

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

<https://doi.org/10.17816/transsyst626647>

© Р.Г. Ахтямов

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ТРАНСПОРТИРОВКЕ УЛОВЛЕННОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА К МЕСТАМ ХРАНЕНИЯ

Цель. Анализ существующих и перспективных подходов к транспортировке уловленного углекислого газа к местам хранения.

Объект и методы. Объектом исследования является система транспортировки уловленного углекислого газа к местам хранения. В качестве методов транспортировки выделены трубопроводная, водная, железнодорожная и автомобильная системы перевозки углекислого газа к местам захоронения.

Результаты. Выявлены особенности транспортировки уловленного углекислого газа в различных фазовых состояниях. Определены характеристики качества CO_2 влияющие на долговечность материалов из которых изготовлены транспортные емкости и системы. Проанализированы характеристики существующих трубопроводов для транспортировки углекислого газа. Показано, что при проектировании углеродопроводов целесообразно исходить из физических, экологических и социальных факторов района расположения трубопровода.

Заключение. Проведенный анализ способов транспортировки уловленного углекислого газа к местам его захоронения показал, что в настоящий момент существует система транспортировки выбросов трубопроводным и водным транспортом. При этом, перевозка CO_2 водным транспортом имеет ряд сходств с транспортировкой сжиженного нефтяного газа. Транспортировка уловленного углекислого газа железнодорожным или автомобильным транспортом является более дорогостоящей, по сравнению с трубопроводным и водным транспортом и может быть целесообразна для небольших точечных территориально распределенных источников эмиссии, на которых возможно временное накопление выбросов в емкостях.

Ключевые слова: изменение климата; парниковые газы; углекислый газ; улавливание и хранение углекислого газа; транспортировка углекислого газа; трубопроводный транспорт; водный транспорт; железнодорожный транспорт; автомобильный транспорт

Как цитировать:

Ахтямов Р.Г. Анализ подходов к транспортировке уловленного углекислого газа к местам хранения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 159–170. doi: 10.17816/transsyst626647

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Ground transport and logistics facilities and complexes

© **R.G. Akhtyamov**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

ANALYSIS OF APPROACHES TO CAPTURED CARBON DIOXIDE TRANSPORTING TO STORAGE PLACES

Aim. This study focuses on analyzing various approaches to transporting captured carbon dioxide (CO₂) to storage sites.

Methods. The study examines four transportation methods for moving CO₂ to storage sites: pipeline, water, rail, and road systems.

Results. Our analysis revealed the unique characteristics of transporting captured CO₂ in various phase states. We determined the quality characteristics of CO₂ affecting the durability of the materials used in transportation containers and systems. Additionally, we analyzed the features of existing pipelines specifically designed for CO₂ transportation. that the findings suggest that when designing carbon pipelines, it is essential to consider the physical, environmental, and social factors of the area where the pipeline will be located.

Conclusion. The analysis of methods for transporting captured CO₂ to storage sites indicates that pipeline and water transport systems are currently the most viable options. Transporting CO₂ by water shares several similarities with the transportation of liquefied petroleum gas. Conversely, rail and road CO₂ transportation tend to be more expensive compared to pipeline and water options and may be appropriate for smaller, geographically distributed emission point sources where temporary storage in containers is feasible.

Keywords: climate change; green gases; carbon dioxide; carbon capture and storage; carbon dioxide transportation; pipeline transport; water transport; railway transport; automobile transport.

To cite this article:

Akhtyamov RG. Analysis of approaches to captured carbon dioxide transporting to storage places. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):159–170. doi: 10.17816/transsyst626647

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата, обусловленное выбросами парниковых газов, становится все более острой проблемой. Концентрация углекислого газа в атмосфере Земли в 2016 г. преодолела отметку в 400 ppm (parts per million – частицы CO_2 на миллион частиц воздуха). Ожидается, что к концу столетия концентрация CO_2 может увеличиться примерно в 2 раза [1]. При этом, несмотря на устойчивый рост солнечной и ветровой энергетики, конкурентоспособной альтернативы традиционным технологиям сжигания углеводородов до сих пор не существует.

По данным Международного энергетического агентства, наибольшая доля выбросов углекислого газа приходится на предприятия черной металлургии (30%) и цементной промышленности (26%). Спрос на продукцию этих отраслей вырастет к 2050 г. на 30% и 22% соответственно [1].

Технологии улавливания и хранения углекислого газа (carbon capture and storage technology – CCS) признаны критически важными для сдерживания роста температуры на планете в пределах 1,5–2 °C к 2050 г [2]. Применение данных технологий – это эффективный способ существенно снизить объем выбросов парниковых газов промышленностью и транспортом. Потенциал применения CCS очень широк, текущие глобальные мощности активных проектов CCS по подземному хранению составляют около 50 млн т/год.

По оценкам Global CCUS Institute [3] мощности по хранению CO_2 в геологических формациях увеличиваются на 61,8 Мт CO_2 /год. Суммарная мощность проектов CCS будет нарастать до 170 Мт CO_2 /год к 2030 г. и до 5 Гт CO_2 /год к 2050 г., в то время как суммарные антропогенные выбросы парниковых газов снизятся до 10 Гт CO_2 /год.

Таким образом, к 2050 г. относительный вклад проектов CCS в снижение выбросов увеличится и будет покрывать до половины выбросов, в то время как сейчас мощность проектов CCS составляет менее 1% от суммарного объема выбросов [2].

Несмотря на то, что CCS является одной и наиболее перспективных технологий, которая может способствовать выполнению целей Парижского соглашения [4], количество действующих проектов в данной области невелико. Текущая ситуация с развитием сектора хранения CO_2 не соответствует стратегическим ориентирам [5], определяющим необходимость создания новой индустрии в мировом масштабе по транспортировке и хранению углекислого газа. Наиболее остро

проблема создания масштабной инфраструктуры хранения CO_2 , в рамках региональных и национальных программ декарбонизации экономики, стоит перед промышленно развитыми странами, на которые приходится существенная часть мировой эмиссии углекислого газа [6].

Технологическая цепочка CCS состоит из следующих основных стадий: выявление источника CO_2 ; выделение (улавливание) CO_2 из смеси дымовых газов; очистка и сжатие CO_2 (далее возможно полезное использование путем конверсии в полезные продукты); транспортировка к местам хранения; размещение в геологических пластах для долгосрочного хранения.

Целью данной работы является анализ существующих и перспективных подходов к транспортировке уловленного углекислого газа к местам хранения.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Транспортировка к местам хранения – это стадия улавливания и хранения CO_2 , которая связывает источники выбросов и хранилища углекислого газа. Начало и конец стадии транспортировки к местам хранения может определяться национальными или локальными нормативно-правовыми актами. Стадия транспортировки CO_2 регулируется нормативными актами в области транспортной и общественной безопасности, аналогично иным видам транспорта. При этом транспортировка больших количеств газообразных веществ, в частности углекислого газа трубопроводным транспортом, является частью текущей практики [2].

Транспортировка углекислого газа трубопроводным транспортом к местам хранения реализована на практике, и подобные трубопроводы имеют протяженность более 2500 км на западе США и транспортируют около 50 Мт CO_2 /год для повышения нефтеотдачи пластов в ряде проектов. Требования к транспортируемому углекислому газу заключаются в его максимальной инертности по отношению к материалу изготовления трубопровода для транспортировки углекислого газа – углеродопровода.

Существуют следующие характеристики качества CO_2 , которых должен придерживаться поставщик газа перед его поступлением в углеродопровод (на примере проекта «Canyon Reef Carriers») [2]:

- содержание углекислого газа: продукт должен содержать не менее 95% диоксида углерода;

- содержание воды: продукт не должен содержать воды в жидком состоянии и не должен содержать более $0,48 \text{ г/м}^3$ воды в паровой фазе;
- содержание сероводорода: продукт не должен содержать более 1500 ppm по весу сероводорода;
- содержание общей серы: продукт не должен содержать более 1450 ppm по весу общей серы;
- температура продукта не должна превышать $48,9 \text{ }^\circ\text{C}$;
- содержание азота: продукт не должен содержать более 4% азота;
- содержание углеводородов: продукт не должен содержать более 5% углеводородов, а точка росы в отношении углеводородов не должна превышать $-28,9 \text{ }^\circ\text{C}$;
- содержание кислорода: продукт не должен содержать более 10 ppm по весу кислорода;
- содержание гликоля: продукт не должен содержать более $4 \cdot 10^{-5} \text{ л/м}^3$ гликоля, и такой гликоль не должен присутствовать в жидком состоянии при термобарическом режиме трубопровода.

Скорость коррозии трубопровода при транспортировке сухого углекислого газа (относительная влажность менее 60%) составляет около 0,01 мм/год при давлении 9–12 МПа. Наличие 800–1000 ppm H_2S при давлении 14 МПа обуславливает скорость коррозии углеродистой стали около 0,0005 мм/год. Исследования [7] показывают, что при транспортировке сухого CO_2 , при высоком давлении в трубопроводах из углеродистой стали, скорость коррозии за 12 лет составляет 0,00025–0,0025 мм/год. Скорость коррозии намного выше (до 0,7 мм/год), если в трубопроводе присутствует вода в жидком состоянии. Однако, при проектировании, строительстве и введении в эксплуатацию углеродопроводов из коррозионностойких материалов возможна безопасная транспортировка газа содержащего воду, сероводород и другие загрязняющие вещества, однако это значительно увеличивает стоимость трубопроводов.

При прокладывании углеродопровода через населенные пункты дополнительно должны реализовываться конструктивные факторы по защите от возникновения избыточного давления в трубопроводе и обнаружению утечек транспортируемой среды. Внедрение комплекса данных конструктивных факторов может быть основано на использовании существующих мер по обеспечению безопасности нефтепроводов и газопроводов в аналогичных условиях размещения.

Транспортировка углекислого газа водным транспортом также реализуется на практике, ввиду того что технология транспортировки сжиженного и сжатого природного газа отработана при перевозке морскими танкерами. Углекислый газ транспортируется таким же образом, но в меньших масштабах из-за ограниченного спроса на него. Свойства сжиженного углекислого газа схожи со свойствами сжиженных углеводородных газов, и данная технология может быть адаптирована для перевозки значительных объемов углекислого газа.

Сжиженный или сжатый углекислый газ также можно перевозить железнодорожными и автомобильными цистернами. При этом, затраты на данные виды перевозок являются значительными в настоящее время, и имеют актуальность для небольших точечных источников эмиссии углекислого газа при условии изменения нормативного регулирования выбросов и платы за выбросы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Транспортировка CO_2 возможна в трех состояниях: газообразном, жидком и твердом. Цистерны, трубопроводы и суда могут быть использованы для газообразного и жидкого углекислого газа. Газ, транспортируемый при давлении близком к атмосферному, занимает значительный объем, что обуславливает необходимость в значительных объемах транспортных емкостей. Объем транспортируемого CO_2 может быть значительно сокращен путем сжатия, сжижения, перевода в твердую фазу или гидратации. При этом сжижение является отработанной технологией морской транспортировки сжиженного нефтяного или природного газа. Существующие технологии и опыт могут быть перенесены на транспорт сжиженного CO_2 .

Перевод CO_2 в твердую фазу требует затрат существенно большего количества энергии по сравнению с другими вариантами сокращения объема, а также является более дорогостоящим. Исследования и разработки по транспортировке гидратов природного газа для замены систем сжижения природного газа, находятся в стадии разработки, и результаты могут быть применены к перевозкам CO_2 в будущем. При использовании трубопроводного транспорта объем транспортируемого вещества значительно сокращается за счет транспортировки при высоком давлении в газопроводах при рабочем давлении от 10 до 80 МПа.

Транспортная инфраструктура для перевозки углекислого газа в необходимых для смягчения последствий изменения климата

количествах [2] включает развитую сеть углеродопроводов. Характеристики существующих трубопроводов для транспортировки углекислого газа приведены в таблице.

Таблица. Характеристики существующих трубопроводов для транспортировки углекислого газа

Table. Characteristics of existing pipelines for transporting carbon dioxide

Трубопровод	Местонахождение трубопровода	Оператор	Мощность, МтСО ₂ /год	Длина, км	Год создания
Cortez	США	Kinder Morgan	19,3	808	1984
Sheep Mountain	США	BP Amoco	9,5	660	1984
Bravo	США	BP Amoco	7,3	350	1984
Canyon Reef Carriers	США	Kinder Morgan	5,2	225	1972
Val Verde	США	Petrosource	2,5	130	1998
Bati Raman	Турция	Turkish Petroleum	1,1	90	1983
Weyburn	США и Канада	North Dakota Gasification	5	328	2000
Всего			49,9	2591	

Анализ существующих углеродопроводов показывает, что их создание зачастую связано с реализацией технологии повышения нефтеотдачи пласта. При этом содержание азота является значимым для данного вида использования СО₂, нежели чем для транспортировки СО₂ с целью захоронения в геологических пластах. При строительстве углеродопровод должен заглубляться не менее чем на 1 м в пределах полосы отвода. При прохождении в непосредственной близости от населенных пунктов расположение трубопровода должно быть обозначено для осведомления жителей. Вместе с тем, жители также должны быть оповещены о признаках и порядке действий при утечке СО₂.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При проектировании углеродопроводов целесообразно исходить из физических, экологических и социальных факторов района расположения трубопровода [8, 9]. Также необходимо определение

предполагаемого маршрута и особенностей углеродопровода для оценки рассматриваемого проекта строительства и его стоимости. В качестве особенностей углеродопровода можно выделить такие характеристики транспортного процесса, как физические характеристики транспортируемой смеси, оптимальные размеры и давление в трубопроводе, а также особенности механической конструкций (клапаны, насосы, компрессоры, уплотнения, и т.д.). Топография полосы отвода трубопровода оказывает значительное влияние на проектирование углеродопроводов, при этом должны учитываться особенности местности, такие как наличие гористой или пустынной местности, необходимость пересечения водных объектов.

При оценке экологических особенностей местности целесообразно учитывать годовой диапазон температуры во время строительства и в период эксплуатации, наличие потенциально неустойчивых склонов, морозного пучения, многолетнемерзлых грунтов, сейсмической активности, водоносных горизонтов и другие экологических особенностей, в том числе близость особо охраняемых природных территорий.

Следует также учитывать наличие существующей потребности в создании новой инфраструктуры, такой как автомобильные или железные дороги, трубопроводные эстакады, сельские или городские условия и пр.

Рассматривая возможность транспортировки уловленного углекислого газа водным транспортом, следует учитывать, что улавливание углекислого газа в выбросах промышленных предприятий ведется непрерывно. Однако, при использовании водного транспорта необходимо учитывать дискретность цикла судовых перевозок. Последнее обстоятельство предполагает, что водная транспортная система должна иметь временное хранение CO_2 на суше. Емкость берегового хранилища CO_2 , скорость обслуживания, количество судов и график отгрузки могут планироваться с учетом, скорости улавливания CO_2 , расстояния транспортировки, а также социальных, климатических и технических особенностей. Перевозка CO_2 на судах имеет ряд сходств с транспортировкой сжиженного нефтяного газа водным транспортом.

Если пункт доставки CO_2 находится на берегу, то выгрузка с судов производится в резервуары временного хранения или непосредственно в систему захоронения CO_2 в геологические формации. В случае, если пункт доставки находится на воде, то выгрузка осуществляется в плавучее

хранилище (аналогично производственно-хранилищному комплексу, применяемому при морской добыче нефти), или непосредственно в систему захоронения CO_2 в геологические формации.

В настоящее время, использование судов для перевозки CO_2 реализовано в виде транспортировки сжиженного пищевого углекислого газа из крупных точечных источников до прибрежных распределительных терминалов в регионах потребителей. Дальнейшие поставки от распределительных терминалов CO_2 осуществляются либо автоцистернами, либо в баллонах под давлением. Кроме того, ведется работа по проектированию крупных судов для перевозки CO_2 и объектов инфраструктуры по сжижению и промежуточному хранению транспортируемого газа.

Перевозка уловленного углекислого газа железнодорожным или автомобильным транспортом является более дорогостоящим способом транспортировки, по сравнению с трубопроводным и водным транспортом. Выбросы точечных крупных источников выбросов целесообразно направлять в сеть углеродопроводов, однако существенная часть выбросов происходит на небольших точечных территориально распределенных объектах электроснабжения, теплоснабжения и иных производственных предприятиях. При наличии резервуаров временного хранения CO_2 на данных объектах возможно накопление выбросов в емкостях на железнодорожной платформе или колесной базе, для периодического вывоза сжатых газов видом транспорта, подъездные пути к которому обеспечены объектом эмиссии CO_2 .

Наряду с этим, возможно накопление выбросов CO_2 в стационарных резервуарах, размещенных на производственных площадках предприятий с последующим периодическим перекачиваем в железнодорожные или автомобильные емкости для транспортировки выбросов к местам захоронения углекислого газа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ способов транспортировки уловленного углекислого газа к местам его захоронения показал, что в настоящий момент существует система транспортировки выбросов трубопроводным транспортом. Протяженность углеродопроводов составляет более 2500 км, и уловленный углекислый газ используется для повышения нефтеотдачи пластов. К тому же, для обеспечения безопасности, в том числе снижения коррозионного износа трубопровода, поставщик газа

должен придерживаться определенных характеристик качества CO_2 , перед его поступлением в углеродопровод.

Перевозка CO_2 водным транспортом имеет ряд сходств с транспортировкой сжиженного нефтяного газа. В то же время, данный вид перевозок должен быть обеспечен инфраструктурой накопления и временного хранения уловленного CO_2 , что обуславливается дискретным характером водных перевозок, в отличие от трубопроводных.

Транспортировка уловленного углекислого газа железнодорожным или автомобильным транспортом является более дорогостоящим, по сравнению с трубопроводным и водным транспортом и не является целесообразным для точечных крупных источников выбросов. Однако при наличии резервуаров временного хранения CO_2 на небольших точечных территориально распределенных источниках эмиссии возможно накопление выбросов в емкостях на железнодорожной платформе или колесной базе, для периодического вывоза сжатых газов тем видом транспорта, подъездными путями к которым обеспечен объект эмиссии CO_2 .

Авторы заявляют, что:

1. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глобальные технологические тренды. Трендлеттер / рациональное природопользование. Технологии улавливания и захоронения углерода. Дата обращения: 13.01.2024. Режим доступа: <http://issek.hse.ru/trendletter>
2. Metz B., Davidson O., de Coninck H. C., et al. IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
3. Scaling up the CCS Market to Deliver Net-Zero Emissions. Дата обращения: 13.01.2024. Режим доступа: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/scaling-up-the-ccs-market-to-deliver-net-zero-emissions/>
4. Парижское соглашение по климату. Дата обращения: 13.01.2024. Режим доступа: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/russian_paris_agreement.pdf

5. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., et al. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2023. doi: 10.1017/9781009325844
6. Технологии по улавливанию, хранению и использованию углерода (CCUS) – технологическая основа декарбонизации тяжелой промышленности в РФ. Дата обращения: 13.01.2024. Режим доступа: https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_RU_final_0.pdf
7. Seiersten M. Material selection for separation, transportation and disposal of CO₂. In: *Proceedings Corrosion 2001*, National Association of Corrosion Engineers, 2001;01042 doi: 10.1016/b978-008044570-0/50143-4
8. Ахтямов Р.Г., Мещерякова Н.А. Реализация подходов к сокращению выбросов парниковых газов в железнодорожной отрасли // *Безопасность жизнедеятельности*. 2023. № 2(266). С. 20–25. EDN: JIMPRZA
9. Titova T., Akhtyamov R., Nasyrova E., Elizaryev A. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 49. P. 473–478. doi: 10.1007/978-981-15-0450-1_49

REFERENCES

1. Global'nye tekhnologicheskie trendy. Trendletter / racional'noe prirodopol'zovanie. Tekhnologii ulavlivaniya i zahoroneniya ugleroda [Internet]. [cited 2024 January 13]. Available from: <http://issek.hse.ru/trendletter> (In Russ.)
2. Metz B, Davidson O, de Coninck HC, et al. IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
3. Scaling up the CCS Market to Deliver Net-Zero Emissions [Internet]. [cited 2024 January 13]. Available from: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/scaling-up-the-ccs-market-to-deliver-net-zero-emissions/>
4. Parizhskoe soglasenie po klimatu [Internet]. [cited 2024 January 13]. Available from: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/russian_paris_agreement.pdf (In Russ.)
5. Pörtner H-O, Roberts DC, Tignor M, et al. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2023. doi: 10.1017/9781009325844
6. Tekhnologii po ulavlivaniyu, hraneniyu i ispol'zovaniyu ugleroda (CCUS) – tekhnologicheskaya osnova dekarbonizatsii tyazhelej promyshlennosti v RF [Internet]. [cited 2024 January 13]. Available from: https://unece.org/sites/default/files/2021-03/CCUS%20brochure_RU_final_0.pdf (In Russ.)
7. Seiersten M. Material selection for separation, transportation and disposal of CO₂. In: *Proceedings Corrosion 2001*. National Association of Corrosion Engineers; 2001;01042. doi: 10.1016/b978-008044570-0/50143-4

8. Akhtyamov RG, Mescheriakova NA. Implementation of approaches to reduce greenhouse gas emissions in the railway industry. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2023;2(266):20–25. (In Russ.)
9. Titova T, Akhtyamov R, Nasyrova E, Elizaryev A. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020;49:473–478. doi: 10.1007/978-981-15-0450-1_49

Сведения об авторах:

Ахтямов Расул Гумерович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0001-8732-219X
E-mail: ahtamov_zchs@mail.ru

Information about the authors:

Rasul G. Akhtyamov, Candidate of Technical Sciences;
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0001-8732-219X;
E-mail: ahtamov_zchs@mail.ru