

УДК 502.55

ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Целикова Д.А., аспирант гр. СМа-241, I курс
Научный руководитель: Шабанов Е.А., к.т.н. доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Изменение климата вынуждает правительства разных стран пересматривать законы о сокращении выбросов парниковых газов, особенно в отраслях, сильно зависящих от угля и нефти. Основная цель – переход к экологически чистой энергии и снижение вредных выбросов при производстве товаров [5]. Одним из важных инструментов для достижения этой цели считаются технологии CCUS (улавливание, транспортировка, хранение и использование углекислого газа). Хотя эти технологии пока редко используются из-за высоких затрат и разной степени готовности, многие страны уже разрабатывают планы по их внедрению. Россия, имея большой потенциал для создания такой отрасли, пока не приняла четкой стратегии по использованию этих технологий. Целью данной статьи является исследование перспектив и возможностей различных методов утилизации углекислого газа (CO_2), таких как технологии CCUS, минерализация, включение CO_2 в состав бетона и биологические методы утилизации. Статья рассматривает потенциальные пути сокращения выбросов CO_2 и поддержки конкурентоспособности российской промышленности в условиях перехода к новой энергетике и выполнения международных климатических обязательств [1].

Технология для улавливания, использования и хранения углерода (Carbon Capture, Utilization and Storage – CCUS) представляет собой важный шаг в направлении уменьшения воздействия на климат. Технологии CCUS помогают странам Европейского экономического сообщества ООН двигаться к углеродной нейтральности, соблюдая свои целевые показатели по выбросам. Чтобы обеспечить долгосрочную поддержку со стороны общества, необходимо достичь политического консенсуса, учитывая масштаб отрасли, которую нужно создать за короткий срок, и огромные затраты – речь идет о миллиардах тонн CO_2 и триллионах долларов [2, 3, 4].

Механика CCUS представляет собой следующий цикл:

1) определение источника CO_2 – ими могут являться различные промышленные процессы и виды деятельности, включая сжигание ископаемого топлива, производство цемента, химическую промышленность, металлургические процессы, переработку и упаковку пищевых продуктов, транспорт, растениеводство и животноводство, лесное хозяйство и выбросы промышленных предприятий. Эти источники подчеркивают важность управления вы-

бросами CO_2 и поиска решений для сокращения их воздействия на окружающую среду [3].

2) улавливание и выделение CO_2 – данная концепция включает прямое улавливание CO_2 из воздуха (Direct Air Capture – DAC) и биоэнергетику с захватом и хранением углерода (Bioenergy with Carbon Capture and Storage – BECCS). BECCS подразумевает сжигание биомассы с последующим улавливанием и хранением CO_2 . Эта технология потенциально может привести к снижению выбросов CO_2 . BECCS сейчас находится на стадии испытаний [3]. Наглядно схема продемонстрирована на рис. 1.



Рисунок 1 – Процесс улавливания и выделения CO_2

3) очистка и сжатие – на этом этапе CO_2 очищается от примесей и сжимается до жидкого состояния.

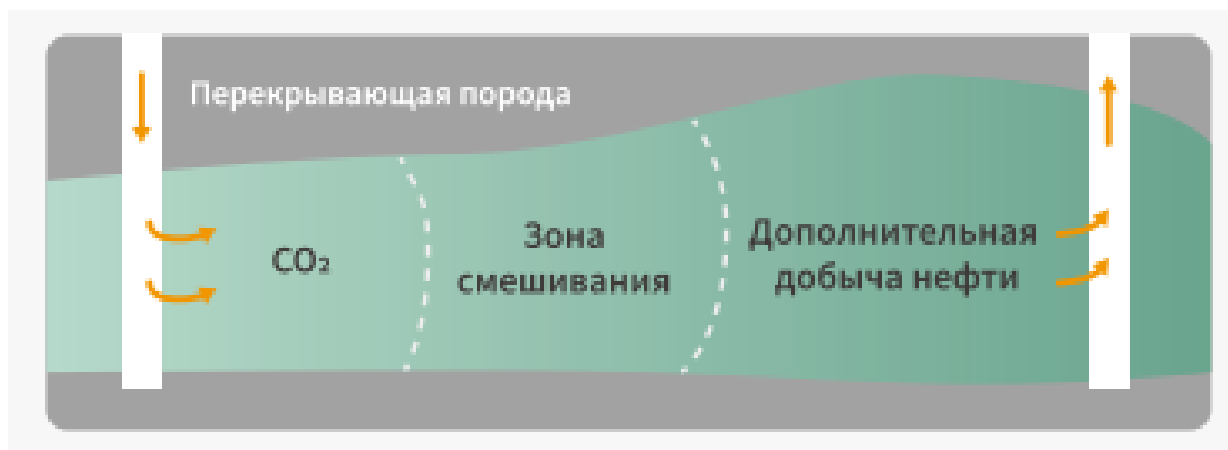
4) транспортировка – сжиженный CO_2 транспортируется к месту хранения или захоронения с помощью трубопроводов или морским транспортом [2].

5) закачка в подземные резервуары – CO_2 закачивается под землю, где он может быть использован для увеличения добычи нефти или просто храниться в течение длительного времени.

6) хранение – для продолжительного хранения CO_2 используются различные геологические формации, такие как истощенные нефтяные и газовые месторождения, угольные пласты или глубоководные отложения (рис. 2).

Преимущественно, CO_2 закачивают в зону смешивания между нефтью и газом, которая расположена между перекрывающей породой и зоной дополнительной добычи нефти.

Это область, где происходит взаимодействие между углеводородами и CO_2 , что позволяет увеличить общую добычу ресурсов. Такой подход, известный как метод Enhanced Oil Recovery (EOR), направлен на увеличение объема добычи нефти и газа за счет использования CO_2 в качестве инертного агента для повышения давления в пласте и улучшения условий извлечения углеводородов [2].

Рисунок 2 – Процесс хранения CO₂

7) **использование** – решения для использования углерода могут раскрыть коммерческий потенциал проектов CCUS в промышленном, сталелитейном, цементном и химическом секторах. Улавливаемый CO₂ может быть использован в качестве сырья для производства ряда продуктов, таких как бетон, метанол, этанол, карбонаты, пластмассы и т. д.

Наряду с преимуществами метода CCUS, присутствуют и недостатки в необходимости постоянного контроля за тем, чтобы CO₂ не просачивался обратно на поверхность во время хранения. CO₂ закачивается на глубину ниже 800 метров, где из-за изменения давления и температуры переходит в сверхкритическое состояние [5]. Однако, несмотря на это, CO₂ остается менее плотным, чем вещества в резервуаре, поэтому он поднимается вверх до тех пор, пока не встретит непроницаемое препятствие.

Именно поэтому для хранения CO₂ выбираются резервуары с покрытием из материалов с низкой проницаемостью. Со временем CO₂ растворится в пластовом флюиде и будет взаимодействовать с породами резервуара, однако выталкивающая сила является критическим моментом процесса, и важно уделять особое внимание безопасности хранения CO₂ в геологических резервуарах, которые не являются герметичными контейнерами.

В заброшенных скважинах и истощенных резервуарах нефти и газа бывших углеводородных месторождений присутствуют трещины и разломы, что создает большой риск утечки CO₂ обратно на поверхность и попадания в атмосферу. Ввиду необходимости определения оптимального способа хранения CO₂ ученые задумались над поиском и разработкой метода хранения CO₂ в геологических резервуарах, но с меньшим риском просачивания в атмосферу.

В таком случае, природа продемонстрировала такую возможность посредством процесса **минерализации**. В процессе выветривания силикатных пород углекислый газ минерализуется и превращается в твердые минеральные соединения. Этот процесс может происходить как естественным образом в природе, так и искусственно в лабораторных условиях. В природе минера-

лизация CO_2 происходит через химические реакции между CO_2 и минералами, такими как карбонаты, силикаты или алюмосиликаты.

Примеры природных процессов включают выветривание силикатных пород, седиментацию и гидротермальные процессы. В лабораториях минерализация CO_2 может быть стимулирована путем помещения CO_2 в контакт с определенными минералами при контролируемых условиях температуры и давления [6].

Схожим по химическому процессу методом является включение углекислого газа (CO_2) в состав бетона.

Этот метод является одним из перспективных способов утилизации CO_2 и снижения углеродного следа строительной отрасли. Этот процесс известен под названием **карбонизация** бетона [6].

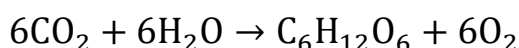
Суть метода заключается в том, чтобы связать CO_2 с кальцием, содержащимся в цементе, образуя карбонат кальция (CaCO_3), который затем становится частью структуры материала. CO_2 может быть включен в состав бетона, улучшая его механические свойства и одновременно фиксируя углерод.

Использование CO_2 в составе бетона представляет собой многообещающий способ сокращения выбросов парниковых газов и улучшения экологических характеристик строительной отрасли. Однако для достижения полного потенциала этой технологии требуются дополнительные исследования, инвестиции и законодательная поддержка.

Помимо технологии CCUS, минерализации, карбонизации существуют и другие методы утилизации диоксида углерода.

Биологические методы утилизации CO_2 включают использование микроорганизмов и растений для превращения диоксида углерода в органические вещества [7].

Один из наиболее известных примеров – фотосинтез, который происходит в растениях. В процессе фотосинтеза растения преобразуют CO_2 из атмосферы в глюкозу и кислород через реакцию по формуле:



Другой важный метод – это использование микробов, которые способны поглощать и преобразовывать CO_2 в полезные продукты. Например, некоторые бактерии могут использовать CO_2 для синтеза белков, жиров или углеводов. Это может быть применимо в биотехнологических процессах для производства биомассы или биотоплива.

Биологические методы утилизации CO_2 предлагают экологически безопасные способы снижения концентрации углекислого газа в атмосфере и могут играть важную роль в борьбе с глобальным потеплением и изменением климата.

В таблице отражены преимущества и недостатки каждого из способов.

Таблица

Анализ методов утилизации углекислого газа

Метод утилизации CO ₂	Преимущества	Недостатки
Технология CCUS	<ul style="list-style-type: none"> • снижение выбросов CO₂ • технологическая зрелость • долговременная устойчивость • поддержка международных инициатив • возможность повторного использования 	<ul style="list-style-type: none"> • высокая стоимость • техническая сложность • энергопотребление • риски утечки
Минерализация CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • экологичность • долговременная устойчивость • технологическая зрелость 	<ul style="list-style-type: none"> • сложность и высокая стоимость • энергопотребление • локальные ограничения • влияние на экосистемы • конкуренция за ресурсы
Включение CO ₂ в состав бетона	<ul style="list-style-type: none"> • повышение прочности бетона • экологическая устойчивость • снижение углеродного следа 	<ul style="list-style-type: none"> • объем связываемого CO₂ • энергозатраты на производство • оборудование и инфраструктура • изменения свойств бетона • необходимость адаптации производственных линий:
Биологический	<ul style="list-style-type: none"> • экологичность • постоянное поглощение • дополнительные выгоды • содействие устойчивости • многоцелевое использование 	<ul style="list-style-type: none"> • скорость поглощения • географические ограничения • зависимость от факторов окружающей среды • количественное ограничение • технологические сложности

Выбор подходящего метода зависит от конкретных обстоятельств, таких как доступность ресурсов, технологическая зрелость, стоимость и желаемые результаты. Например, для промышленных предприятий с большими выбросами CO₂ может подойти технология CCUS, тогда как для строительных компаний более эффективным может оказаться включение CO₂ в состав бетона.

Не существует единого универсального способа полезного использования CO₂. В зависимости от отрасли, местоположения и других ограничений одна или несколько технологий могут подходить лучше, чем другие.

Список литературы:

1. Ершов А. С. Утилизация промышленных отходов. Москва : Наука, 2007. – 352 с.
2. Иванов В. Г., Миронов С. А. Технологии утилизации углекислого газа: современные подходы и перспективы. Санкт-Петербург: Издательство СПбГУ, 2015. – 280 с.
3. ВР (2022). Прогноз развития энергетики: издание 2022 года.
4. Доронин Ю. К., Кузнецов Д. Е. Современные тенденции в разработке технологий утилизации углекислого газа // Вестник Московского университета. Серия 16: Химия, № 3, 2018. С. 121-128.
5. Гилязидинова Н.В., Мазурин Е.А. Анализ особенностей экологического строительства в России в начале 21 века // Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Кемерово, 2021.