

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2023.1.142-154>

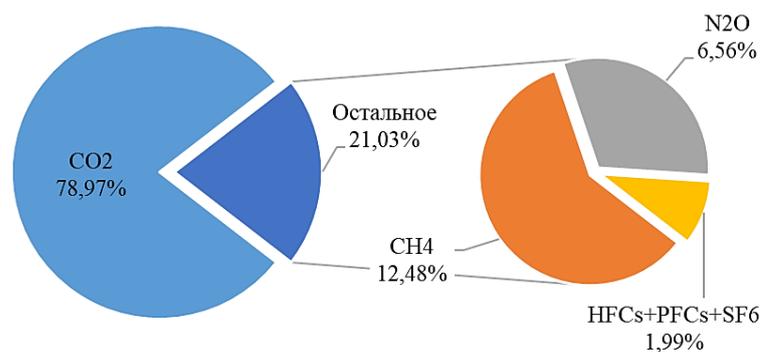
EDN MSAETE

УДК 622.276.42:661.97

Утилизация CO₂ – плюсы и минусы*Васильев В.В., Салимов О.В.**ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия***Carbon capture and utilization: benefits and implications***V.V. Vasilev, O.V. Salimov**Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia***E-mail. ovsalimov@tnnc.rosneft.ru**

Аннотация. Экологические проблемы, связанные с выбросами парниковых газов, стали глобальными проблемами. Многочисленными исследованиями было показано, что повышение уровня парниковых газов в атмосфере вызывает глобальное потепление. Углекислый газ (CO₂), метан (CH₄), закись азота (N₂O) и фторсодержащие газы (HFC, PFC, SF₆) являются парниковыми газами, среди которых углекислый газ составляет значительную долю по отношению к общему количеству присутствующих в атмосфере газов (

Рис. 1).

**Рис. 1. Выбросы парниковых газов**

Ключевые слова: углекислый газ CO₂, улавливание, хранение и утилизация CO₂, экологическое воздействие

Для цитирования: Васильев В.В., Салимов О.В. Утилизация CO₂ – плюсы и минусы // Нефтяная провинция.-2023.-№1(33).-С.142-154. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2023.1.142-154>. - EDN MSAETE

Abstract. Environmental issues related to green-house-gas (GHG) emissions have grown to global problems. Numerous research works reveal that increase in greenhouse gas levels in the atmosphere contributes to global warming. Carbon dioxide gas (CO₂), methane (CH₄), nitrogen oxide (N₂O), and fluorine-containing gases (HFC, PFC, SF₆) are classified as greenhouse gases, with CO₂ constituting a considerable proportion in the total amount of gases present in the atmosphere (Fig.1).

Key words: *carbon dioxide CO₂, capture, CO₂ storage and disposal, environmental impact*

For citation: V.V. Vasilev, O.V. Salimov Utilizatsiya SO₂ – plyusy i minusy [Carbon capture and utilization: benefits and implications]. Neftyanaya Provintsiya, No.1(33), 2023. pp. 142-154. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2023.1.142-154>. EDN MSAETE (in Russian)

Согласно прогнозу Межправительственной группы экспертов по изменению климата, к 2100 году в атмосфере Земли может содержаться до 570 частей на миллион CO₂, что может привести к повышению средней глобальной температуры примерно на 1,9°C и повышению среднего уровня моря на 3,8м [1].

Цель

К 2050 году Евросоюз хочет полностью отказаться от энергии, при производстве которой в атмосферу выбрасывается углекислый газ. Еще раньше ЕС введет углеродный налог, за который Россия заплатит минимум 1,1 млрд евро. Это значит, что в скором времени нефть будет приносить стране все меньше и меньше прибыли. Пока инфраструктуры для новых рынков нет, поэтому нефтяным компаниям нужно уменьшать выбросы CO₂ при добыче нефти. В этом им может помочь технология улавливания и захоронения углекислого газа (CCS).

Улавливание и хранение углерода (от англ. carbon capture and storage, CCS) – процесс, включающий отделение CO₂ от промышленных и энергетических источников, транспортировку к месту хранения и долгосрочную изоляцию от атмосферы [1]. Обычно улавливание CO₂ осуществляется у крупного источника выбросов газа, например, цементного завода

или электростанции, и его последующую транспортировку и захоронение в соответствующих геологических формациях. Этот процесс позиционируется как решение для сокращения выбросов углекислого газа электростанциями на ископаемом топливе и другими соответствующими промышленными видами деятельности, что делает его также применимым для решения проблемы глобального потепления и изменения климата.

Материалы и методы

Различные подходы рассматриваются и принимаются различными странами для того, чтобы сократить свои выбросы CO₂, в том числе:

- повышение энергоэффективности и способствование энергосбережению;
- увеличение использования низкоуглеродных видов топлива, включая природный газ, водородную или ядерную энергию;
- использование возобновляемых источников энергии, таких как солнечная, ветровая, гидроэнергетика и биоэнергетика;
- применение геоинженерных подходов, таких как облесение и лесовосстановление;
- улавливание и хранение CO₂ (CCS).

В Таблица 1 сравниваются области применения, преимущества и ограничения этих различных подходов. Некоторые из этих подходов касаются сокращения выбросов из источников, например, такие как внедрение чистых видов топлива и чистых угольных технологий, в то время как другие используют управление на стороне потребления, т.е. энергосбережение. Каждый подход имеет присущие ему преимущества и ограничения, которые обуславливают его применимость.

Таблица 1

Краткое изложение стратегий сокращения выбросов CO₂

Стратегия	Область применения	Преимущества	Ограничения
-----------	--------------------	--------------	-------------

Повышение энергоэффективности и энергосбережение.	Применяется в основном в коммерческих и промышленных зданиях.	Энергосбережение от 10% до 20% легко достижимо.	Могут потребоваться значительные капиталовложения для установки энергосберегающего устройства.
Увеличение использования экологически чистого топлива.	Замена угля природным газом для производства электроэнергии.	Природный газ выделяет на 40 - 50% меньше CO ₂ , чем уголь, благодаря меньшему содержанию углерода и более высокой эффективности сгорания.	Более высокая стоимость топлива для традиционного природного газа. Сопоставимая стоимость со сланцевым газом.
Внедрение чистых угольных технологий.	Интегрированный комбинированный цикл газификации (IGCC), камера сгорания с псевдооживленным слоем под давлением (PFBC) и т. д. для замены обычного сжигания.	Позволяет использование угля с меньшими выбросами загрязняющих веществ в атмосферу.	Для широкого внедрения технологий необходимы значительные инвестиции.
Использование возобновляемых источников энергии.	Высоко развиты гидроэнергетика, солнечная (тепловая), ветровая энергия и биотопливо.	Использование местных природных ресурсов; отсутствие или низкий уровень выбросов парниковых газов и токсичных газов.	Применимость может зависеть от наличия местных ресурсов и стоимости. Энергия от солнечной, ветровой, морской и т. д. прерывистая, а связанные с ней технологии не отработаны; большинство современных возобновляемых источников энергии являются более дорогостоящими, чем традиционная энергия.
Развитие атомной энергетики	Ядерная энергетика развита в основном в США, Франции, Японии, России и Китае.	Отсутствие вредных выбросов в атмосферу и парниковых газов	Использование спорно. Развитие мировой ядерной энергетики сдерживается опасениями из-за аварии на АЭС.

Облесение и лесовосстановление.	Применимо ко всем странам.	Простой подход к созданию естественных и устойчивых поглотителей CO ₂ .	Ограничивает использование земли для других целей.
Улавливание и хранение углерода.	Применимо к большой точечной эмиссии CO ₂ источников.	Может уменьшить огромное количество CO ₂ с эффективностью улавливания более 80%	Технологии полной цепочки CCS не прошли испытания в полном коммерческом масштабе. Экономически затратны.

Среди всех перечисленных стратегий, технология CCS может сократить выбросы CO₂ (обычно на 85-90%) из крупных точечных источников выбросов, таких как предприятия по производству электроэнергии и энергоемкие источники выбросов, например, цементные заводы. При таком подходе CO₂ сначала улавливается из дымовых/топливных газов, отделяется при помощи сорбентов, далее транспортируется, а затем либо хранится на постоянной основе, либо повторно используется в промышленности.

После улавливания CO₂ необходимо транспортировать к месту захоронения. Для этого как правило используют два способа – трубопроводы и корабли, в том числе танкеры, перевозящие сжиженный природный газ (СПГ). Петербургские ученые считают более эффективным второй вариант: танкеры являются более гибкими в плане логистики и могут подстраиваться под разные условия хранения газа. К тому же, их использование поможет сэкономить на развитии инфраструктуры – не нужно строить дорогостоящую сеть.

Самым привлекательным для России вариантом по всей видимости является помещение газа в выработанные нефтяные месторождения. Все потому, что CO₂, закачанный в скважину под очень высоким давлением, смешивается с остатками нефти, увеличивая ее объем и снижая вязкость. Благодаря этому нефтяники могут добыть больше ресурсов. В целом, движение газа от улавливания до захоронения схематично изображено на Рис. 2.



Рис. 2. Схема движения газа CO₂

Результаты

Даже с учетом преимуществ использования CCS для сокращения количества CO₂, выбрасываемого в атмосферу, есть несколько вопросов, связанных с полномасштабным внедрением технологии, которые еще предстоит проработать.

Стоимость CCS высока

Чтобы оснастить существующую промышленную установку (завод) или электростанцию технологией CCS, стоимость генерируемого продукта должна увеличиться, если субсидии не предоставляются. Например, некоторыми исследователями приводятся оценки увеличения стоимости электроэнергии на 50-80% для оплаты внедрения технологии CCS [2]. В настоящее время в большинстве мест нет регулирующих факторов, стимулирующих или требующих использования CCS, поэтому стоимость оборудования и материалов для разделения CO₂, создания инфраструктуры для его транспортировки, а затем хранения может быть непомерно высокой.

Использование CCS для извлечения нефти может свести на нет его цель

Одним из текущих применений CO₂, улавливаемого в процессе CCS, является повышение нефтеотдачи. В этом процессе нефтяные компании используют захваченный CO₂ и закачивают его в истощенные нефтяные скважины, чтобы повысить нефтеотдачу пластов. Однако, когда эта нефть в конечном итоге сгорит, она выпустит больше CO₂ в атмосферу. Если количество CO₂, улавливаемого вовремя CCS, также не учитывает CO₂, выделяемого нефтью, которая была добыта, CCS просто будет способствовать большему количеству парниковых газов в атмосфере.

Геологические формации для долгосрочного хранения CO₂ не являются 100% надежными

По оценкам Агентства по охране окружающей среды, не во всех странах будет достаточно мощностей для хранения CO₂, чтобы должным образом внедрить CCS [3]. По словам исследователей из Халифского университета науки и технологии, рассчитать точную емкость различных мест хранения сложно [4]. Это означает, что объем хранилища CO₂ пропускная способность по всему миру не определена. Ученые из Массачусетского технологического института подсчитали, что емкости для хранения CO₂ в Соединенных Штатах хватит как минимум на следующие 100 лет, но остается неопределенность в отношении каких-либо иных временных рамок после этого [5].

Места транспортировки и хранения CO₂ могут быть опасными

Хотя аварийность при транспортировке CO₂ относительно низкая, вероятность опасной утечки все же существует. По данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата, если CO₂ просочится из

трубопровода, концентрация от 7% до 10% в окружающем воздухе может представлять непосредственную угрозу для жизни человека [6].

Возможна также утечка на месте подземного хранения. Если внезапная утечка CO₂ произойдет в месте закачки, это может поставить под угрозу здоровье окружающих людей и животных. Постепенная утечка из трещин в слоях горных пород или из нагнетательных скважин может загрязнить как почву, так и грунтовые воды в районе, окружающем место хранения. И сейсмические события, вызванные закачкой CO₂, также могут нарушить работу районов вблизи места хранения.

Общественное восприятие размещения CO₂ рядом с ними является негативным

Хранение углерода из CCS имеет несколько предполагаемых рисков, которые не популярны среди общественности. Крупномасштабное внедрение технологии CCS потребует места для хранения CO₂.

Согласно исследованию ученых Санкт-Петербургского горного университета, осведомленность общественности о CCS в большинстве стран мира низкая [7]. Однако, когда люди знают о CCS и о том, что он влечет за собой, они часто имеют нейтральное или положительное восприятие его, пока дело не доходит до места хранения углерода. Отрицательный эффект NIMBY (Not in My Back Yard) часто сильнее, чем позитивное восприятие CCS общественностью. Люди, как правило, отвергают крупные проекты, такие как CCS, строящиеся рядом с ними, из-за предполагаемых рисков для здоровья и образа жизни или чувства, что несправедливо, что проект находится рядом с ними, а не где-то еще.

Заключение

Для достижения цели по сокращению выбросов парниковых газов необходим ряд дополнительных технологических подходов, включая улучшение энергоэффективности и энергосбережения, внедрение чистых видов топлива и чистых угольных технологии, развитие возобновляемых источников энергии и внедрение CCS. Отмечается, что CCS включает в себя портфель технологий, которые могут значительно сократить выбросы CO₂, но CCS еще предстоит широкое распространение. Выбор конкретного способа утилизации CO₂ сильно зависит от типа установки и используемого на ней топлива. Например, для электростанций, работающих на газе, технология улавливания после сгорания в целом оказалась эффективной технологией из-за ее более низкой стоимости. Абсорбция является наиболее состоятельным процессом отделения CO₂ из-за его высокая эффективности и более низкой стоимости; однако вопросы, связанные с воздействием на окружающую среду должны быть полностью решены. Наилучший вариант транспортировки CO₂ будет зависеть от множества параметров, в том числе:

- объемы CO₂, подлежащие транспортировке;
- планируемый срок службы источника CO₂ (например, электростанций, сталелитейных и цементные заводы);
- расстояние между источником CO₂ и зоной хранения;
- береговые и морские перевозки и хранение;
- доступная типология транспортной инфраструктуры (т. е. дороги и железнодорожные сети, магистральные трубопроводы, причалы).

Трубопровод считается наиболее жизнеспособным решением, если большие объемы CO₂ доступны в течение длительного времени и, если возможно проложить магистраль трубопровода. Еще одним преимуществом является потенциальное повторное использование трубопроводов для транспортировки газа или нефти. В случае морского хранения, транспортировка CO₂ танкерами может быть экономически конкурентоспособной из-за

высоких капитальных затрат, связанных с развертыванием подводных трубопроводов. Затраты на промежуточные хранилища и подходящие доки для танкеров следует учитывать, когда суда используются в качестве перевозчиков CO₂.

Для хранения CO₂ как правило рассматриваются четыре основных типа геологических формаций:

- истощенные залежи нефти и газа;
- неизвлекаемые угольные пласты;
- солевые водоносные горизонты;
- базальты.

В случае хранения в нефтяных и газовых резервуарах технология, уже используемая для повышения нефтеотдачи (МУН), является зрелой и практикуется в течение многих лет с использованием природных источников CO₂ и в основном на суше. Тем не менее, экономическая целесообразность использования, уловленного CO₂ из антропогенных источников для увеличения нефтеотдачи еще не была полностью продемонстрирована, в основном для морского хранения. Использование угольных пластов, в конечном счете, извлечение метана с помощью усовершенствованного извлечения метана из угольных пластов (ЕСВМ), может быть вариантом, но это делает уголь, используемый для хранения CO₂, недоступным для использования, даже если будущие технологии добычи и экономические соображения сделают его коммерчески выгодным. С другой стороны, растет интерес к хранению CO₂ в соленых водоносных горизонтах из-за их огромной потенциальной емкости, и несколько проектов находятся в разработке как на суше, так и на море. Базальты представляют собой чрезвычайно большой объем для хранения CO₂, который будет фиксироваться в виде карбонатных минералов после химической реакции с минералами вмещающих пород. Ряд неопределенностей, начиная от необходимости очень подробного знания

стратиграфической структуры базальтов и заканчивая полным пониманием химической реакции, по-прежнему ограничивают их использование.

Потенциальная утечка CO_2 представляет собой серьезную проблему для геологического хранения, и необходимо разработать комплексную программу мониторинга.

Хотя технологии, касающиеся улавливания и хранения CO_2 , существуют, общая стоимость использования текущих процедур CCS по-прежнему высока и должна быть существенно снижена, прежде чем ее можно будет широко использовать. Существует множество препятствий для развертывания CCS, которые необходимо устранить в ближайшие годы, в том числе отсутствие четкого экономического обоснования инвестиций в CCS и отсутствие надежных экономических стимулов для поддержки дополнительных высоких капитальных и эксплуатационных затрат, связанных с CCS.

Выводы

1. Для достижения цели по сокращению выбросов парниковых газов необходим ряд дополнительных технологических подходов, включая улучшение энергоэффективности и энергосбережения, внедрение чистых видов топлива и чистых угольных технологий, развитие возобновляемых источников энергии и внедрение CCS.
2. Технология, используемая для повышения нефтеотдачи (МУН), является зрелой и практикуется в течение многих лет с использованием природных источников CO_2 и в основном на суше. Тем не менее, экономическая целесообразность использования, уловленного CO_2 из антропогенных источников для увеличения нефтеотдачи еще не была полностью изучена для морского хранения.
3. Существует множество препятствий для развертывания CCS, которые необходимо устранить в ближайшие годы, в том числе отсутствие четкого

экономического обоснования инвестиций в CCS и отсутствие надежных экономических стимулов для поддержки дополнительных высоких капитальных и эксплуатационных затрат, связанных с CCS.

Список литературы

1. [Электронный ресурс] // United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Accessed January 2014. – Режим доступа: http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/ghg_profiles/items/4625.php.
2. Davies, Lincoln, et al. // Understanding Barriers to Commercial-Scale Carbon Capture and Sequestration in the United States: an Empirical Assessment / Energy Policy, vol. 59, 2013, pp. 745-761., DOI: 10.1016/j.enpol.2013.04.033/
3. Dooley, J. J., et al. // Carbon Dioxide Capture and Geologic Storage: a Core Element of a Global Energy Technology Strategy to Address Climate Change / The Global Energy Technology Strategy Program.
4. Ajayi, Temitope, et al. // A Review of CO₂ Storage in Geologic Formations Emphasizing Modeling, Monitoring and Capacity Estimation Approaches / Petroleum Science, vol. 16, 2019, pp. 1028-1063., DOI: 10.1007/s12182-019-0340-8/.
5. Szulczewski, Michael, et al. // Lifetime of Carbon Capture and Storage as a Climate-Change Mitigation Technology / Proceedings of the National Academy of Science, vol. 109, no. 14, 2012, pp. 5185-5189., DOI: 10.1073/pnas.1115347109.
6. Abanades, Juan Carlos, et al. // Carbon Dioxide Capture and Storage Summary for Policymakers / Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
7. Tsvetkov, Pavel, et al. // Public Perception of Carbon Capture and Storage: a State-of-the-Art Overview / Heliyon, vol. 5, no. 12, 2019, pp. E02845., DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02845.

References

1. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Accessed January 2014. Available at: http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/ghg_profiles/items/4625.php.
2. Davies, Lincoln, et al. // Understanding Barriers to Commercial-Scale Carbon Capture and Sequestration in the United States: an Empirical Assessment / Energy Policy, vol. 59, 2013, pp. 745-761., DOI: 10.1016/j.enpol.2013.04.033/
3. Dooley, J. J., et al. // Carbon Dioxide Capture and Geologic Storage: a Core Element of a Global Energy Technology Strategy to Address Climate Change / The Global Energy Technology Strategy Program.
4. Ajayi, Temitope, et al. // A Review of CO₂ Storage in Geologic Formations Emphasizing Modeling, Monitoring and Capacity Estimation Approaches / Petroleum Science, vol. 16, 2019, pp. 1028-1063., DOI: 10.1007/s12182-019-0340-8/.
5. Szulczewski, Michael, et al. // Lifetime of Carbon Capture and Storage as a Climate-Change Mitigation Technology / Proceedings of the National Academy of Science, vol. 109, no. 14, 2012, pp. 5185-5189., DOI: 10.1073/pnas.1115347109.
6. Abanades, Juan Carlos, et al. // Carbon Dioxide Capture and Storage Summary for Policymakers / Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

7. Tsvetkov, Pavel, et al. // Public Perception of Carbon Capture and Storage: a State-of-the-Art Overview / Heliyon, vol. 5, no. 12, 2019, pp. E02845., DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02845.

Сведения об авторах

Васильев Владимир Васильевич, кандидат технических наук, главный менеджер отдела типизации решений в ГиР, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»
Россия, 625003, Тюмень, ул. Перекопская, 19
E-mail: vvvasilev@tnnc.rosneft.ru

Салимов Олег Вячеславович, доктор технических наук, менеджер отдела типизации решений в ГиР, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»
Россия, 625003, Тюмень, ул. Перекопская, 19
E-mail: ovsalimov@tnnc.rosneft.ru

Authors

V.V. Vasilev, Ph.D., Chief Manager, Solutions Type Assignment Department, Tyumen Petroleum Research Center
42, Perekopskaya st., Tyumen, 625003, Russian Federation
E-mail: vvvasilev@tnnc.rosneft.ru

O.V. Salimov, Dr.Sc., Manager, Solutions Type Assignment Department, Tyumen Petroleum Research Center
42, Perekopskaya st., Tyumen, 625003, Russian Federation
E-mail: ovsalimov@tnnc.rosneft.ru

Статья поступила в редакцию 27.02.2023

Принята к публикации 20.03.2023

Опубликована 30.03.2023