обессеривание дымовых газов;

LIN - жидкий азот;

LOX - жидкий кислород;

PCC - улавливание после сжигания;

PFD - диаграмма процесса.

5 Система улавливания диоксида углерода (CO₂)

5.1 Общие положения

В 2011 г. глобальные выбросы CO₂ составили приблизительно 33,8 гигатонн. На сектор производства электроэнергии приходилось почти 40%.

В таблице 1 представлена информация по выбросам для каждого сектора экономики в 2011 г.

Таблица 1 - Глобальные выбросы CO₂ в 2011 г.

Источники (сектора) выбросов CO ₂	% общего объема выбросов CO ₂	Примечание
Энергетика	39	Электростанция на ископаемом топливе как крупный стационарный источник CO ₂
Транспорт	20	-
Промышленность	26	Производство чугуна и стали, производство цемента, химикаты, нефтепереработка и т.д. в качестве крупных стационарных источников CO ₂
Строительство	8	-
Сельское хозяйство и др.	7	-

Улавливание CO₂ является первой частью любого CCS-проекта. Система улавливания CO₂ состоит из технологий, процессов и оборудования, которые позволяют отделять и перерабатывать CO₂ из газовых потоков (например, природного газа, синтетического газа, технологических отходящих газов, дымовых газов) и делают его пригодным для транспортирования и размещения.

CO₂ можно улавливать из различных стационарных точечных источников, таких как: электростанции, работающие на ископаемом топливе, сталелитейные заводы, предприятия производство цемента и извести, химические и нефтехимические процессы, целлюлозно-бумажные комбинаты, заводы по переработке природного газа, нефтеперерабатывающие заводы и заводы по переработке топлива (т.е. жидкости или угля в жидкости).

В настоящее время улавливание CO₂ является устоявшимся коммерческим процессом в различных отраслях промышленности, таких как переработка природного газа, производство аммиака и мочевины. Как правило, CO₂, уловленный в этих процессах, либо выбрасывают в атмосферу, либо используют в качестве сырья для производства других химических веществ (например, мочевины, карбонатов кальция).

С другой стороны, улавливание CO₂ на электростанциях и в других энергоемких отраслях, таких как производство стали и цемента, применяют с целью снижения выбросов CO₂.

5.2 Классификация систем улавливания CO₂

Системы улавливания CO₂ можно классифицировать по трем различным маршрутам улавливания (см. рисунок 1):

- улавливание CO₂ после сжигания: отделение CO₂ от дымовых газов;
- улавливание CO₂ перед сжиганием: удаление CO₂ из синтез-газа, полученного в результате газификации, перед его сжиганием;
- кислородно-топливное сжигание с последующим улавливанием CO₂: сжигание топлива в почти чистом кислороде для получения дымового газа с высокой концентрацией CO₂, готового для дальнейшей обработки.

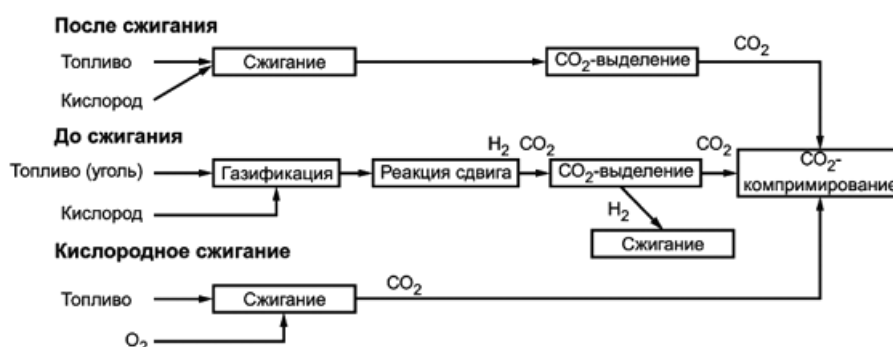


Рисунок 1 - Различные способы улавливания CO₂ для угольной электростанции

Подробное описание и типы технологий, процессов и используемого оборудования применительно к электроэнергетике приведены в разделах 7, 8 соответственно.

5.3 Граница системы

Граница системы включает основную установку (т.е. электростанцию или промышленную установку) и систему улавливания CO₂ до точки, где CO₂ поступает в трубопровод (т.е. точка входа в систему транспортирования CO₂). Следует отметить, что сжатие CO₂ входит в границы системы улавливания CO₂, однако в настоящем стандарте не рассматривается.

Для улавливания CO₂ после сжигания система улавливания CO₂ не интегрирована в основную установку; таким образом, граница системы улавливания может быть четко определена. Она может начинаться от точки, где дымовые газы поступают в установку предварительной обработки дымовых газов и заканчивается в точке, где CO₂ поступает в трубопровод. Подробное описание приведено в 7.1.

Для улавливания CO₂ перед сжиганием система улавливания CO₂ может быть частично интегрирована в

основную установку. Существует несколько вариантов в зависимости от выбранной технологии, заданных характеристик CO_2 и степени улавливания. Граница между заводом и системой улавливания CO_2 перед сжиганием четко не определена, но ее можно различить. Как правило, система улавливания CO_2 включает реактор конверсии водяного газа, установку удаления кислых газов и установку сжатия CO_2 . Следует отметить, что улавливание CO_2 на электростанции может также повлиять на другие части основной станции.

Границы системы улавливания CO_2 и основного предприятия могут варьироваться в зависимости от выбранной технологии улавливания CO_2 , и изменение системы границ может зависеть от конкретного места.

6 Обзор

6.1 Общие положения

В настоящем стандарте рассматривают следующие вопросы в отношении технологий улавливания:

- a) границы системы;
- b) технологии, оборудование и процессы;
- c) поток CO_2 , газовые потоки, выбросы и отходы;
- d) процедуры оценки эффективности улавливания, включая штрафы и другие вопросы;
- e) безопасность выбросов и оценка воздействия на окружающую среду;
- f) вопросы надежности;
- g) система управления.

Границы системы определяют как границы объектов, которые должны быть описаны для систем улавливания CO_2 .

Должно быть представлено описание технологий, оборудования и процессов, включая краткое описание технологий улавливания и необходимое оборудование. Каждая технология требует уникального оборудования.

Поток CO_2 , газовые потоки, выбросы и отходы представляют информацию об основных газовых потоках, содержащих CO_2 , газовых потоках после улавливания CO_2 , особенно при улавливании перед сжиганием или производстве промышленного газа, а также о выбросах и отходах, возникающих в указанных процессах. Также должна быть приведена информация о химических соединениях, используемых в процессах улавливания или химических соединений в отходах, образующихся в результате таких процессов.

Обработка выбросов и химических соединений или отходов, образующихся в процессах улавливания, должна как минимум соответствовать правилам утилизации химических веществ в соответствующих странах и регионах. Данные вещества должны быть обезврежены путем сжигания или с помощью других процессов, прежде чем они попадут в окружающую среду.

Процедура оценки эффективности улавливания состоит в необходимости предоставления уникальных параметров и индикаторов для технологий улавливания, которые будут использоваться в качестве показателей для сравнения характеристик различных технологий.

Безопасность выбросов и оценка воздействия на окружающую среду описывает выявленные и потенциальные проблемы, связанные с безопасностью, характерные для каждой технологии улавливания.

Любое оборудование и сооружения, связанные с установкой улавливания, должны соответствовать действующим законам и правилам в каждой стране или регионе.

В дополнение к исполнению законов и нормативных актов, касающихся химических процессов в каждой стране и регионе, может потребоваться применение анализов сценариев риска.

Одной из распространенных проблем в технологиях улавливания является воздействие CO_2 . Наиболее вероятными путями воздействия CO_2 на человека являются вдыхание или контакт с кожей. Очевидна

необходимость подхода, основанного на оценке рисков. CO_2 не относят к ядовитым веществам. Тем не менее хронические последствия для человека возникают в результате длительного воздействия CO_2 . Помимо CO_2 также необходимо учитывать воздействие таких веществ, как амины, кислород и водород.

6.2 Процессы выделения CO_2

Существует три основных процесса выделения CO_2 из газовых потоков.

6.2.1 Выделение с помощью сорбентов/растворителей

Разделение достигается за счет того, что газ, содержащий CO_2 , находится в контакте с жидким абсорбентом или твердым сорбентом, способным поглощать CO_2 . Сорбент с уловленным CO_2 транспортируется в другой аппарат, где CO_2 выделяется после нагрева, после снижения давления или любого другого изменения условий [см. рисунок 2 а 1) и а 2)]. Сорбент, полученный после этапа регенерации, направляется обратно для улавливания CO_2 , т.е. процесс является циклическим. В некоторых вариантах этой схемы сорбент находится в твердом состоянии и не циркулирует между сосудами [см. рисунок 2 а 2)], т.к. сорбция и регенерация достигаются за счет циклических изменений (давления или температуры) в сосуде, в котором находится сорбент. Всегда необходим поток свежего сорбента, чтобы компенсировать естественное снижение активности и/или потери сорбента.

Обобщенная схема, приведенная на рисунке 2, демонстрирует улавливания CO_2 , включая доступные коммерческие варианты, такие как химическая абсорбция, физическая абсорбция и адсорбция.

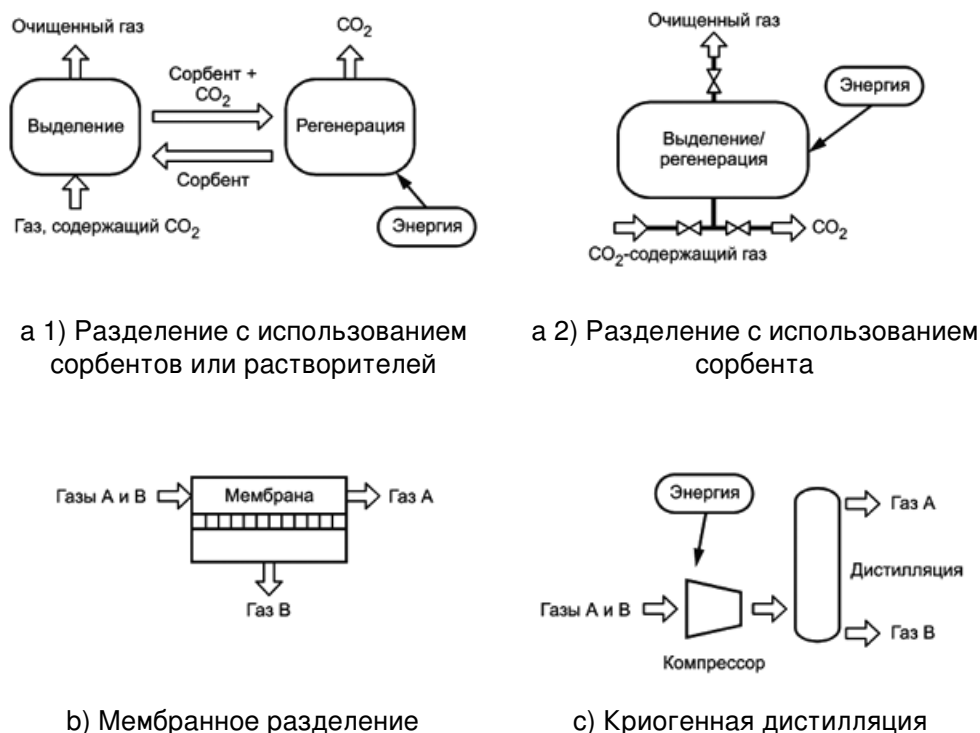


Рисунок 2 - Обобщенная схема основных процессов улавливания CO_2

Процессы, основанные на использовании новых жидких сорбентов или новых твердых регенерируемых сорбентов, разрабатывают с целью преодоления недостатков существующих систем, таких как высокая потребность в энергии, деградация сорбента, высокие инвестиции и т.д. Одна из общих проблем приведенных систем улавливания CO_2 заключается в том, что поток сорбента между аппаратами велик, поскольку он должен соответствовать потоку CO_2 . Следовательно, размер оборудования и энергия, необходимая для регенерации сорбента, велики и, как правило, приводят к снижению эффективности и дополнительным затратам. Также в системах с использованием дорогостоящих сорбентов всегда существует опасность увеличения затрат, связанных с приобретением сорбента и утилизацией отработанного сорбента. Хорошая производительность сорбента при высокой нагрузке CO_2 во многих повторяющихся циклах является необходимым условием в данных системах улавливания CO_2 .

При химической абсорбции используют растворители (абсорбенты), которые химически реагируют с газом для селективного поглощения целевых веществ. В качестве жидких абсорбентов используют такие материалы, как амины и карбонат калия. Метод химической абсорбции подходит для снижения концентрации CO_2 с десятков процентов примерно до 0,1% или, при необходимости, до десятков ppm.

Технологическая схема процесса химической абсорбции - система, состоящая из двух основных аппаратов: абсорбера, который улавливает целевые вещества, и регенератора (стриппера). Абсорбент циркулирует между абсорбером и регенератором, повторяя процесс абсорбции и десорбции CO_2 .

Большинство методов химической абсорбции используют тепло для регенерации растворителя.

Типовая технология химической абсорбции называется аминовой абсорбцией, которая имеет долгую историю и успешный опыт применения. Многие CCS-проекты используют метод химической абсорбции для улавливания CO_2 .

Физическая абсорбция использует разницу в растворимости (без химических реакций) в абсорбенте для физического улавливания компонентов целевого газа, включая CO_2 . Используют различные абсорбирующие вещества, в т.ч. метанол, пропиленгликоль и пропиленкарбонат. Указанную технологию в основном используют для производства химических продуктов на основе синтез-газа в качестве технологии очистки синтез-газа.

Физическая адсорбция при переменном давлении и химическая адсорбция при переменной температуре известны как типовые процессы отделения (разделения) CO_2 с помощью сорбентов. Адсорбция при переменном давлении (или сорбция) - это технология, при которой CO_2 физически адсорбируется в поры твердого сорбента. Как только давление снижается, адсорбированный CO_2 высвобождается.

Адсорбция при изменении температуры (или сорбция) представляет собой технологию, в которой CO_2 химически адсорбируется твердым сорбентом.

6.2.2 Мембранное разделение

Процесс мембранного разделения представляет собой технологию разделения газов, в которой используют различия в степени проницаемости мембран для компонентов газовой смеси. Поскольку в этом процессе CO_2 отделяется за счет использования в качестве движущей силы разницы давлений между входным газом, содержащим CO_2 , и стороной проникающего газа, для отделения CO_2 от газа высокого давления требуется очень мало энергии. Поэтому указанный процесс особенно эффективен, когда исходный газ находится под высоким давлением и содержит высокую концентрацию CO_2 .

Мембраны [см. рисунок 2 b)] представляют собой специально изготовленные материалы, обеспечивающие селективное проникновение газа через них. Селективность мембраны по отношению к различным газам тесно связана с природой материала. Для мембранного разделения обычно предпочтительны потоки газов при высоком давлении. Существует множество различных типов мембранных материалов (полимерных, металлических, керамических), которые могут найти применение в системах улавливания CO_2 для предпочтительного выделения H_2 из потока топливного газа, CO_2 из ряда технологических потоков или O_2 из воздуха, при этом отделенный O_2 впоследствии способствует получению высококонцентрированного газа. Хотя мембранное разделение в настоящее время находит множество коммерческих применений в промышленности (некоторые из них крупномасштабные, например отделение CO_2 от природного газа), его пока не применяли для систем улавливания CO_2 . В настоящее время во всем мире проводят исследования и разработки, направленные на производство наиболее подходящих мембранных материалов для улавливания CO_2 в крупных масштабах.

Блок-схема процесса мембранного разделения показана на рисунке 3. Для повышения степени улавливания применяют двухступенчатый процесс рециркуляции.

Процесс мембранной сепарации широко используют на нефтеперерабатывающих заводах, где исходный газ содержит высокую концентрацию (20%) CO_2 .

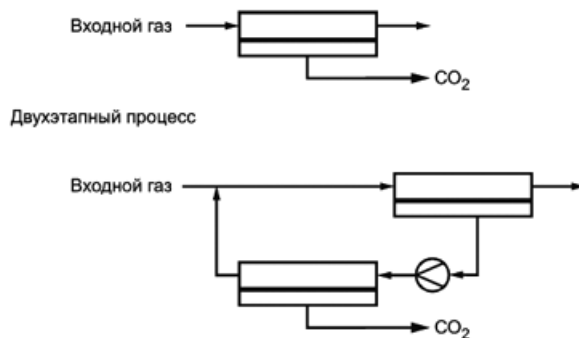


Рисунок 3 - Схема процесса мембранного разделения

6.2.3 Криогенное разделение

Газ можно превратить в жидкость, проведя ряд стадий сжатия, охлаждения и расширения. Компоненты газа в жидком состоянии можно разделить в испарительной или дистилляционной колонне. В случае с воздухом эта операция в настоящее время осуществляется в промышленных масштабах. Кислород можно отделить от воздуха по схеме, показанной на рисунке 2 с), и использовать в различных системах улавливания CO_2 (сжигание в кислороде и улавливание перед сжиганием). Криогенную сепарацию также можно использовать для отделения CO_2 от других газов. Процесс можно использовать для выделения примесей из потоков CO_2 относительно высокой чистоты, например при сжигании кислородсодержащего топлива, а также для удаления CO_2 из природного газа или синтез-газа, прошедшего конверсионное преобразование CO в CO_2 .

7 Улавливание CO_2 из продуктов сжигания (дымовых газов) в энергетике

Улавливание после сжигания (PCC) является важной фундаментальной технологией в контексте улавливания и хранения углерода (CCS). PCC - это процесс, при котором CO_2 отделяется от потока дымовых газов после сжигания.

Уголь является важным недорогим источником топлива для производства электроэнергии в различных регионах мира, особенно в развивающихся странах. PCC может оказаться критически важной технологией для минимизации выбросов CO_2 в этой отрасли.

7.1 Граница системы

Следует определить граничные условия для дальнейшего развития технологий и проектов PCC. Для установки PCC определены следующие границы:

- точка входа дымовых газов на установку PCC;
- точка выхода остаточных дымовых газов в атмосферу сверху абсорбера или на входном фланце отдельной трубы;
- точка выхода CO_2 в атмосферу в случае незапланированного нарушения цепочки транспортирования и/или хранения CO_2 ;
- конденсат дымовых газов;
- конденсат компрессора CO_2 ;
- деминерализованная вода, питьевая вода, вода для пожаротушения;
- дренажная система;
- воздух под давлением, инертный газ (например, азот);
- пар и паровой конденсат;

- подача и возврат охлаждающей воды;
- образование побочных продуктов и отходов (твердых и/или жидких);
- поставка абсорбентов.

7.1.1 Граница с системами транспорта и размещения CO₂

Границей между установкой РСС и системами транспортирования и хранения CO₂ является выходной фланец компрессора CO₂ для четкого разделения границ.

7.2 Технологии, оборудование и процессы

В настоящее время доступны или разрабатываются для РСС следующие технологические процессы:

- абсорбционные процессы с использованием химических растворителей;
- процессы адсорбции и мембранные процессы (см. раздел 6).

7.3 Потоки CO₂, потоки дымовых газов и выбросы, технологические процессы и отходы

7.3.1 Потоки дымовых газов

7.3.1.1 РСС с угольным котлом и газовой турбиной с комбинированным циклом с парогенераторами-утилизаторами

Состав дымового газа, который должен быть введен в установку РСС для улавливания CO₂, в значительной степени зависит от топлива, сжигаемого для выработки электроэнергии. В системах, работающих на угле, необходима релаксация процессов селективного каталитического удаления NO_x, удаления твердых частиц, а также обессеривание дымовых газов.

7.3.1.2 Установка по улавливанию (входной поток)

Потоки дымовых газов в контексте настоящего стандарта относят к дымовым газам, образующимся в результате сжигания ископаемого топлива и выбрасываемым из таких источников, как котлы и газовые турбины на тепловых электростанциях и котлы-утилизаторы на электростанциях.

В настоящее время на электростанциях установлены FGD-блоки, оборудование для удаления CO/NO_x, оборудование для сбора пыли и удаления примесей (загрязняющих веществ) согласно соответствующим правилам и требованиям. Дымовые газы после этих систем очистки могут быть использованы для выделения CO₂.

Свойства (состав, температура и примеси) дымовых газов, подаваемых на установку РСС, существенно различаются в зависимости от вида используемого топлива, типа электростанции и ее конфигурации.

При использовании угля состав примесей сильно различается в зависимости от его сорта и места добычи.

Основные характеристики дымовых газов электростанций: расход, температура, давление газа и состав (например, содержание N₂, O₂, CO₂, H₂O, NO_x, SO_x, NH₃, ртути, сажи, золы). Значение этих показателей может оказать влияние на конструкцию процесса улавливания CO₂.

Важно уточнить характеристики дымовых газов, подаваемых на установку РСС, с точки зрения надлежащей сравнительной оценки технологии и достижения высокой надежности, а также выполнения требований по выбросам и отходам.

Состав дымовых газов зависит от типа топлива, условий сжигания и ранее существовавших экологических технологий.

Ниже изложены параметры, которые следует уточнять и рассматривать на различных этапах реализации проекта:

- расход дымовых газов;
- температура дымовых газов;

- давление дымовых газов;
- состав дымовых газов с указанием содержания O_2 , CO_2 , H_2O , NO_x , SO_x , NH_3 , CO , твердых частиц.

7.3.1.3 Установка по улавлианию (выходной поток, очищенный газ)

Поскольку очищенные дымовые газы выбрасывают в атмосферу, необходимо подробно охарактеризовать выходящий поток.

Концентрация CO_2 в выходящем газовом потоке обычно составляет приблизительно 1%, однако это значение варьируется в зависимости от степени улавливания CO_2 из дымовых газов.

Ниже изложены параметры, которые должны быть уточнены и рассмотрены на различных этапах реализации проекта:

- расход газа на выходе;
- температура газа на выходе;
- давление газа на выходе;
- состав газа на выходе с указанием содержания O_2 , CO_2 , H_2O , NO_x , SO_x , NH_3 , CO , твердых частиц, летучих органических веществ, абсорбента, продуктов разложения абсорбента, органических соединений.

7.3.2 Состав потоков диоксида углерода

Потоки CO_2 относятся к газам, выходящим из регенератора и затем подвергающиеся компримированию. Характеристики потоков диоксида углерода включают расход, температуру, давление газа и состав (например, содержание N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O , NO_x , SO_x , углеводородов, компонентов растворителя).

Требования для уловленного CO_2 различаются в зависимости от дальнейшего использования. Давление при компримировании должно соответствовать требованиям трубопровода.

Для предотвращения повреждения оборудования из-за коррозии труб и образования газовых гидратов при охлаждении, необходимо строго контролировать концентрацию воды, кислорода, SO_x и NO_x . Для обеспечения надлежащего транспортирования и хранения CO_2 необходимо учитывать эти требования. В настоящее время отсутствуют общепризнанные нормы максимального содержания воды и кислорода.

Кислород удаляют путем каталитического окисления, основанного на реакции кислорода с избытком водорода. Процесс и соответствующее оборудование можно масштабировать.

Существует ряд подходящих технологий для дегидратации потока CO_2 . Системы на основе гликоля с использованием триэтиленгликоля и системы адсорбции с использованием молекулярных сит являются наиболее пригодными технологиями для внедрения. Процесс и соответствующее оборудование можно масштабировать.

Существует несколько жидких реагентов, доступных для использования в качестве дегидратирующей среды от различных поставщиков; триэтиленгликоль хорошо подходит для непрерывного процесса. Обедненный триэтиленгликоль, подаваемый в контактор, поглощает влагу из неочищенного газа CO_2 на внутренней поверхности насадки. Триэтиленгликоль с абсорбированной водой удаляется из контактора и направляется в блок регенерации для очистки путем нагревания и, при необходимости, для отпарки с получением обедненного триэтиленгликоля, и возвращается в контактор после охлаждения.

Относительно небольшие капитальные затраты/операционные расходы в целом и устойчивость к примесям в газах являются его достоинствами по сравнению с твердыми сорбентами. Однако следы триэтиленгликоля попадают в поток CO_2 .

В качестве твердых адсорбирующих агентов используют неорганический силикагель, активированный оксид алюминия и молекулярные сита. Требуются не менее двух адсорберов с неподвижным слоем, которые работают попеременно. Допускается использовать твердые адсорбционные системы, если требуется значительно более низкое содержание влаги.

Обычный процесс сжатия, такой как межступенчатое охлаждение с разделительными сосудами, снижает равновесное содержание влаги в газе и может разгрузить установку осушки, что приводит к уменьшению размеров систем осушки.

Ниже изложены параметры, которые должны быть уточнены и рассмотрены на различных этапах реализации проекта для потока CO₂:

- расход CO₂;
- температура CO₂;
- давление CO₂;
- состав потока с указанием содержания CO₂, O₂, H₂O, NO_x, SO_x, NH₃, летучих органических веществ, абсорбента, продуктов разложения абсорбента и др.

7.4 Процедура оценки эффективности установки для улавливания CO₂

Улавливание CO₂ из дымовых газов, выбрасываемых электростанциями, работающими на ископаемом топливе, которые являются крупными стационарными источниками, является эффективным средством сокращения выбросов парниковых газов. Однако его экономическая жизнеспособность еще не установлена, в настоящее время предпринимаются усилия для этого. Следует создать механизмы для облегчения обмена знаниями, полученными в ходе реализации CCS-проектов.

Разработка стандарта на метод оценки эффективности технологий улавливания CO₂ может помочь в достижении следующих целей технологий улавливания CO₂:

- содействие объективной оценки текущего состояния прогресса для лучшего понимания и обмена знаниями;
- содействие добросовестной конкуренции, не препятствуя техническому прогрессу;
- содействие развитию широкого применения.

7.4.1 Уточнение основы для оценки

Для проведения надлежащей сравнительной оценки необходимо уточнить исходные данные и определить основные показатели эффективности, поскольку сообщаемые цифры могут зависеть от конкретной площадки или технологии и, следовательно, должны быть нормализованы. Кроме того, должна быть определена методология оценки и применяться единообразно для каждого проекта.

Важно установить общий набор исходных данных. Вначале необходимо определить свойства дымовых газов, такие как расход, температура, давление и состав (например, содержание H₂O, CO₂, O₂, SO_x, NO_x, HCl и пыли). Затем следует определить качество обработанного потока дымовых газов и потока, выделенного CO₂ и составить общий перечень ресурсов, таких как пар, паровой конденсат, охлаждающая вода, электроэнергия, сжатый воздух, химикаты и промышленные газы.

Перед оценкой необходимо уточнить параметры производительности, влияющие на экономические показатели.

7.4.2 Основные характеристики

7.4.2.1 Эффективность улавливания CO₂ и общая масса улавливаемого CO₂

Эффективность улавливания CO₂ η_{CO_2} вычисляют по формуле

$$\eta_{CO_2} = \frac{(f_{CO_{2in}} - f_{CO_{2out}})}{f_{CO_{2in}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $f_{CO_{2in}}$ - массовый расход CO₂ на входе в установку улавливания CO₂, м³/ч, при нормальных условиях, вычисляемый по формуле

$$f_{\text{CO}_{2\text{in}}} = \frac{F_{\text{in}} \cdot \text{CO}_{2\text{in}}}{100}, \quad (2)$$

$f_{\text{CO}_{2\text{out}}}$ - массовый расход CO_2 на выходе из установки улавливания CO_2 , м³/ч, при нормальных условиях, вычисляемый по формуле

$$f_{\text{CO}_{2\text{out}}} = \frac{F_{\text{in}} \cdot \frac{1 - \text{CO}_{2\text{in}}}{100}}{1 - \frac{\text{CO}_{2\text{out}}}{100}} - F \cdot \left(\frac{1 - \text{CO}_{2\text{out}}}{100} \right), \quad (3)$$

где F_{in} - расход дымовых газов на входе из установки улавливания CO_2 , м³/ч, при нормальных условиях;

$\text{CO}_{2\text{in}}$ - концентрация CO_2 в дымовых газах на входе в установку улавливания CO_2 , % об.,

$\text{CO}_{2\text{out}}$ - концентрация CO_2 в дымовых газах на выходе из установки улавливания CO_2 , % об.

Общую массу выделенного CO_2 определяют следующим образом:

- общую массу выделенного CO_2 измеряют расходомером, установленным на линии CO_2 (до сжатия CO_2), с поправкой на условия эксплуатации W_A .

В случае оценки оперативных данных также рекомендуется проверить следующие расчеты:

- общую массу уловленного CO_2 , вычисленную со стороны абсорбента путем измерения концентрации растворенного CO_2 , г/л, и скорости потока абсорбирующего растворителя W_B ;

- общую массу уловленного CO_2 , вычисленную со стороны дымовых газов балансовыми расчетами со стороны газа по формулам (2) и (3) W_C .

Если разница между значениями, рассчитанными из W_A , W_B и W_C , находится в пределах допустимого уровня, баланс CO_2 поддерживается правильно.

7.4.2.2 Свойства уловленного CO_2 на выходе из системы сжатия CO_2

7.4.2.2.1 Чистота CO_2

В процессах химической абсорбции может быть достигнута концентрация CO_2 (в пересчете на сухой газ) 99% или более.

7.4.2.2.2 Концентрации примесей в CO_2

Уловленный CO_2 содержит влагу, кислород и азот как побочный продукт процесса абсорбции/десорбции. Качество CO_2 и содержание других веществ (H_2O , N_2 , O_2) следует определять с учетом требований к транспортированию и хранению/использованию. Условия, необходимые для дальнейшей обработки CO_2 , должны быть предоставлены организацией, ответственной за транспортирование и хранение. Если требования по содержанию влаги и кислорода со стороны транспортирования и за ее пределами слишком высоки для требований к системам улавливания и сжатия CO_2 , может потребоваться установка дегидрататора (системы удаления влаги) и/или системы удаления кислорода.

7.4.2.2.3 Давление CO_2 на выходе из компрессора

Необходима координация со стороной, занимающейся транспортированием CO_2 , в зависимости от способа транспортирования CO_2 и фактических требований к транспортированию. Давление и температуру на границе раздела оборудования для улавливания CO_2 с системой сжатия CO_2 рекомендуется определять в спецификациях компрессора CO_2 вместе с влиянием на оценку энергопотребления компрессора CO_2 .

7.4.2.2.4 Прочее

Улавливаемый CO_2 является конечным продуктом процесса улавливания и сжатия CO_2 , поэтому необходим контроль его качества.

7.4.3 Потребление энергетических ресурсов

7.4.3.1 Пар низкого и среднего давления

Пар, необходимый для процесса десорбции, поставляет электростанция или промышленная установка. Способ извлечения пара из пароводяного цикла зависит от условий эксплуатации. *В основном используют пар низкого давления, но в некоторых случаях необходимо использование пара среднего давления.*

Пар низкого (среднего) давления, необходимый для установки РСС, можно извлекать из пароводяного цикла на электростанции. Это требует модификации парового цикла электростанции и приводит к снижению эффективности электростанции. Если электростанция функционирует давно и ограничена возможность модификации или есть возможность избежать какого-либо воздействия на работу электростанции, можно установить дополнительный газовый или жидкотопливный котел с модифицированной существующей газовой турбиной открытого цикла с котлом-утилизатором для подачи пара низкого давления. Водяной конденсат РСС сбрасывается в конденсатную систему электростанции.

7.4.3.2 Потребляемая мощность

Для вращающихся механизмов, таких как насосы, воздуходувки, компрессоры, электродвигатели и/или паровые турбины, в качестве привода допускается использовать пар среднего или высокого давления. Когда выбран привод паровой турбины, выходящий пар снова используют в качестве пара низкого давления для установки РСС, при этом необходимо учитывать источник его подачи. При использовании электродвигателя возможен штраф за выработку электроэнергии, эквивалентный потреблению пара низкого давления, в зависимости от его потребления электроэнергии. В любом случае потребляемая мощность на валу варьируется в зависимости от модели и эффективности применяемого компрессора, а также от нагнетаемого давления.

Аммиачные системы обычно имеют более высокое давление регенерации, чем обычные аминовые системы. В результате конструкция и количество ступеней компрессора могут существенно различаться. Кроме того, более высокое давление всасывания снижает потребляемую мощность.

7.4.3.3 Хладогенты

В установке РСС используют хладогенты на нескольких стадиях, необходимое количество хладогента зависит от производительности и эффективности применяемого процесса. Температура подачи охлаждающей среды должна быть четко определена, т.к. это может повлиять на производительность процесса. Если нецелесообразно прямоточное водяное охлаждение, допускается использовать испарительные градирни или воздухоохладители. Если трудно обеспечить подачу воды, допускается применять вентилятор воздушного охлаждения.

В любом случае требуемая потребляемая мощность, используемая для обеспечения охлаждающей среды или требуемой охлажденной воды, должна быть включена в общую потребляемую мощность.

Интеграция отработанного тепла с использованием конденсата парового цикла в качестве охлаждающей среды в охладителях РСС приводит к снижению дополнительной нагрузки на охлаждение, связанной с работой РСС.

Пар, извлекаемый из парового цикла для регенерации растворителя, снижает потребность в охлаждении конденсатора турбины, тем самым частично компенсируя увеличение полезности охлаждения, требуемое установкой РСС.

7.4.3.4 Деминерализованная вода

В процессе РСС деминерализованная вода требуется для разбавления растворителя в том виде, в каком она получена с производства, для пополнения и поддержания щелочного раствора в соответствии с требованиями в процессе эксплуатации.

7.4.3.5 Абсорбент/растворитель и другие химические вещества

Следует учитывать различные типы химических веществ, включая абсорбенты, каустическую соду или другую щелочь, используемую для десульфурации, серную кислоту для нейтрализации аммиака, азот,

активированный уголь и водород, используемые при необходимости для раскисления, в зависимости от требований применяемого процесса. Абсорбенты, в частности, имеют большое экономическое значение из-за больших потребляемых объемов, в случае крупномасштабной установки РСС. Поэтому необходимо уточнить объем потребления, способ пополнения, способ транспортирования и разработать технологии, позволяющие минимизировать потребление.

7.4.4 Работоспособность (эксплуатационные требования)

Общие эксплуатационные требования приведены ниже.

7.4.4.1 Отслеживание нагрузки

Несмотря на то, что возможны различные сценарии экономической эксплуатации, установка РСС должна быть в состоянии справиться с мощностью источника дымовых газов (например, обеспечиваемого тепловой электростанцией) и в идеале не налагать на него никаких ограничений. Кроме того, установка РСС должна иметь возможность регулировать свою рабочую нагрузку в соответствии с требуемой максимальной скоростью нарастания нагрузки, например 5%/мин.

7.4.4.2 Работа с частичной нагрузкой

Требования к источнику дымовых газов могут быть необходимы для обеспечения работы установки РСС при частичной нагрузке. Должна быть обеспечена стабильная работа при заданной частичной нагрузке. Следует учитывать, что состав дымовых газов может значительно различаться при работе с частичной нагрузкой. Концентрация CO_2 в дымовых газах может изменяться по мере увеличения и уменьшения мощности агрегата. Кроме того, известно, что содержание NO_x в газовых турбинах может варьироваться.

7.4.4.3 Доступность

Определение доступности установки РСС приведено ниже, однако существуют различные способы ее выражения. Поскольку основное внимание уделяется эксплуатационной надежности, период периодического обслуживания, связанный с ремонтпригодностью, можно рассматривать отдельно.

$$\text{Доступность} = (1 - \text{FOR}) \cdot 100\%, \quad (4)$$

$$\text{Коэффициент аварийного простоя (FOR)} = \frac{\text{FOH}}{\text{POH}}, \quad (5)$$

где FOH - количество часов, в течение которых установка РСС не может обрабатывать дымовые газы от размещенной электростанции из-за неспособности установки РСС работать;

POH - общий календарный период работы установки РСС, исключая период технического обслуживания.

7.4.5 Индекс экономической оценки

Потребление ресурсов (потребление пара низкого давления и электроэнергии) оказывает большое влияние на экономические показатели установки РСС, оценка приведена ниже.

7.4.5.1 Удельное электропотребление для установки РСС

Удельное электропотребление SEC, которое относится к потреблению тепловой энергии, определяют по формуле

$$\text{SEC} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{T}_{\text{CO}_2}} \right] = \frac{\left(\text{Поток пара, } \frac{\text{T}}{\text{ч}} \cdot \text{Энтальпия пара, } \frac{\text{GJ}}{\text{T}} \right) - \left(\text{Поток восстановленного парового конденсата, } \frac{\text{T}}{\text{ч}} \cdot \text{Энтальпия конденсата, } \frac{\text{GJ}}{\text{T}} \right)}{\text{Захваченное количество } \text{CO}_2, \frac{\text{T}_{\text{CO}_2}}{\text{ч}}} \quad (6)$$

7.4.5.2 Удельное энергопотребление (SPC) для улавливания и сжатия CO_2

Удельное энергопотребление SPC для улавливания и сжатия CO_2 определяют по формуле

$$SPC, \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}_{\text{CO}_2} = \frac{\text{Потребляемая мощность установки ПСС, кВт}}{\text{Захваченное количество CO}_2, \text{ т}_{\text{CO}_2} / \text{ч}}. \quad (7)$$

Примечание - Энергопотребление установки ПСС включает компримирование CO₂ и сопутствующие энергетические ресурсы.

7.4.5.3 Штраф за выработку электроэнергии

Штраф за выработку электроэнергии EOP, представляет собой штраф за выработку единицы энергии для технологий ПСС, не зависящий от состава топлива.

$$EOP = \frac{\text{Штраф за эффективность}}{\text{Удельные выбросы топлива}}, \quad (8)$$

где EOP - общие чистые потери в выпуске продукции из-за установки ПСС, как указано в формуле (9), кВт·ч / т_{CO₂}.

Штраф за эффективность вычисляют на основе извлеченной информации о паре, тепловом балансе паровой турбины и потребляемой вспомогательной энергии, необходимой для установки ПСС, кВт·ч/кВт·ч;

Удельные выбросы топлива рассчитывают только на основе информации о топливе, т_{CO₂}/кВт·ч.

$$EOP = \frac{1000 \cdot (\text{Потеря полной выходной мощности, МВт} + \text{Энергопотребление установки ПСС, МВт})}{\text{Захваченное количество CO}_2, \text{ т}_{\text{CO}_2} / \text{ч}}. \quad (9)$$

Поэтому потери мощности паротурбинного генератора за счет пара, отобранного из паровой турбины, и удельную стоимость пара следует оценивать по данным теплового баланса паровой турбины. При определении удельной стоимости пара с целью проведения экономической оценки необходимо учитывать эффективность и эксплуатационные ограничения электростанции.

Разработка высокоэффективных сверхкритических тепловых электростанций и установок газового комбинированного цикла с очень низким уровнем загрязняющих веществ, таких как NO_x, SO_x и твердые частицы, делает использование таких установок улавливания гораздо более устойчивым.

Стоимость единицы пара, основанная на индивидуальной конфигурации, потребуется для расчета эксплуатационных расходов.

7.4.5.4 Приведенная стоимость электроэнергии

Для проведения комплексной экономической оценки, включая инвестиционные затраты, необходимо учитывать приведенную стоимость электроэнергии, стоимость предотвращения выбросов CO₂ и затраты на улавливание CO₂. Затраты на предотвращение выброса CO₂ оценивают по всей цепочке CCS; также учитывают увеличение потребления ресурсов установкой CCS, которая производит дополнительные выбросы CO₂. Поскольку в оценку этих трех параметров включают различные экономические параметры, характерные для конкретной площадки, такие как инвестиционные затраты, затраты владельца, затраты на техническое обслуживание, стоимость топлива, ставка дисконтирования и т.д., сообщается, что существуют значительные различия в методах, используемых разными организациями, для оценки стоимости систем CCS для электростанций, работающих на ископаемом топливе. Такие различия не всегда доступны в публикациях по оценке затрат на CCS. Поэтому для оценки необходимо разработать отдельный стандарт.

7.5 Вопросы безопасности

В целом объекты и оборудование, предназначенные для соответствующей технологии улавливания, должны быть спроектированы и построены в соответствии с действующими и применимыми международными, региональными и национальными стандартами, такими как ICO, OSHA и ASME и др. Кроме того, соблюдение законов, правил и требований в регионе или стране, где расположен завод, обеспечивает дополнительные гарантии безопасности.

Вопросы безопасности, связанные с технологиями CCS, различаются в зависимости от процессов

улавливания и применяемых химических веществ. Некоторые передовые примеры перечислены ниже.

7.5.1 Критерии безопасности химических веществ

Критерии безопасности для химических веществ включают токсичность (например, острая токсичность, способность к накоплению, генетическая токсичность и канцерогенность), взрывоопасность и воспламеняемость.

7.5.1.1 Токсичность

Растворы аммиака и амина могут нанести вред при контакте с кожей или при вдыхании. Существуют хорошо известные протоколы безопасного обращения с этими веществами. Некоторые нитрозамины, образующиеся при взаимодействии аминов с NO_2 , обладают токсичностью или, возможно, канцерогенностью для человека.

7.5.1.2 Взрывоопасность и воспламеняемость

Хотя водные растворы аммиака и аминов не являются взрывоопасными или самовоспламеняющимися по своей природе, абсорбенты в чистом виде имеют низкие температуры кипения и высокие температуры самовоспламенения.

Типичные рабочие условия в РСС на несколько сотен градусов ниже, чем температура самовоспламенения. Это следует учитывать при работе с указанными соединениями, при проектировании системы улавливания CO_2 и настройке условий ее работы. Такие риски снижаются или устраняются при использовании водных растворов, поскольку они не воспламеняются, пока уровень концентрации поддерживается ниже определенного уровня.

7.5.2 Оборудование

Считается, что следующее оборудование и его применение представляют угрозу безопасности в системе улавливания CO_2 в случае возникновения проблем.

7.5.2.1 Предварительные скрубберы

Предварительные скрубберы - это защитное оборудование, которое при необходимости снижает содержание газов SO_2 до очень низкого уровня, используя щелочь (NaOH и др.). С оборудованием следует обращаться осторожно, т.к. в нем используется концентрированная щелочь. Кроме того, из-за тяжелых металлов, таких как ртуть, одновременно выделяемых из дымовых газов, очистка сточных вод должна соответствовать национальным стандартам.

7.5.2.2 Абсорбер

В зависимости от природы используемого абсорбента незначительная часть абсорбентов или их компонентов выбрасывается с дымовым газом в виде газа и/или тумана из абсорбера. Большие порции тумана можно удалить с помощью демистора, установленного внутри абсорбера, или водяного скруббера. Присутствие SO_3 -аэрозолей субмикронных размеров приводит к увеличению выбросов аминов из поглотителя.

Окислительное разложение аминов под действием кислорода в дымовых газах вызывает образование и накопление аммиака, альдегидов, аминов и их полимеризованных форм, а также кислот (муравьиной и щавелевой кислот) в абсорбентах, а некоторые из них выбрасываются с дымовым газом из верхней части абсорбера. Амины и продукты их разложения в абсорбентах реагируют с NO_2 с образованием нитраминов и нитрозаминов, которые накапливаются в абсорбентах. Следы нитрозамина и нитрамина *могут выбрасываться* с дымовым газом на выходе из абсорбера.

Для системы на основе аммиака разложение растворителя не наблюдалось. Аммиак, находящийся в равновесии с очищенным дымовым газом, покидает абсорберы, улавливается при промывке и нейтрализуется серной кислотой в нагревателе прямого контакта перед выбросом в атмосферу.

7.5.2.3 Водяной скруббер

Водяной скруббер устанавливают при необходимости в зависимости от абсорбента, используемого для удаления газов и туманов, таких как аммиак и амины, с использованием воды или кислоты для уменьшения и/или восстановления выбросов этих веществ.

7.5.2.4 Теплообменник

Высокая температура внутри теплообменника приводит к образованию и накоплению продуктов термического разложения абсорбента. Когда абсорбент направляется обратно в абсорбер и контактирует с дымовым газом, часть продуктов термического разложения может выбрасываться в атмосферу через выход из абсорбера вместе с дымовым газом. Они также могут смешиваться с захваченным CO₂. В процессах с аммиаком не наблюдалось разложения растворителем.

7.5.2.5 Системы очистки сточных вод

Сточные воды, производимые системами улавливания CO₂, подпадают под действие правил и требований к очистке сточных вод, применимых к химическим производствам/электростанциям. Обычно сточные воды из абсорбера CO₂ отсутствуют, если не применяют кислотную промывку.

7.5.2.6 Системы побочных продуктов

Системы с аммиаком производят раствор сульфата аммония при взаимодействии остаточного аммиака в дымовых газах с серной кислотой.

7.5.2.7 Компрессорные системы CO₂

С помощью компрессора улавливаемый из дымовых газов CO₂ сжимается в несколько ступеней до заданного давления. Компрессор оснащен выбивными сосудами, теплообменниками. Количество и размер этого оборудования в основном зависят от давления всасывания.

Компрессорная установка часто оснащена кожухом для снижения шума. Большое количество высококонцентрированного CO₂ высвобождается за пределы системы во время обычных рабочих остановов, а также аварийных остановов. В таких случаях важно, чтобы CO₂ выбрасывался в атмосферу из безопасного места. Кроме того, должна быть обеспечена безопасность персонала в случае выбросов CO₂. Следует принять контрмеры на случай выброса CO₂ под высоким давлением, т.к. это может вызвать замерзание и закупорку.

7.5.2.8 Трубы, резервуары для хранения растворителей и др.

Трубы и резервуары для хранения растворителей в системах улавливания CO₂ подпадают под действие существующих правил и требований.

7.5.3 Химические вещества и их поведение

Химические вещества и их поведение, которые следует учитывать в целях обеспечения безопасности, рассмотрены ниже. В таблице 2 приведен перечень основных веществ с номерами CAS (исключая вещества, образующиеся в результате разложения в атмосфере).

Таблица 2 - Соединения, которые могут присутствовать в выбросах установки РСС

Класс	Соединение	Номер CAS
Абсорбенты	Моноэтаноламин (MEA)	141-43-5
	Диэтаноламин (DEA)	111-42-2
	2-амино-2-метил-1-пропанол (AMP)	124-68-5
	Пиперазин	110-85-0
	N-метилдиэтаноламин (MDEA)	105-59-9
Амины	аммиак	7664-41-7
	Этиламин	75-04-7
	Метиламин	74-89-5
	Диметиламин	124-40-3
	Диэтиламин	109-89-7
	N-метилэтиламин	624-78-2
	1-пропиламин	107-10-8

	1,2-этилдиамин	107-15-3
Амиды	Формаимид	75-12-7
	Ацетамид	60-35-5
	N-(2-гидроксиэтил)формаимид	693-06-1
	N-(2-гидроксиэтил)ацетамид	142-26-7
	N-метилформаимид	123-39-7
Альдегиды	Формальдегид	50-00-0
	Ацетальдегид	75-07-0
	2-аминоацетальдегид	6542-88-7
	Гидроксиацетальдегид	141-46-8
Спирты	Этиловый спирт	64-17-5
	1,2-этандиол	107-21-1
Кислоты	Муравьиная кислота	64-18-6
	Уксусная кислота	64-19-7
	Пропановая кислота	79-09-4
	Бутановая кислота	107-92-6
	Гликолевая кислота	79-14-1
Нитрозамины	N-нитрозодиметиламин (NDMA)	62-75-9
	N-нитрозодиэтиламин (NDEA)	55-18-5
	N-нитрозоморфолин (NMor)	59-89-2
	N-нитрозопиперидин (NPip)	100-75-4
	N-нитрозодиэтанолламин (NDELA)	1116-54-7
	N-нитрозопиперазин (NPz)	5632-47-3
	1,4-динитрозопиперазин	140-79-4

7.5.3.1 Химические вещества

Как указано в 7.5.2.2, некоторые летучие вещества, содержащиеся в абсорбентах, могут выбрасываться в атмосферу вместе с дымовым газом в виде газа или тумана и в результате могут смешиваться с захваченным CO₂. То же самое относится и к добавкам в абсорбенты (например, антиоксиданты).

7.5.3.2 Продукты разложения

Большинство веществ с низкой летучестью выбрасываются из регенератора. Однако легколетучие вещества могут выбрасываться в атмосферу с дымовыми газами в виде газа или тумана и могут смешиваться с захваченным CO₂.

7.5.3.3 Термостабильные соли

Термостабильные соли обычно имеют низкое давление паров и менее склонны к испарению. Большая их часть выбрасывается из регенератора в виде отходов.

7.5.3.4 Нитрозамины

Некоторые нитроамины обладают острой токсичностью и/или возможной канцерогенностью. Среди нитроаминов, которые могут образовываться в системах улавливания CO₂, N-нитрозодиметиламин относится к категории вероятной канцерогенности высокого класса, и имеется множество данных о случаях, связанных с острой токсичностью, генетической токсичностью и/или вероятной канцерогенностью. Существует много типов нитроаминов, которые могут быть получены в системах улавливания CO₂. Не все из них потенциально могут обладать острой токсичностью и/или вероятной канцерогенностью. Если данные о токсичности недоступны, с веществом следует обращаться исходя из предположения, что оно обладает токсичностью.

7.5.3.5 Нитрамины

Имеется очень мало данных о рисках острой токсичности, генетической токсичности и/или канцерогенности, также остается неясной вероятность степени риска. Основная цель в будущем - сбор данных. В настоящее время в некоторых случаях может проводиться оценка токсичности, идентичная оценке нитроаминов, которую считают консервативной оценкой риска.

7.5.3.6 Кислые газы (SO_x , NO_x , CO_2), содержащиеся в дымовых газах, тяжелые металлы (ртуть и др.)

Дымовые газы и твердые частицы, выбрасываемые тепловыми электростанциями, обрабатывают в соответствии с правилами, действующими в стране и регионе. В частности, кислые газы и частицы сокращаются до норм или ниже с помощью оборудования для удаления NO_x , оборудования для десульфурации дымовых газов и оборудования для улавливания пыли. Если оборудование не установлено, в систему улавливания CO_2 попадают высокие концентрации NO_x и SO_x . Большую часть SO_x можно удалить предварительным скруббером. Для аминовых систем обычно NO_2 может реагировать с растворителем с образованием нитраминов и нитрозаминов.

Высоколетучие тяжелые металлы, такие как ртуть, полностью не удаляются перед поступлением в оборудование для десульфурации дымовых газов, некоторые из них собираются и накапливаются в предварительном скруббере РСС. Если они не собираются предварительным скруббером, то попадают в систему улавливания CO_2 и накапливаются в абсорбентах. В зависимости от уровней концентрации эти легколетучие тяжелые металлы, если они попадут в систему улавливания CO_2 , могут негативно повлиять на ее работу, и в будущем за их поведением следует внимательно следить.

7.5.3.7 Высококонтрированный CO_2

Концентрация CO_2 , выходящего из регенератора, может составлять 99% или выше после удаления влаги, и существует риск утечки из труб, когда он направляется к компрессору. Когда большое количество высококонтрированного CO_2 должно быть выброшено за пределы системы во время обычных или аварийных остановов, в некоторых случаях может потребоваться моделирование процессов диффузии с целью безопасности.

7.5.3.8 Безводный аммиак

Безводный аммиак служит хладагентом в установках РСС на основе аммиака. Безводный аммиак является опасным, но широко доступным химическим веществом с хорошо известной методологией проектирования и обращения с ним. Это химическое вещество обычно используют на электростанциях в установках селективного каталитического восстановления.

7.5.3.9 Серная кислота

Серную кислоту используют для нейтрализации остаточного растворителя в установках РСС на основе аммиака. Серная кислота является опасным, но широко доступным химическим веществом с хорошо известной методологией проектирования и обращения с ним. Это химическое вещество обычно используют на электростанциях для очистки воды.

7.5.4 Оценка воздействия на окружающую среду

Для установки системы РСС на электростанции, работающей на ископаемом топливе, или на другом промышленном предприятии, в соответствии с требованиями местных правил и стандартов необходимо провести оценку воздействия на окружающую среду для получения разрешений на строительство и эксплуатацию.

Эта оценка необходима для определения прямых выбросов растворителя и продуктов разложения растворителя из системы РСС, а также токсичных веществ, образующихся в атмосфере в результате выброса растворителя и продуктов его разложения в результате фотохимических реакций.

В то время как нитрозамины склонны к разложению в результате химических реакций в атмосфере, нитрамины считаются относительно стабильными.

Необходимо заблаговременно установить методы оценки воздействия на окружающую среду для выбросов аминов. Что касается норм выбросов, следует отметить, что уровни выбросов на выходе установки РСС представляют большой интерес, поскольку общее воздействие установки РСС на окружающую среду в будущем станет ключевым моментом.

Следует оценить и определить пределы выбросов для жидких и газообразных веществ, образующихся в результате использования растворителя в процессе абсорбции/десорбции. В связи с фактическим отсутствием коммерческих установок РСС установленный набор требований к таким установкам пока отсутствует.

При проектировании также необходимо учитывать следующие воздействия на окружающую среду, основанные на информации для аналогичных установок, работающих с аналогичными химическими веществами:

- утечки/разливы растворителя в транспортной цепочке на/от установки PCC;
- возможная утечка/выброс других веществ, используемых в процессе;
- внешние воздействия, например землетрясение, ветер, дождь, наводнение.

7.6 Вопросы надежности

7.6.1 Необходимость оценки надежности

Принимая во внимание безотлагательность применения CCS в качестве технологии снижения выбросов парниковых газов, отмечается необходимость перехода на более высокую скорость превращения крупномасштабных CCS в полноценный энергетический вариант.

Как правило, быстрое внедрение таких технологий может сопровождаться устойчивыми техническими проблемами, вызывающими, например, существенные проблемы с надежностью и обслуживанием, для решения которых требуется некоторое время.

В то время как воздействие на небольших установках может быть ограниченным, обсуждаются крупномасштабные установки CCS (3000 т/сут~5000 т/сут.), основанные на технологии аминов, которые могут столкнуться с серьезными проблемами, такими как утечка абсорбента, вызванная коррозией, что приводит к увеличению затрат на покупку сменного абсорбента и утилизацию остатков абсорбента. В случае аммиака в качестве товарного химического вещества его замена обходится дешевле. Тем не менее такие проблемы могут быть решены с помощью исследований и разработок, длительного коммерческого опыта эксплуатации установок среднего размера и результатов долгосрочных демонстрационных испытаний.

Надежность играет ключевую роль в экономической эффективности систем. Таким образом, обеспечение высокой эксплуатационной готовности оборудования имеет жизненно важное значение для поддержания конкурентоспособности затрат. Полноразмерные заводы настолько велики и дороги, что владелец, действующий в коммерческой среде, не может допустить технических сбоев.

Поскольку эксплуатационная надежность в значительной степени является результатом надежности конструкции (зрелости технологии) рекомендуется, чтобы оценка и анализ надежности конструкции выполнялись как можно раньше, например при выборе технологии.

7.6.2 Эксплуатационная надежность

Надежность определяется как способность элемента выполнять требуемую функцию в заданных условиях окружающей среды и эксплуатации и в течение установленного периода времени. Наиболее часто используемым параметром надежности является эксплуатационная готовность.

а) Надежность обычно измеряется как среднее время наработки на отказ (MTBF), которое показывает, как часто происходят простои.

Среднее время безотказной работы=общее количество часов работы/количество отказов.

б) Ремонтпригодность обычно измеряется как среднее время ремонта (MTTR), которое показывает, насколько быстро оборудование может быть доступно после отказа.

с) Доступность связана с надежностью и техническим обслуживанием и обычно выражается формулой

$$\text{Эксплуатационная доступность} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MDT}), \quad (10)$$

где среднее время простоя MDT включает MTTR и другое время, связанное с простоем, например периодическое техническое обслуживание, профилактический осмотр и ремонт, включая логистические задержки.

7.6.3 Методы оценки надежности

Для оценки и повышения надежности проектов были предложены различные методы количественной

оценки. В данном случае количественная оценка определяется как процесс предоставления доказательств того, что технология будет функционировать в определенных пределах или в рабочем режиме с приемлемым уровнем достоверности. Для проведения оценки необходим высокий уровень понимания и знаний о процессах и оборудовании. Конструкции систем следует рассматривать с точки зрения надежности, чтобы удовлетворить минимальным требованиям, поскольку крупномасштабные коммерческие системы ПСС не имеют достаточного опыта работы, поэтому нелегко установить сценарии сбоев, связанные с процессами ПСС.

Предлагаются различные методы оценки, в том числе исследования надежности и технического обслуживания (RAM). Однако для проведения исследования RAM недостаточно данных. Поэтому, исходя из предположения, что система ПСС представляет собой набор оборудования с проверенной репутацией, оценка будет проводиться на основе данных о механических и электрических неисправностях, собранных из практики химических предприятий. В результате этого критическое оборудование с отсутствием резервирования играет существенную роль в надежности процесса. Это, в свою очередь, связано с высокой стоимостью и ограниченным наличием очень надежного оборудования для установки резервного оборудования.

Данные будут основаны на исследованиях и разработках производителей, пилотных демонстрациях и опыте эксплуатации. Чтобы понять или существенно улучшить надежность, доступность и ремонтпригодность, желательно иметь доступ к точным и надежным данным, документирующим факторы, снижающие надежность и доступность на крупных коммерческих предприятиях. В настоящее время не существует формальных механизмов получения этого без прямого контакта с поставщиком технологий.

7.7 Система управления

Для каждого ПСС рекомендуется подготовить идентификацию и оценку аспектов, связанных с охраной окружающей среды и обеспечением безопасности. Ключевыми элементами системы управления охраной окружающей среды и обеспечением безопасности являются проверка производительности системы. Для всех аспектов необходимо учитывать правовые требования, риски и меры по смягчению возможных последствий.

Ниже приведены примеры ключевых элементов системы охраны окружающей среды и обеспечения безопасности.

a) Аспекты охраны окружающей среды и обеспечения безопасности.

b) Экологические аспекты:

Аварии/инциденты с воздействием на окружающую среду:

- для всех систем должны быть идентифицированы возможные аварии;
- особое внимание компрессорной системе (утечка газа).

Потребление энергии - первичная/вторичная энергия:

- должна быть установлена инвентаризация энергопотребления (если возможно, должно применяться управление энергопотреблением);
- должна быть оптимизирована изоляция.

Потребление ресурсов:

- оптимизация расхода топлива (эффективность установки);
- расход абсорбентов должен быть сведен к минимуму;
- оптимизация расхода материалов;
- оптимизация компоновки.

Использование воды (свежая/сточная вода):

- оптимизация потребности в охлаждающей воде.

Использование земли:

- оптимизация площади завода.

Утилизация/управление отходами:

- оптимизация использования абсорбента.

Выбросы в атмосферу:

- амины и образующиеся продукты реакции;
- снижение выбросов загрязняющих веществ NO_x , SO_x , PM , NH_3 .

Утилизация опасных отходов:

- осадок из регенератора, выгруженный абсорбент.

Уровень шума:

- концепция шума.

Загрязнение почвы:

- доставка и хранение химических реагентов;
- сценарий утечки;
- разливы при авариях (вода при тушении пожаров и т.д.).

с) Аспекты опасности для здоровья и безопасности:

Качество воздуха, т.е. пыль, кондиционирование воздуха, недостаточная вентиляция:

- вентиляция абсорбера/десорбера (регенератора).

Опасность утечки газа:

- обнаружение утечек газа (например, CO_2);
- подбор материалов и оборудования.

Опасные вещества, например, канцерогены:

- воздействие аминов на рабочие зоны;
- изоляционные материалы при строительстве.

Опасность установок и оборудования:

- разливы и аварии.

Работа с опасными материалами или рядом с ними:

- осадок из регенератора;
- подача аминов;
- лаборатория;
- анализ опасностей, связанных с безопасностью и работоспособностью.

8 Улавливание CO_2 перед сжиганием в энергетике

8.1 Общие положения

Улавливание перед сжиганием представляет один из методов улавливания CO_2 . Принципиальная схема процесса представлена на рисунке 4.

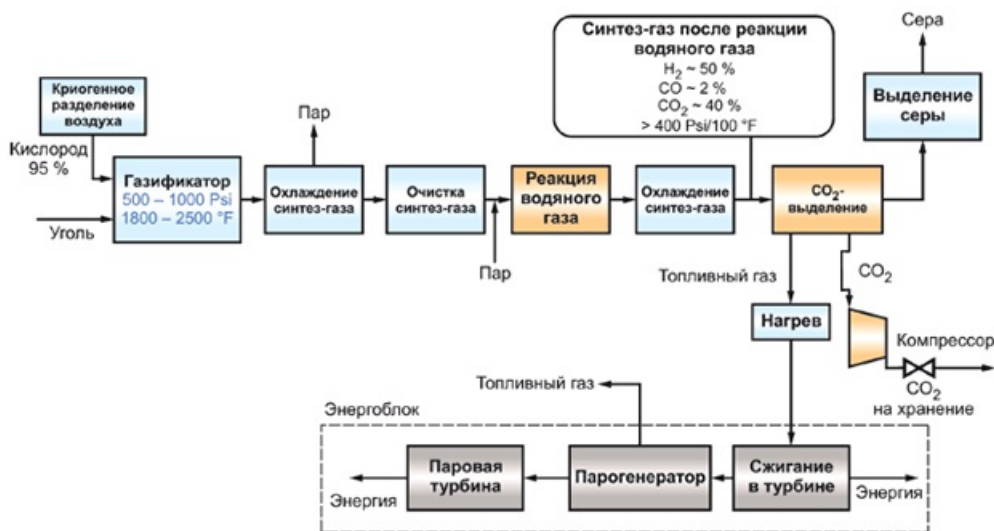


Рисунок 4 - Схема улавливания CO_2 перед сжиганием в энергосистеме с комбинированным циклом, интегрированной с газификацией угля

В энергосистеме с комбинированным циклом, интегрированной с газификацией угля (IGCC), газификатор преобразует уголь, биомассу, нефтяной кокс или природный газ в синтез-газ, состоящий в основном из монооксида углерода (CO) и водорода (H_2). В проектах IGCC обычно используют газификаторы с неподвижным и псевдоожиженным слоями. В настоящее время несколько конструкций газификаторов достигли стадии, когда они являются жизнеспособными кандидатами для крупномасштабного производства электроэнергии и, следовательно, кандидатами для систем улавливания углекислого газа перед сжиганием.

8.2 Граница системы

Граница системы проведена по всему комплексу IGCC. Это необходимо, потому что добавление стадии выделения CO_2 к IGCC влияет на работу каждого блока электростанции.

8.3 Технологии, оборудование и процессы

8.3.1 Определение степени улавливания CO_2

Количество CO_2 , уловленного из синтез-газа, в значительной степени определяется степенью конверсии монооксида углерода в реакторах для реакции водяного газа и эффективностью удаления диоксида углерода абсорбером блока удаления кислых газов. Теоретически степень улавливания можно контролировать, изменяя скорость реакции водяного газа.

Для большинства конструкций газификаторов конверсия около 96% монооксида углерода достигается за счет использования двухступенчатой схемы. Установка с одной ступенью приведет к умеренной конверсии.

8.3.2 Процесс улавливания CO_2

Основное внимание уделено компонентам процесса, необходимым для CCS при улавливании перед сжиганием, а именно реакции водяного газа и удалению кислых газов.

8.3.2.1 Реакция водяного газа

8.3.2.1.1 Реакция водяного газа

Реакция водяного газа представляет собой процесс, при котором синтез-газ подают непосредственно в реактор для преобразования CO в CO_2 . В реакторе к синтез-газу, содержащему такие компоненты, как H_2S и COS , добавляется пар, а затем монооксид углерода превращается в CO_2 на сульфурированном катализаторе по реакции конверсии водяного газа ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$, $\text{COS} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2$).

Конверсия обычно осуществляется в диапазоне температур от 200°C до 480°C . При использовании кобальт-молибденового катализатора реактор конверсии обычно располагается после водяного скруббера. Синтез-газ насыщается водой при температуре от 230°C до 260°C , в зависимости от условий газификации и

количества рекуперации тепла. Чтобы избежать повреждения катализатора водой, синтез-газ в скруббере повторно нагревают от температуры насыщения до более высокой температуры на 15°С-30°С.

Одним из преимуществ реакции кислой конверсии является то, что она превращает COS и другие органические соединения серы в H₂S, что облегчает удаление серы на последующих этапах. В результате синтез-газ, обработанный по реакции водяного газа, не требует отдельного процесса гидролиза COS, что позволяет упростить конфигурацию технологической схемы. Кроме того, использование реакции водяного газа снижает потребность в энергии.

Опыт сочетания конверсии водяного газа и физической абсорбции подтвердил, что уменьшение количества подаваемого пара может значительно повысить эффективность выработки электроэнергии. Однако чрезмерное снижение подачи пара может вызвать вторичные реакции в дополнение к реакции конверсии CO и привести к снижению прочности катализатора из-за углеродистых отложений. Поэтому важно определить оптимальные условия эксплуатации.

После прохождения через реактор конверсии газ, обогащенный CO₂, направляется в оборудование для удаления H₂S, а затем в абсорбер CO₂ для отделения и извлечения CO₂ высокой чистоты.

8.3.2.1.2 Обессеривание

В реакции обессеривания соединения серы, такие как H₂S и COS, удаляют из синтез-газа заранее, затем очищенный газ подают в реактор конверсии водяного пара.

При обессеривании реакция конверсии осуществляется после того, как синтез-газ охлаждается и направляется в оборудование для удаления H₂S. В ходе этого процесса вся влага, полученная в водяном скруббере, конденсируется. По этой причине весь пар, необходимый для реакции конверсии в реакторе обессеривания, должен вводиться и нагреваться. Напротив, в процессе кислой конверсии влагу, полученную в водяном скруббере, можно использовать для реакции конверсии, что приводит к снижению расхода пара.

В процессе обессеривания системы удаления H₂S и CO₂ расположены соответственно до и после реактора конверсии. Обычно в качестве метода удаления используют физическую абсорбцию и химическую абсорбцию (см. 8.3.2.2).

8.3.2.2 Выделение кислых газов

8.3.2.2.1 Физическая абсорбция

При физической абсорбции CO₂ (и H₂S) поглощаются абсорбентом под высоким давлением. Десорбция достигается за счет снижения давления. Физическое поглощение относительно легко масштабировать. Требуемая энергия для физической абсорбции намного меньше, чем для химической абсорбции, используемой при улавливании после сжигания.

Согласно закону Генри при равновесии и данной температуре количество растворенного вещества прямо пропорционально его парциальному давлению в газе. Поскольку CO₂ имеет высокое парциальное давление в синтез-газе, для его улавливания идеально подходит физическая абсорбция.

После реакции сдвига процесс физической абсорбции можно организовать в два этапа. На первом этапе предпочтительно удаляют H₂S, а на втором этапе удаляют CO₂. Примеры абсорбентов, используемых для физической абсорбции, включают метанол и диметилловые эфиры полиэтиленгликоля.

8.3.2.2.2 Химическая абсорбция

При химической абсорбции CO₂ поглощается растворителем в результате химической реакции и десорбируется при нагревании растворителя. Одним из преимуществ является его легкое масштабирование. Он также хорошо подходит для разделения компонентов газа с низкой концентрацией. Недостатки метода: требуется большое количество энергии и существует риск того, что некоторые химические вещества, содержащиеся в абсорбенте, могут попасть в окружающую среду.

В качестве растворителей для химической абсорбции CO₂ из потоков синтез-газа высокого давления в процессах улавливания перед сжиганием используют алканолминовые растворители и растворители на основе горячего карбоната калия. Поскольку выделение CO₂ происходит за счет протекания химических реакций, то этот метод позволяет высокоселективно отделять CO₂ и меньше абсорбировать углеводородов,

например метана. Также метод позволяет выделять CO_2 даже при его низком парциальном давлении.

8.3.2.2.3 Другие технологии улавливания CO_2

Мембранное разделение - это технология, использующая более высокую скорость проникновения CO_2 через полимерную или другую мембрану для отделения и улавливания CO_2 . При короткоцикловой адсорбции CO_2 поглощается адсорбентом под высоким давлением и десорбируется при низком давлении для улавливания CO_2 из технологического газа. В настоящее время ни одна из технологий не имеет широкомасштабного применения для улавливания CO_2 . Другие потенциальные усовершенствования систем улавливания перед сжиганием находятся на различных стадиях технической готовности, хотя ни одно из них не может считаться коммерческим. Ряд альтернативных концепций, включающих растворители, сорбенты и передовые мембранные процессы, находятся в стадии разработки.

8.4 Потоки диоксида углерода, газовые потоки и выбросы, технологические процессы и отходы

Приведена информация о газовых потоках и других выбросах из систем улавливания CO_2 , а также сведения о жидких и твердых отходах, включая абсорбенты.

Ниже описаны три основных типа газовых потоков, выходящие из систем улавливания CO_2 :

- a) потоки CO_2 - CO_2 , улавливаемые системой улавливания CO_2 для последующего транспортирования или другого конечного использования;
- b) потоки синтез-газа - синтез-газ после отделения и улавливания CO_2 в основном используется для производства электроэнергии;
- c) отходы - отходы, образующиеся в результате работы системы улавливания CO_2 .

Перечень потенциальных отходов включает твердые вещества, жидкости, взвеси/шламы, отходящие газы, избыток CO_2 , отработанные абсорбенты и др.

8.4.1 Потоки CO_2

Потоки CO_2 - потоки газа, выделенные в процессе улавливания CO_2 , где CO_2 является основным компонентом.

Чистота, допустимое содержание примесей, температура и давление потоков CO_2 приведены ниже.

8.4.1.1 Чистота потоков CO_2

Чистота потоков CO_2 зависит от конечного использования. Как правило, требуются потоки CO_2 высокой чистоты. В случае улавливания CO_2 это требование в значительной степени определяется требованиями к транспорту (т.е. трубопроводу) и требованиями/стандартами нагнетательных скважин. Когда улавливание CO_2 осуществляется путем химической абсорбции, CO_2 избирательно поглощается в результате химической реакции и очень мало растворяет другие газы, такие как азот и CO . Напротив, на физическое поглощение влияет парциальное давление компонентов газа. N_2 , H_2 и другие компоненты могут поглощаться в зависимости от их парциального давления и их сродства к абсорбенту. Таким образом, правила и разрешительные требования к значениям содержания примесей могут повлиять на процесс улавливания CO_2 , увеличивая энергию, необходимую для улавливания CO_2 .

Существуют два взаимосвязанных аспекта:

- a) минимальная чистота CO_2 , необходимая для поддержания однофазного потока в интересующих условиях;
- b) допустимая концентрация конкретных примесей.

Аспект b) особенно сложный, поскольку допустимые концентрации варьируются в зависимости от комбинации присутствующих примесей. Руководство по чистоте может определяться требованиями, установленными при транспортировании или хранении, а также разрешениями/правилами.

8.4.1.2 Допустимое содержание примесей в потоках CO₂

В контексте проектирования систем и оборудования CCS содержание примесей влияет не только на проектирование систем транспортирования и хранения CO₂, но также на выбор и проектирование систем улавливания CO₂. Ожидается, что во многих странах ограничения на содержание примесей будут установлены в соответствии с требованиями разрешения на закачку.

Присутствие примесей влияет на конструкционные материалы оборудования, трубопроводов и сопутствующей арматуры. Примеси также изменяют физические свойства CO₂ при транспортировании. Необходимо установить допустимые значения для токсичных газов, таких как H₂S и CO, а также влаги, чтобы предотвратить возникновения проблем с коррозией, конструкция системы должна соответствовать таким значениям.

CO₂, полученный выделением перед сжиганием, обычно содержит от 1% до 2% H₂ и CO и очень небольшое количество H₂S и других соединений серы.

8.4.1.2.1 Воздействие H₂O

Вода растворяет CO₂ и другие кислые газы, что приводит к образованию кислот, вызывающих коррозию внутренней поверхности труб. При низкой температуре вода и CO₂ образуют гидраты и вызывают закупорку клапанов и образование пробок в трубах. По этой причине улавливаемый CO₂ обычно требует обезвоживания, чтобы предотвратить образование свободной воды в трубопроводах.

8.4.1.2.2 Токсичные примеси

Потенциальный диапазон загрязняющих веществ в потоке CO₂ зависит от исходного газа CO₂ и конкретной технологии улавливания. При выделении CO₂ перед сжиганием поток CO₂ может содержать следующие загрязнители: CO, H₂S, NH₃, CH₄, H₂, COS, HCl, Hg и HCN. Предельные значения загрязняющих веществ будут определяться минимально допустимыми требованиями к транспортированию конечному использованию.

8.4.1.2.3 Температура и давление потоков CO₂

Температура и давление потока CO₂ определяются условиями транспортирования и хранения, и, как правило, потоки CO₂ хранят в сверхкритических условиях. Критическая точка чистого CO₂ составляет 31,1°C и 73 бар.

8.4.2 Потоки синтез-газа

Синтез-газ, рассматриваемый в настоящем стандарте, в основном используют для производства электроэнергии. Степень чистоты, допустимые уровни примесей, температура и давление потоков синтез-газа устанавливаются на основе требований объектов, на которых используют потоки синтез-газа. Например, допустимые уровни примесей на электростанции устанавливаются коррозионно-активными элементами в газовых турбинах и экологическими нормами. В случае предприятий химического синтеза значения также определяются наличием примесей, отравляющих катализатор.

Требуемое давление в приложении IGCC устанавливается спецификацией турбины внутреннего сгорания. Газификатор должен работать при достаточно высоком давлении, чтобы после учета перепада давления во всех трубопроводах, фитингах и технологическом оборудовании, включая процесс улавливания CO₂, выполнялись.

Требования к температуре синтез-газа не установлены. С точки зрения эффективности желательно максимизировать температуру, поскольку это увеличивает общий КПД турбины внутреннего сгорания. Однако традиционная технология удаления ртути и многие технологии улавливания CO₂ перед сжиганием требуют для своей эффективности низких температур синтез-газа. Процессы очистки горячих газов разрабатываются, но пока не являются коммерческими.

8.4.3 Отходы

Технологии улавливания, такие как мембраны и твердые сорбенты, которые все еще находятся на стадии

разработки, не имеют четких сведений об образовании отходов. Такие факторы, как проницаемость и селективность, будут определять примеси в газообразном продукте CO_2 при использовании мембран, а свойства истирания сорбента будут влиять на потенциальные твердые отходы процессов.

В родственных процессах, таких как конверсия водяного газа, используется катализатор, который со временем дезактивируется и его следует периодически заменять. Отработанный катализатор утилизируют в соответствии с местными правилами.

8.5 Процедура оценки характеристик улавливания

8.5.1 Определение коэффициента улавливания парниковых газов

Ниже представлены два определения эффективности улавливания парниковых газов. Широкое определение основано на системе производства электроэнергии, которая является источником выбросов парниковых газов, в то время как узкое определение посвящено отдельным системам улавливания CO_2 .

8.5.1.1 Широкое определение

В целях разработки мер против глобального потепления скорость улавливания парниковых газов (ПГ) следует определять как отношение количества улавливаемых ПГ (моли) к общему количеству веществ, образующих ПГ (моли). Вещества, образующие ПГ, - это вещества, которые превращаются в CO_2 после (или в начале) процесса горения. Другими словами, массу веществ, образующих ПГ, можно считать как массу углерода в сырье.

Исходя из вышеизложенного, эффективность улавливания ПГ в IGCC определяют как скорость потока уловленного ПГ, например CO_2 , CH_4 (моли), на массовый расход углерода в сырьевом газе и дополнительном топливе (моли).

8.5.1.2 Узкое определение

Система улавливания CO_2 получает газ из потока, удаляет из него CO_2 . Коэффициент улавливания CO_2 выражают следующим образом:

Коэффициент улавливания $\text{CO}_2 = (\text{CO}_2 \text{ в уловленном потоке } \text{CO}_2) / (\text{CO}_2 \text{ в сырьевом газе})$.

8.5.2 Процедура оценки эффективности улавливания

8.5.2.1 Широкое определение

Эффективность улавливания ПГ системы производства электроэнергии определяется количеством улавливаемых ПГ на единицу выходной мощности (т ПГ/МВт·ч) и может сравниваться на основе эффективности электростанции (%).

Производительность улавливания следует оценивать ежегодно.

8.5.2.2 Узкое определение

Широкое определение, касающееся глобального баланса массы ПГ, является важной частью процесса улавливания парниковых газов. Тем не менее оценка конкретной системы улавливания CO_2 является важной частью для понимания эффективности технологии, что является узким определением. Некоторые показатели, ориентированные на компоненты процесса, можно оценить (например, потери абсорбента); другие могут быть измерены в высокоинтегрированной системе.

8.5.2.2.1 Скорость улавливания CO_2

См. 8.5.1.

8.5.2.2.2 Потери при абсорбции

Давление паров абсорбента является основным фактором, влияющим на потери абсорбента.

Он также зависит от рабочей температуры и давления. Потери абсорбента происходят в верхней части абсорбера и десорбера. Поэтому можно измерить количество абсорбента, потерянного в виде капель.

Если существует вероятность деградации абсорбента, загрязненный абсорбент необходимо удалить и ввести новый абсорбент.

8.5.2.2.3 Потребляемая мощность и тепловые нагрузки

Тепловые нагрузки при физическом поглощении сильно различаются в зависимости от конфигурации оборудования. В целом тепловые нагрузки при физической абсорбции меньше, чем при химической абсорбции.

Потребляемая мощность, $MВт = \sum (\text{Потребляемая мощность насоса}) + (\text{Потребляемая мощность компрессора}) + (\text{Потребляемая мощность прочего оборудования})$.

Тепловые нагрузки котлов и теплообменников выражаются следующим образом:

Тепловая нагрузка, $MВт \cdot ч = \sum (\text{Тепловая нагрузка на котел})$.

Охлаждающая нагрузка, $MВт \cdot ч = \sum (\text{Тепловая нагрузка на теплообменник})$.

Интенсивность энергопотребления, $MВт \cdot ч / кг = (\text{Потребляемая мощность } MВт) / (\text{скорость улавливания } CO_2, \text{ кг/ч})$.

Интенсивность нагрева, $MВт \cdot ч / кг \cdot ч = (\text{Расход пара, } MВт) / (\text{скорость улавливания } CO_2, \text{ кг/ч})$.

Интенсивность охлаждения, $MВт \cdot ч / кг = (\text{Теплоотвод теплоносителем } MВт) / (\text{Скорость улавливания } CO_2, \text{ кг/ч})$.

Оценку характеристик процесса улавливания CO_2 можно провести, используя коэффициент улавливания, потери абсорбента, потребляемую мощность и тепловые нагрузки. Поскольку каждый процесс имеет разные условия работы, необходимо установить способ нормализации условий работы.

В любом случае вышеупомянутые элементы следует использовать для оценки характеристик процесса физического поглощения.

8.6 Вопросы надежности

Следует учитывать необходимость оценки надежности для технологии улавливания перед сжиганием.

8.7 Система управления

8.7.1 Система управления между улавливающей установкой и источником выбросов

Для реализации проектов по улавливанию перед сжиганием может потребоваться оценка окружающей среды, воздействия на здоровье и обеспечения безопасности. Для всех аспектов оценки окружающей среды, здоровья и безопасности необходимо учитывать законодательные ограничения, риски и эксплуатационные меры по смягчению возможных последствий. Для всех аспектов оценки окружающей среды, обеспечения безопасности необходимо разработать планы мониторинга.

Ниже приведены примеры ключевых элементов системы управления оценкой окружающей среды, здоровья и безопасности.

a) Аспекты оценки окружающей среды и обеспечения безопасности.

b) Экологические аспекты

Аварии/инциденты с воздействием на окружающую среду:

- для всех систем должны быть идентифицированы возможные аварии;
- особое внимание компрессорной системе (утечка газа).

Потребление энергии - первичная/вторичная энергия:

- должна быть установлена инвентаризация энергопотребления (если возможно, должно применяться управление энергопотреблением);

- должна быть оптимизирована изоляция.

Потребление ресурсов:

- оптимизация расхода топлива (эффективность установки);
- должно быть сведено к минимуму использование абсорбентов;
- оптимизация расходных материалов;
- оптимизированная компоновка.

Использование воды (свежая/сточная вода):

- оптимизация потребности в охлаждающей воде.

Использование земли:

- оптимизация площади завода.

Утилизация/управление отходами:

- оптимизация использования абсорбента.

Выбросы в атмосферу:

- амины и образующиеся продукты реакции;
- снижение загрязняющих веществ.

Утилизация опасных отходов:

- шлам из регенератора, выгруженный абсорбент.

Уровень шума:

- концепция шума.

Загрязнение почвы:

- доставка и хранение химических реагентов;
- сценарий утечки;
- разливы при авариях (вода при тушении пожаров и т.д.).

с) Аспекты опасности для здоровья

Качество воздуха, т.е. пыль, кондиционирование, недостаточная вентиляция:

- вентиляция абсорбера/десорбера.

Опасность утечки газа:

- обнаружение утечек газа (например, CO₂);
- подбор материалов и оборудования.

Опасные вещества, например канцерогены:

- воздействие аминов на рабочие зоны;
- изоляционные материалы при строительстве.

Опасность установок и оборудования:

- разливы и аварии.

Работа с опасными материалами или рядом с ними:

- шлам из регенератора;
- подача аминов;
- лаборатория;
- анализ опасностей, связанных с безопасностью и работоспособностью.

8.7.2 Оперативное управление

Для обеспечения надлежащего управления установкой улавливания перед сжиганием в цепочке создания стоимости CCS необходимо учитывать изменения потока CO₂, операции запуска и остановки.

Параметры, которые необходимо идентифицировать в отношении надлежащего количественного определения и верификации газовых потоков CO₂:

- возможные условия, отличные от нормальных условий эксплуатации;
- сбой питания (безопасный режим работы);
- изменение качества CO₂ (отказы в работе абсорбера/десорбера).

Приложение ДА
(справочное)

Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного документа

Таблица ДА.1

Структура настоящего стандарта	Структура ISO/TR 27912:2016
1 Область применения	1 Область применения
2 Нормативные ссылки	2 Нормативные ссылки
3 Термины и определения	3 Термины и определения
4 Сокращения	4 Символы и сокращения
5 Система улавливания диоксида углерода (CO ₂)	5 Система улавливания диоксида углерода (CO ₂)
6 Обзор	6 Обзор и документация
7 Улавливание CO ₂ из продуктов сжигания (дымовых газов) в энергетике	7 Улавливание CO ₂ из продуктов сжигания (дымовых газов) в энергетике
8 Улавливание CO ₂ перед сжиганием в энергетике	8 Улавливание CO ₂ перед сжиганием в энергетике
-	9 Электростанция на кислородном топливе с улавливанием CO ₂
-	10 Улавливание из процессов производства цемента
-	11 Улавливание CO ₂ в черной металлургии
-	12 Улавливание из промышленных процессов добычи газа
-	13 Обсуждение возможного будущего направления
-	Приложение А Процессы химической абсорбции

-	Приложение В Примеры составов дымовых газов
-	Приложение С Процессы физической абсорбции
-	Приложение D Перечень терминов и определений улавливания CO ₂
Приложение ДА Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного документа	-
-	Библиография

УДК 504.3.054:006.354

ОКС 13.040

Ключевые слова: улавливание, транспортирование и хранение углекислого газа системы, технологии и процессы улавливания диоксида углерода

Электронный текст документа
подготовлен АО "Кодекс" и сверен по:
официальное издание
М.: ФГБУ "РСТ", 2023