ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-199-217

CURRENT STATUS AND PERSPECTIVE FOR THE DEVELOPMENT OF SHIPS AND PORT TERMINALS FOR CARBON DIOXIDE (CO_2)

N. V. Kuptsov

Gazpromneft Science & Technology Center, St. Petersburg, Russian Federation

The current achievements and future prospects in international scientific and project activities in the field of sea transportation of carbon dioxide (CO_2) for further application in projects in the Russian Federation are analyzed in the paper. The theme is relatively new and actual — the port transshipment and transportation of this new gaseous cargo has been considered by the authors since the early 2010s, the first projects will be implemented by the mid-2020s. CCS (carbon capture and storage) is capture of CO_2 from industrial processes, transportation and storage in underground geological structures; it is one of the key large-scale technologies for reducing CO_2 emissions at industrial facilities. This causes a growing interest in the development of CO_2 maritime transport, which is confirmed by the fact that in the current decade in Europe more than 5 large-tonnage CO_2 maritime hubs have been announced for implementation. Maritime transport is a promising type for the delivery of carbon dioxide from territorially remote emitters (more than 1 km) to CO_2 injection geological fields, what is confirmed by the scientific researches and feasibility studies. The analysis of the most cited and authoritative scientific sources performed in the paper has shown that significant progress has been made in certain technological areas: the reliability of the technological chain has been confirmed, the transport characteristics of CO_2 have been determined, and a conclusion about the advisability of transporting CO_2 in ships under medium (15–20 bar, operated by a small-tonnage fleet of food-quality CO_2 and vessels for the Norwegian Longship project) or low pressure (up to 10 bar, the greatest prospects are in cost reduction and increase of cargo capacity) has been drawn. At port terminals, operations for CO_2 storage in isothermal tanks and loading-unloading through marine loading arms of liquid cryogenic cargoes will be confirmed by 2024 with the construction of the first marine CO_2 hub in Norway (Northern Lights). In the study described in the paper, for the first time on the Russian language, the general functional and technological logic of the CO2 maritime transport chain is formed and the best promising available technologies are identified. Eventually based on the results of the analysis, a groundwork for further research and applied work, which has high potential due to the growing demand of the state and industrial enterprises to reduce the carbon footprint, is created.

Keywords: marine ships for carbon dioxide (CO_2), port terminals for carbon dioxide (CO_2), maritime transport of carbon dioxide (CO_2), CCS projects, greenhouse gas reduction, decarbonization, energy transition, ESG.

For citation:
Kuptsov, Nikolay V. "Current status and perspective for the development of ships and port terminals for carbon dioxide (CO_2)." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 199–217. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-199-217.

УДК 656.61

ТЕКУЩИЙ СТАТУС И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МОРСКИХ СУДОВ И ПОРТОВЫХ ТЕРМИНАЛОВ ДЛЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Н. В. Купцов

ООО «Газпромнефть НТЦ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье выполнен анализ текущих достижений и дальнейших перспектив в международной научной и проектной деятельности по направлению морской транспортировки углекислого газа (CO_2) в целях дальнейшего применения на проектах в РФ. Отмечается, что данное направление является актуальным — задачи по портовой перевалке и транспортировке этого нового газообразного груза рассматриваются авторами с начала 2010-х гг., первые морские проекты будут реализованы в середине 2020-х гг. CCS (от англ. «carbon capture and storage») — улавливание CO_2 от промышленных технологических процессов, его транспортировка и хранение в подземных геологических структурах — одна ключевых крупнотоннажных технологий снижения выбросов CO_2 на промышленных объектах. Это обуславливает растущий

интерес к развитию морского транспорта CO_2 и подтверждается тем, что в текущем десятилетии в Европе заявлено к реализации более пяти морских крупнотоннажных хабов CO_2. Подчеркивается, что морской транспорт является перспективным способом доставки углекислого газа от территориально отдаленных эмитентов (более 1 км) до месторождений по закачке CO_2, что подтверждают научные исследования и технико-экономические обоснования. Выполненный в статье анализ наиболее цитируемых и авторитетных научных международных источников показывает, что по отдельным технологическим направлениям достигнут заметный прогресс: подтверждена надежность технологической цепочки, определены транспортные характеристики CO_2, сформирован вывод о целесообразности перевозок CO_2 на судах под средним (15–20 атм — эксплуатируемый малотоннажный флот пищевого CO_2 и строящиеся суда для норвежского проекта Longship) или малым давлением (до 10 атм — наибольшие перспективы в снижении стоимости и увеличении судовых партий). В предлагаемом обзорном исследовании впервые в отечественной практике сформирован общий функционально-технологический принцип цепочки морского транспорта CO_2 и определены оптимальные перспективные технологии. В результате на основе результатов выполненного анализа создана база для дальнейших исследовательских и прикладных работ, являющихся особенно актуальными в связи с растущей заинтересованностью государства и промышленных предприятий в снижении углеродного следа.

Ключевые слова: морские суда, углекислый газ, портовые терминалы, морская транспортировка, CCS-проекты, выбросы углекислого газа, декарбонизация, энергопереход, ESG.

Для цитирования:
Купцов Н. В. Текущий статус и перспективы развития морских судов и портовых терминалов для углекислого газа / Н. В. Купцов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 199–217. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-199-217.

Введение (Introduction)

В XXI в. большое количество научных исследований посвящено воздействию человека на окружающую среду. Во многих из них отмечается, что создаваемая человеком техногенная эмиссия парниковых газов способствует антропогенному изменению климата с приростом глобальной температуры, повышением уровня моря, более сильными штормами и повышением кислотности океанов. Порядка 90 промышленно-развитых стран осуществляют 2/3 от общей техногенной эмиссии диоксида углерода (CO_2) и метана (CH_4) [1], выбросы которых составляют большую часть техногенной эмиссии парниковых газов в мире (рис. 1).

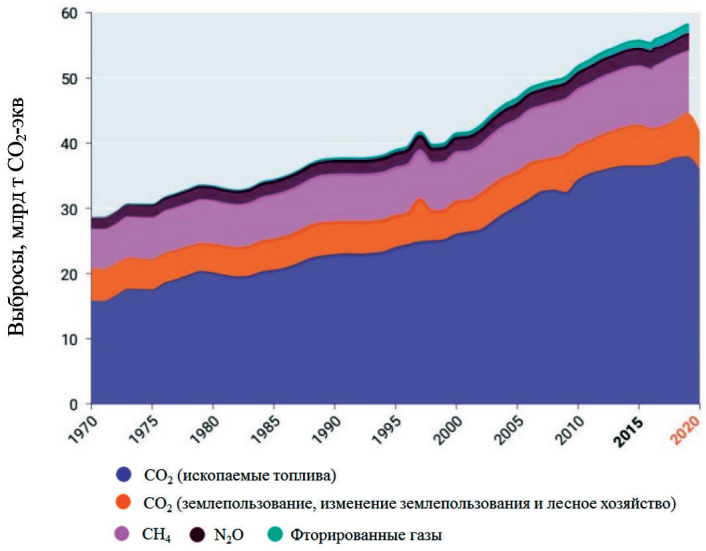

Рис. 1. Мировая эмиссия парниковых газов в 1970–2020 гг.

По оценке Организации объединенных наций (ООН), в настоящее время температура на Земле примерно на 1,1 ºС выше, чем в в конце XIX – начале XX в. (рис. 2). Причем начиная с 1970 г. наблю-

дается более стремительное повышение глобальной температуры, чем за любой другой пятидесятилетний период. Так, 2010–2019 гг. является максимально теплым десятилетием с момента начала проведения наблюдений. При сохранении текущего объема выбросов углекислого газа глобальная температура к концу XXI в. может повыситься на 4,4 ºС [2], [3].

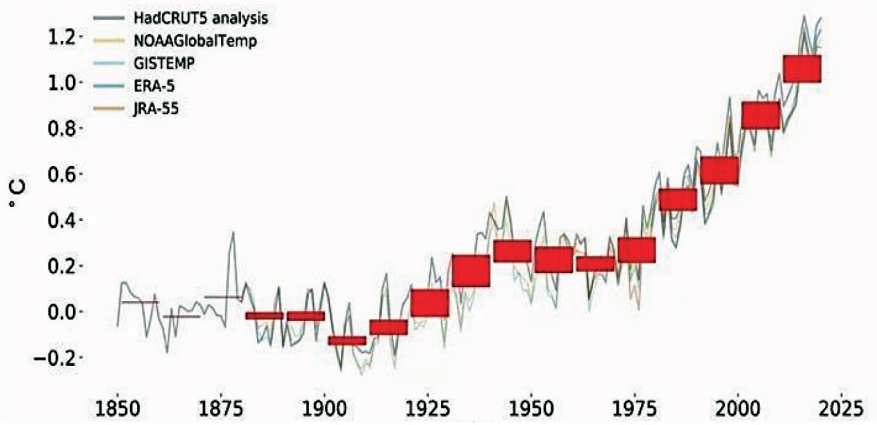

Рис. 2. Мировое увеличение температуры по сравнению с периодом 1850–1900 гг.

По оценке Global Carbon Project [4], в XX в. наблюдалось стремительное увеличение техногенной эмиссии CO2: 2 млрд т/год (1900 г.) → 6 млрд т/год (1950 г.) → 9,4 млрд т/год (1960 г.) → 14,9 млрд т/год (1970 г.) → 19,5 млрд т/год (1980 г.) → 22,8 млрд т/год (1990 г.) → 25,2 млрд т/год (2000 г.) → 33,3 млрд т/год (2010 г.) → 36,7 млрд т/год (2019 г.). По различным оценкам, текущая мировая эмиссия углекислого газа составляет 35–40 млрд т CO_2/год. Во многом это связано с индустриализацией общества и увеличением мирового населения, для обеспечения нужд которого требуются дополнительные энергетические и производственные ресурсы.

Парижское соглашение [5] в рамках «Рамочной конвенции ООН об изменении климата», подписанное в 2016 г. 196 странами — участниками ООН, является первым коллективным обязательством по управлению климатическими последствиями в части удержания общемировой температуры менее 2 ºС сверх доиндустриальных уровней начала XX в. В 2021 г. разработан «Климатический пакт Глазго», в котором утверждены базовые правила в формате «Свода правил к Парижскому соглашению». В рамках «Климатического пакта Глазго» обязательства, касающегося вопросов достижения чистого нулевого уровня выбросов приняли государства, на которые приходится более 90 % мирового ВВП [6].

В дальнейшем мировыми финансовыми институтами планируется поэтапное сокращение инвестиций в новые проекты производства электроэнергии с использованием ископаемого топлива (в большей степени угля) без улавливания CO_2. В связи с этим страны формируют собственные долгосрочные стратегии развития, акцентируя внимание на меньшей углеродной интенсивности, что будет способствовать переходу к климатически-нейтральному миру. Большинство стратегий сводятся к тому, что страны принимают на себя обязательства в достижении максимального уровня собственной эмиссии парниковых газов (Китай к 2030 г., Индия в 2040–2045 гг.) и дальнейшем снижении пиковых значений. Правительства большинства развитых стран вводят элементы углеродного регулирования по вопросу установления цен на выбросы CO_2, что окажет влияние на экономику стран и международный торговый баланс [7].

Достижение глобальных целей декарбонизации без внедрения новых способов снижения выбросов невозможно. Среди промышленных технологических процессов следует выделить CCS (от англ. «Carbon Capture and Storage») — крупнотоннажное улавливание CO_2 от источников, его транспортировка (трубопроводами или морскими судами) и хранение в подземных геологических структурах. По различным оценкам специалистов, к 2050 г. с развитием технологии CCS в формате крупнотоннажных хабов возможно снижение мировой эмиссии на 5–10 млрд т CO_2/год. Согласно

прогнозу Международного энергетического агентства (МЭА) [8] за счет CCS к 2050 г. ожидается снижение выбросов на 7,6 млрд т CO_2/год (рис. 3).

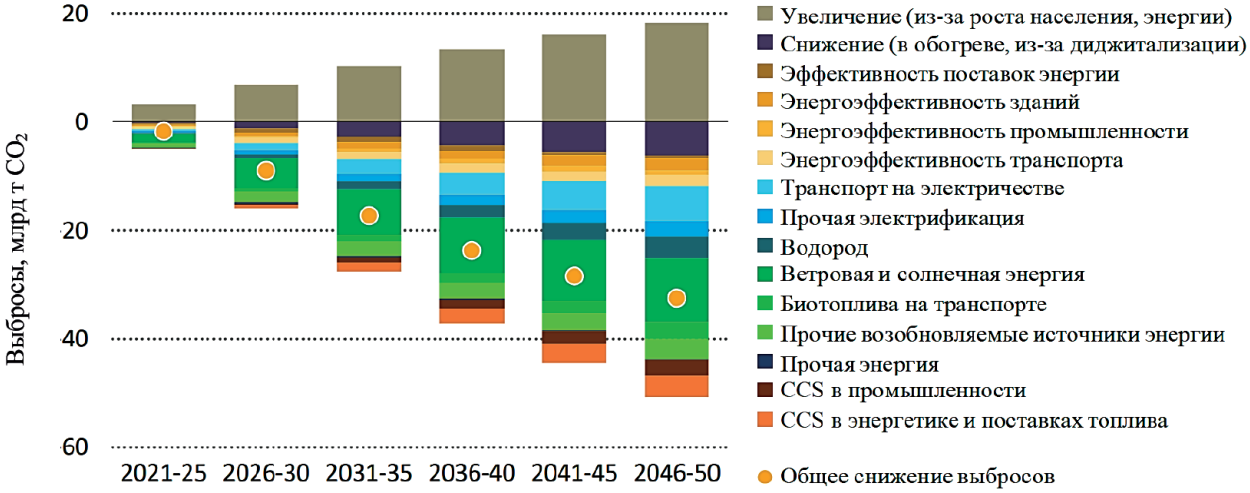

Рис. 3. Прогноз по инструментам глобального снижения выбросов CO_2 в 2021–2050 гг. с учетом применения различных технологий и проведения мероприятий

Таким образом, CCS является одной из ключевых крупнотоннажных технологий секвестирования выбросов для достижения целей *климатической повестки*. В связи с тем, что технологии CCS используются давно, в нефтегазовой отрасли имеется опыт их применения начиная с 1970-х гг. Текущий уровень технологического развития позволяет реализовывать подобные проекты и безопасно хранить CO_2. По оценке Global CCS Institute [9], начиная с 1972 г. накоплено 200 млн т CO_2, закачанного в геологические структуры под землей. По состоянию на сентябрь 2021 г. [9], существует 27 проектов на стадии эксплуатации с ежегодной закачкой 36,6 млн т CO_2, из которых крупнейшими являются: газоперабатывающий завод в США Shute Creek — 7 млн т CO_2/год; нефтяное месторождение Santos в Бразилии — 4,6 млн т CO_2/год; завод Gorgon СПГ в Австралии — 4 млн т CO_2/год; четыре объекта находятся на стадии строительства, 58 проектов на заключительных инженерных стадиях разработки проектной документации (FEED) и принятия финальных инвестиционных решений (FID).

Методы и материалы (Methods and Materials)

В текущих эксплуатируемых проектах используются трубопроводы для транспортировки CO_2, что связано наличием геологического коллектора вблизи предприятия-эмитента (зачастую надземная и подземная части являются единым технологическим комплексом). При этом существует ряд перспективных проектов, в которых применение морского транспорта CO_2 рассматривается в качестве основного решения для перемещения углекислого газа от промышленных эмитентов к отдаленным на значительное расстояние крупным геологическим структурам: Longship 5 млн т CO_2/год (Норвегия), Greensand 4–8 млн т CO_2/год (Дания), Barents Blue 2 млн т CO_2/год (Норвегия), Acorn 1,5 млн т CO_2/год (Великобритания), Dartagnan 10 млн т CO_2/год + Aramis 20 млн т CO2/год (Нидерланды), Carbon Connect Delta 6,5 млн т CO_2/год (Бельгия), Tomakomai (Япония). К 2024–2025 гг. планируется дооснащение существующей CCS-цепочки морскими судами для перевозок CO_2 от территориально отдаленных японских предприятий.

Российская Федерация имеет значительный потенциал для реализации подобных международных CCS-проектов с транспортом CO_2 на морских судах, особенно на Дальнем Востоке, в связи с геологической изученностью и близостью промышленных эмитентов из Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Основное препятствие связано с отсутствием экономических стимулов и возможностей монетизации CCS-проектов. На текущий момент они развиваются в качестве опережающей инфраструктуры в странах с введенными мерами стимулирования или налогообложения на CO_2. С по-

явлением трансграничного регулирования (в частности, EU Carbon Border Adjustment Mechanism [10]) механизм дополнительного регулирования квот на выбросы для импортеров недостаточно «чистой» продукции в Европейский союз будет введен поэтапно начиная с 2023 г.) в ближайшем будущем появятся рыночные механизмы определения стоимости каждой тонны CO_2. Это явится стимулом для развития проектов CCS, потенциал которых оценивается в качестве создания отдельной отрасли.

Исследование R. Svensson [11] в 2004 г. является одним из первых, в котором на основе исследования базовых предпосылок доказано, что морской и трубопроводный транспорт для CO_2 являются более перспективными по сравнению с железнодорожным и автотранспортом, что связано с их преимуществами в крупнотоннажном использовании с меньшими затратами. В своих исследованиях B. Metz [12], Zero Platform [13], G. A. Fimbres Weihs [14], B. Y. Yoo [15], M. Knoope [16] и S. Roussanaly [17], [18] пришли к выводу о том, что морской транспорт CO_2, по экономической оценке, превосходит сухопутные трубопроводы на расстоянии более 500–1500 км и подводные трубопроводы на расстоянии более 300–500 км. В дальнейшем H. Al Baroudi [19] были систематизированы характеристики по каждому из видов транспорта CO_2 (табл. 1).

Таблица 1

Варианты транспорта углекислого газа CO_2

Вид транспорта	Характеристики CO_2	Фазовое состояние CO_2	Комментарии
Морские суда	50–200 атм, 10…34 °C	Газообразный, плотный	Высокие капитальные затраты, меньшие операционные затраты. Дорогостоящая система при малом давлении CO_2
Трубопроводы	6,5–45 атм, –52…10 °C	Жидкий	Высокие операционные затраты, меньшие капитальные затраты. В настоящее время существуют в малых объемах для пищевого назначения
Железная дорога	17–20 атм, –30…20 °C	Жидкий	Необходимы отдельные системы погрузки и разгрузки на железнодорожных станциях. Не существует крупнотоннажных примеров
Автотранспорт	6,5–26 атм, –50… –20 °C	Жидкий	Малые партии (2–30 т). Отсутствие экономической эффективности для крупнотоннажных перевозок

Изучение крупнотоннажной морской транспортировки углекислого газа началось в 2000-х гг. В одной из первых работ, выполненных в 2004 г. компанией Mitsubishi Heavy Industries в рамках исследовательской программы МЭА Greenhouse Gas [20], была подтверждена возможность транспортировки CO_2 стоимостью от 10–20 долл./т на расстояния 2000 км до 40–50 долл./т на расстояния 10000–12000 км. Другая японская корпорация Chiyoda в 2011–2012 гг. последовательно вносила инвестиции в оценку стоимости морского транспорта CO_2 [21] и вариантов закачки с плавучего судна-баржи [22].

Проведенные на ранних стадиях исследования по транспортировке CO_2 на морском транспорте выполнены в различных странах и регионах мира. Так, S. Decarre в 2010 г. было выполнено исследование по морской транспортировке CO_2 для Французского агентства по окружающей среде и энергетике [24], M. Tetteroo и T. N. Vermeulen в 2011 г. изучена возможность создания морского хаба в районе Роттердама [25], [26]. В Японии в 2013 г. M. Ozaki [27] была исследована возможность применения судов-челноков с CO_2 для отправки к местам закачки углекислого газа, J. Y. Jung в 2013 г. предложена транспортная стратегия и рассчитана стоимость транспортировки CO_2 для CCS в Южной Корее [28], H. Nam в 2013 г. изучены характеристики и стоимость всех элементов CCS-цепочки с морским транспортом для хранения CO_2 в странах Юго-Восточной Азии (Таиланд, Вьетнам, Филиппины, Бруней, Индонезия) [29], Kjärstad в 2016 г. для кластерного подхода

в Швеции и Скандинавии сделан вывод о приоритетности морского транспорта CO_2 [30]. Министерство энергетики Норвегии в 2016 г. завершило проект ранней стадии (Feasibility Study) для CCS-хаба в стране [31], в Великобритании в 2018 г. для Департамента бизнеса, энергии и индустриальной стратегии завершено исследование возможностей морской транспортировки CO_2 для потенциальных портов-хабов в стране [32].

Для стран Европы проведенные исследования во многом были направлены на использование крупных отработанных месторождений на британском и норвежском шельфе Северного моря. В 2020 г. в рамках программы МЭА Greenhouse Gas выполнено исследование [23], в котором приведены данные о современном статусе и технологических вызовах по морской транспортировке CO_2, рассчитаны экономические предпосылки перевозок на судах под малым и средним давлением от Роттердама до геологических структур в Северном море. Развитые азиатские страны (Япония, Южная Корея) не имеют собственных геологических хранилищ, поэтому разработка вариантов морского транспорта CO_2 для них является первостепенной задачей. В Северной Америке в большей степени занимаются научными исследованиями вопросов трубопроводного транспорта CO_2, что связано с эксплуатируемой протяженной сетью трубопроводов CO_2 между нефтегазовыми месторождениями, составляющей более 6300 км [33].

Во многом исследовательские работы посвящены рассмотрению морской транспортировки для закачки углекислого газа на шельфе Северного моря в территориальных границах Норвегии. Это связано в том числе с государственным запросом — большинство исследований выполнены как гранты Министерства нефти и энергетики или по заказу государственного CCS-оператора Gassnova. Во многом эта работа проводилась норвежской независимой исследовательской организацией SINTEF, находящейся в Тронхейме, которая является организатором конференции Trondheim CCS, начиная с 2010 г. На ранних стадиях в исследованиях G. Hegerland [34], F. Neele [35] и A. Aspelund [36] рассматривались поставки CO_2 морским транспортом в целях увеличения нефтеотдачи на шельфе Норвегии. В дальнейшем возникла концепция независимого крупнотоннажного хаба по приемке и закачке углекислого газа. Результатом более чем десятилетней деятельности явилась реализация первого коммерческого проекта CCS в мире с морской составляющей транспорта CO_2 — Longship, на который в 2020 г. выделено финансирование государства и компаний-инвесторов [37], сейчас он находится в процессе строительства. В 2020 г. завершена стадия детализированного проектирования (FEED) по морскому хабу Northern Lights [38], который входит в CCS-цепочку проекта Longship.

Современные исследования (в основном в Норвегии) направлены на оптимизацию стоимости CCS-цепочки и поиск оптимального давления для морских перевозок. В публикациях H. Deng [39], D. M. Fraga [40] и S. Roussanaly [41] сделаны выводы о больших перспективах морских перевозок под давлением в 7 атм по сравнению с текущими перевозками под давлением 15 атм. Отдельным направлением являются исследования J. Jakobsen [42], H. Noh [43], V. S. Bjerketvedt [44] и S. Roussanaly [45] по вопросам более точного определения характеристик и стоимости составляющих CCS-цепочки.

Морская транспортировка CO_2 находится в Российской Федерации на этапе становления. Специализированные отечественные научные исследования в данном направлении не разрабатывались в связи с отсутствующим ранее запросом на декарбонизацию. В настоящее время возникает необходимость в формировании понятийного аппарата, систематизации преимуществ и недостатков разработанных в мире технологических решений. Существует возможность апробации наилучших доступных зарубежных технологий, принимая во внимание 15-летний международный опыт в данном направлении. Российские специалисты имеют возможность изучения и применения наилучших доступных решений в CCS, которые уже существуют и при этом не освещены в отечественной науке. В дальнейшем научной задачей может явиться создание и апробация функционально-стоимостных моделей, обеспечивающих принятие необходимых управленческих решений в первых в Российской Федерации дорогостоящих проектах CCS с морским транспортом.

Основной целью работы является систематизация и критический анализ полученных в течение прошлых десятилетий технологических решений по морской транспортировке CO_2 на судах

и перевалке на портовых терминалах, а также определение наиболее перспективных из них в целях последующих исследований и углубленного изучения для создания проектов CCS в РФ.

Обсуждение (Discussion)

Технологическая цепочка транспортировки CO_2 с морской составляющей. Общая функционально-технологическая логика цепочки морского транспорта CO_2 представлена на рис. 4. Основными элементами морской транспортировки CO_2 являются терминалы по отправке (экспорт) и приемке (импорт), а также суда. В данной работе не рассматриваются плавучие / оффшорные решения по закачке CO_2, так как таких концептуальных разработок и предложений пока не существует. По компонентам улавливания трубопроводного транспорта и закачке CO_2 в скважины в данной работе приведены общие сведения для понимания целостности CCS-цепочки.

Рис. 4. Технологическая цепочка морского транспорта CO_2

В частности, CCS-проект Longship с морским транспортом CO_2 в Норвегии — единственный в мире, в отношении которого принято инвестиционное решение. Данный проект планируется к вводу в эксплуатацию к 2024 г. Текущая технологическая цепочка проекта (рис. 5): две норвежские площадки улавливания эмиссии (цементный завод Norcem и теплоэлектростанция Fortum, на каждой из которых не менее 0,4 т/год CO_2), два судна для морской транспортировки CO_2, морской терминал-хаб Northern Lights в районе Бергена по приемке CO_2 с судов, подводный трубопровод, донный комплекс для закачки CO_2 в геологический резервуар на шельфе Норвегии. В дальнейшем проект планирует увеличение количества эмитентов за счет европейских предприятий, что приведет к расширению терминала Northern Lights и увеличению количества судов.

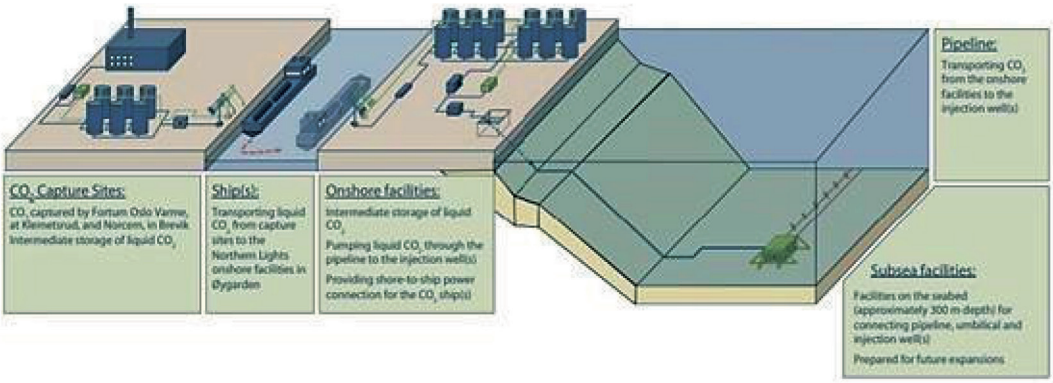

Рис. 5. Технологическая цепочка CO_2 на проекте Longship

Улавливание, трубопроводы и закачка CO_2. Углекислый газ в крупных объемах возникает при улавливании и подготовке на промышленных площадках эмитентов (энергетические, цементные, газохимические или другие предприятия). Принцип улавливания состоит в следующем: нагретые дымовые газы отводятся на установку улавливания, на которой с использованием технологии аминовой абсорбции происходит сепарация газового флюида на отдельные фракции. В частности, начиная с 2002 г. крупнотоннажные установки улавливания компании-лицензиара Shell функционируют в Бельгии, Канаде, США, Индии и Китае. На рис. 6 показан принцип работы возведенной

в 2014 г. установки улавливания углекислого газа на угольной электростанции Boundary Dam в Канаде, которая направляет порядка 0,8 млн т/год очищенного CO_2 на интенсификацию нефтедобычи и производит серную кислоту.

а) б) в)

Рис. 6. Установка улавливания CO_2 на угольной электростанции Boundary Dam в Канаде:
а — общий вид электростанции; *б* — отвод потока дымовых газов;
в — установка улавливания и подготовки CO_2

По оценке Global CCS Institute [46] по состоянию на период 2013 г., в мире существовало более 6500 км сухопутных и подводных трубопроводов CO_2 (на рис. 7 показаны основные существующие и планируемые трубопроводы). В основном они используются для доставки углекислого газа к нефтегазовым месторождениям в целях увеличения нефтедобычи или для длительного хранения в геологических структурах без полезного использования. Большинство из них расположены в США и Канаде. Проект Cortez (США) является наиболее протяженным трубопроводом длиной 808 км. Углекислый газ в трубопроводах транспортируют в жидком суперкритическом состоянии при достаточно высоком давлении (в среднем 30–145 атм), максимальное проектное значение давления составляет до 200 атм. Как правило, насосная станция находится на площадке улавливания.

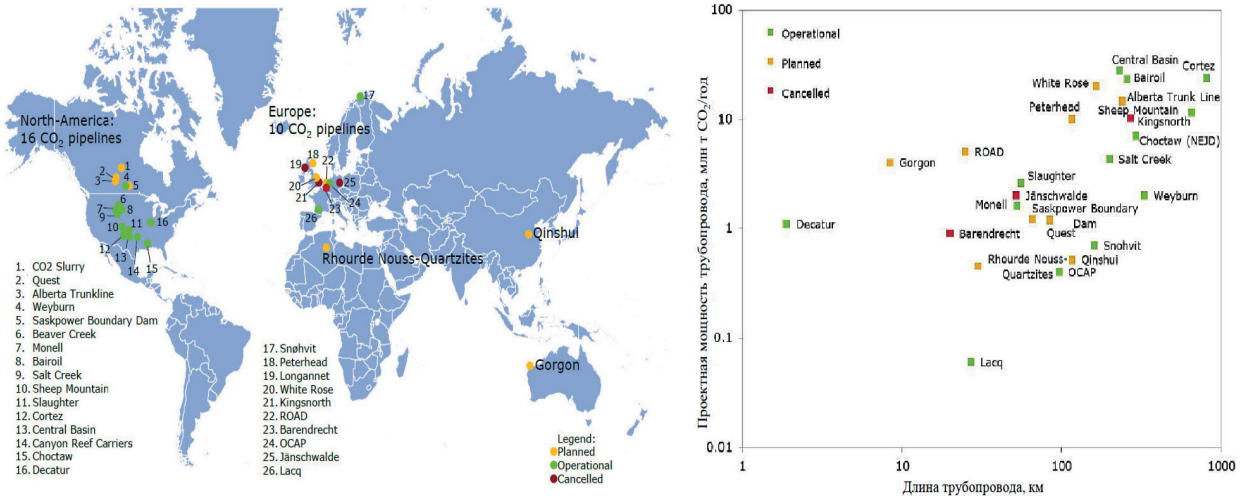

Рис. 7. Существующие и планируемые трубопроводы CO_2
в мире по состоянию на 2013 г.

Хранение CO_2 в геологических структурах сопровождается бурением скважин, по которым в дальнейшем в эксплуатационном режиме углекислый газ подается под поверхность земли. Глубина скважины зависит от геологического разреза и выбранного пласта. Характеристики системы закачки (давление, производительность, количество скважин и др.) подбирают в зависимости от геологических свойств породы. Наиболее перспективными структурами являются водоносные горизонты — *аквиферы*. На карте (рис. 8) показан геологический потенциал хранения CO_2 в мире, причем значительная часть перспективных зон осадконакопления сосредоточена в РФ в традиционных регионах нефтегазодобычи [9].

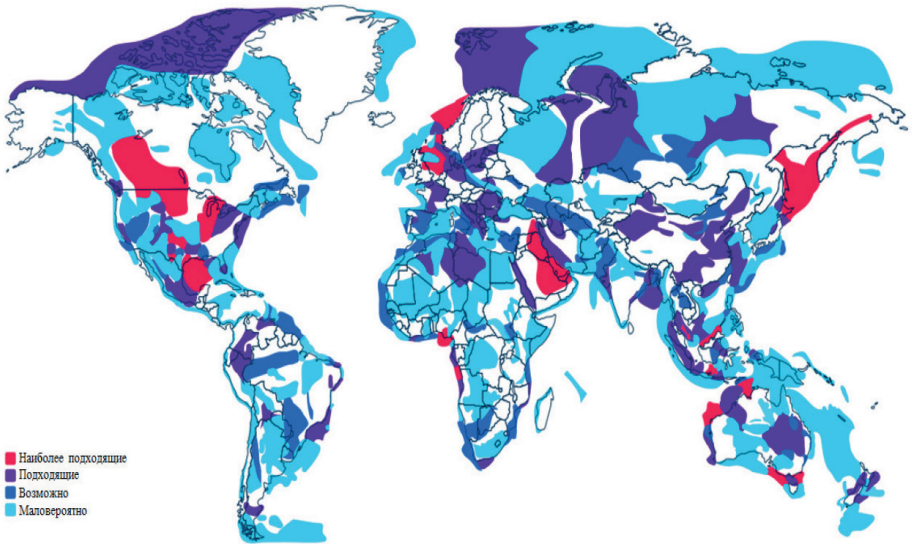

Рис. 8. Геологический потенциал хранения CO_2

Морские суда для CO_2. Характеристики перевозки CO_2 связаны с его свойствами и агрегатным состоянием — твердым или газообразным (на рис. 9 приведена диаграмма фазовых переходов CO_2 между твердым, газообразным и жидким состоянием). Для достижения жидкого состояния, являющегося пригодным для транспорта, необходимо давление более 7 атм. Причем для морского транспорта необходимы меньшие значения давления по сравнению с давлениями при использовании технологических процессов закачки в геологические структуры или при транспортировке по трубопроводам, для чего требуется увеличение давления CO_2 при переходе к компоненте технологической цепочки со скважинами.

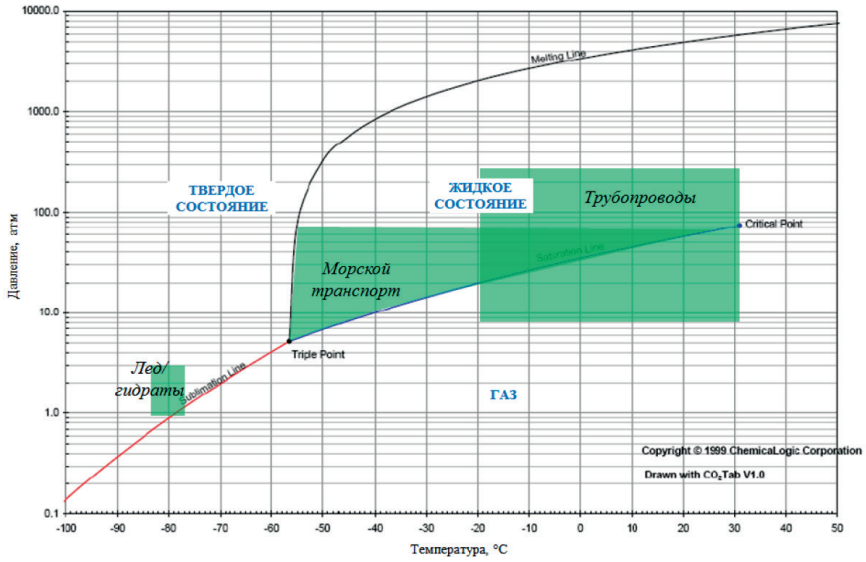

Рис. 9. Фазовая диаграмма CO_2

В связи с этим рассматривают три варианта морских перевозок CO_2 судами [23]:

– под малым давлением до 10 атм, температура –55…–40 °C (наиболее перспективный вариант — в настоящее время существуют суда для сжиженных углеводородных газов (СУГ), а для CO_2 таких судов нет);

– под средним давлением 15–20 атм, температура –30…–20 °C (эксплуатируются малотоннажные суда для перевозки пищевого CO_2);

– под большим давлением 45–70 атм, температура 10…30 °С (наименее перспективная концепция — в настоящий момент таких судов не существует).

Суда под малым давлением. При концептуальном проектировании перевозок CO_2 под малым давлением разработчики опираются на проекты существующих полуохлаждаемых судов для СУГ, а также возможность их модификации. В обычной компоновке судна для СУГ используется небольшое количество цилиндрических резервуаров (менее 10 шт.), скомпонованных горизонтально парами [32]. При этом для перевозки CO_2 под малым давлением в 2011 г. в Нидерландах T. N. Vermeulen [26] сконструировано судно, состоящее из шести резервуаров, объем каждого 5 000 м^3, общей вместимостью 30 000 м^3 (34 500 т CO_2, плотность 1,15 т м/^{3}, давление 9 атм), в 2013 г. в Ю. Корее B. Y. Yoo [15] сконструированы суда 23 000 м^3 (26 450 т CO_2, шесть горизонтальных резервуаров, давление 10 атм) и 36 000 м^3 (34 500 т CO_2, давление 10 атм). Данные концепции судов приведены на рис. 10.

а) б)

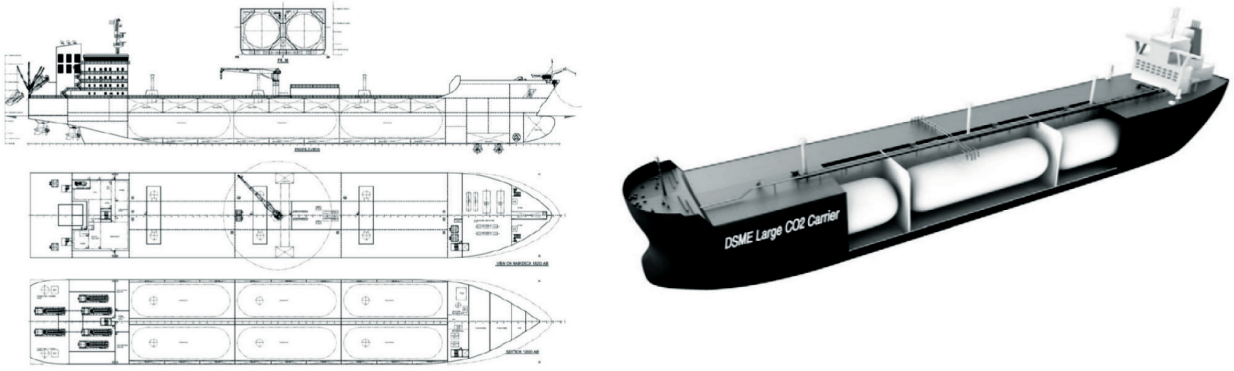

Рис. 10. Концептуальные разработки для судов CO_2 под малым давлением с объемом резервуаров до 30 000 м^3:
а — судно T. N. Vermeulen с резервуарами 30 000 м^3;
б — судно B. Y. Yoo с резервуарами 23 000 м^3

Концепция перевозок с малым давлением при низкой температуре является наиболее перспективной, поскольку суда являются наименее металлоемкими и в дальнейшем возможно значительное увеличение судовых партий для достижения экономического эффекта. Предлагаются концепции крупнотоннажных судов (рис. 11). Так, B. Y. Yoo разработано судно вместимостью 91 000 м^3 (вертикальные цилиндрические резервуары 91 шт. × 1000 м^3) [15], компанией Brevik Engineering — судно вместимостью до 164 000 м^3 для CO_2 под давлением 6–7 атм.

а) б)

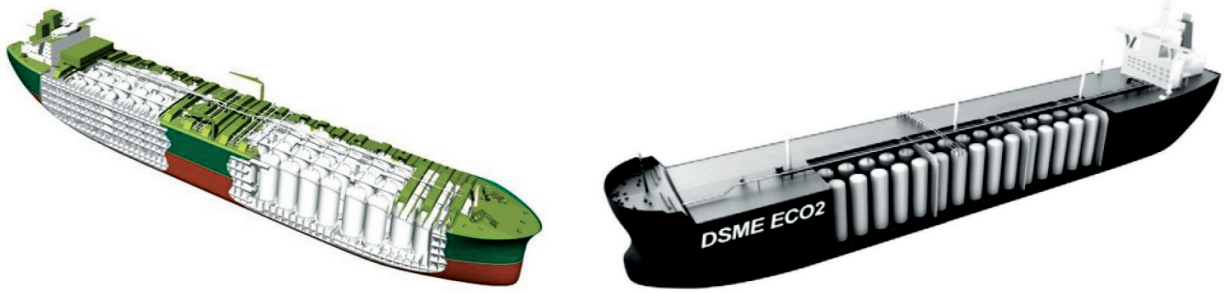

Рис. 11. Концепции крупнотоннажных судов для перевозок CO_2 под малым давлением:
а — судно Brevik Engineering с резервуарами 164 000 м^3;
б — судно B. Y. Yoo с резервуарами 91 000 м^3

Большинство судов для СУГ обеспечивают малое давление в резервуарах до 3 атм, что недостаточно для достижения жидкого состояния CO_2. При этом в мире существует порядка тридцати судов [23], выполняющих перевозки СУГ и этилена с максимально допустимым давлением в резервуарах до 7–9,5 атм, в которых теоретически можно выполнять перевозки CO_2 после дооснащения. Недостатком в этом случае является использование только 50–60 % емкости резервуаров судна при перевозке CO_2 из-за разности плотности грузов (плотность СУГ 500–700 кг/м^3, примерно в 2 раза меньшей плотности CO_2 1050–1200 кг/м^3), а также необходимость дооснащения портовых терминалов системами очистки трюмов инертными газами при смене грузов газов-углеводородов на углекислый газ CO_2. В настоящее время подобных эксплуатируемых мультигазовых судов и портовых терминалов со сменой газообразных грузов не существует.

Суда под средним давлением. Малотоннажные морские суда для перевозки CO_2 под средним давлением делятся на специально построенные и реконструированные. Первым судном в истории является Coral Cabonic, построенное в 1999 г. с судовой партией 1250 т. Компания Yara International производит аммиак в Норвегии и Эстонии и перевозит пищевой CO_2 в Европе, являясь его крупнейшим поставщиком и располагая собственным флотом судов. Компания использует три судна вместимостью 1800 т: Embla, Froya, Gerda, реконструированные из судов генеральных грузов, и судно Iduna вместимостью 1200 т, реконструированное из контейнеровоза. Оператором эксплуатируемых судов является компания Nippon Gases. Характеристики судов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Существующие суда для перевозки пищевого CO_2 под средним давлением

№ пп.	Наименование	Год постройки	Судовая партия CO_2, т	Тех. условия перевозки CO_2
1	Coral carbonic	1999	1 250	–40 ºС / 18 атм
2	Froya	2004–2005 (реконструкция)	1 770	–30 ºС / 19 атм
3	Gerda			
4	Embla			
5	Iduna	1999 (реконструкция)	1 200	–30 ºС / 20 атм

Несмотря на то, что условия среднего давления являются наиболее проверенной формой морской транспортировки жидкого CO_2, они не обеспечивают судовую партию более 10 000 т CO_2 ввиду причин коммерческого и технического характера. Размеры и требования для судов до 10 000 т CO_2 находятся в пределах диапазона, характерного для СУГ-судов, находящихся под полным давлением, и, таким образом, подобная конструкция судов доступна в настоящее время для строительства на верфях. В 2017 г. оценка конструктивных элементов и стоимости строительства подобных судов выполнялась по заказу норвежских компаний Gassco (предложены четыре судна для перевозки под давлением 14–19 атм с пятью резервуарами общей вместимостью CO_2 2315 т, 4534 т, 7017 т и 9787 т) и в 2016 г. — Yara (предложены четыре судна для выполнения перевозок под давлением 16 атм, с четырьмя резервуарами общей вместимостью CO_2 2369 т, 4745 т, 7107 т и 9394 т) — рис. 12.

а) б)

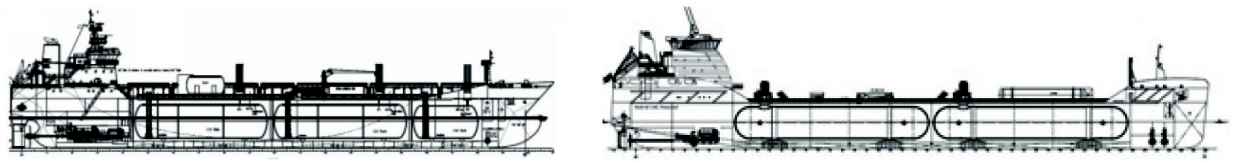

Рис. 12. Концепции судов для перевозки CO_2 под средним с давлением:
а — Gassco вместимостью 9 787 т CO_2 (10 100 м^3); *б* — Yara вместимостью 9 394 т CO_2 (9 700 м^3)

Для судов большей вместимости необходима разработка нового проекта, являющаяся сложной задачей. Резервуары для условий среднего давления имеют максимальный диаметр около 9 м,

что позволяет размещать резервуары 2 × 2 в нижней части судна, сохраняя при этом стандартные пропорции имеющихся конструкций судов. В зависимости от формы судна для перевозки более 10 000 т CO_2 может возникнуть необходимость установки резервуаров друг на друга, что является более сложным конструктивным решением, или увеличения длины резервуаров и судна.

Единственным преимуществом концепции судов под средним давлением является то, что в настоящее время уже существуют и эксплуатируются малотоннажные суда для пищевого CO_2 [32]. В частности, в норвежском проекте Longship выбрана концепция судов под средним давлением исходя из широкого спектра в сегменте строительства судов для перевозки СУГ, наличия стандартных проектных решений для уменьшения конструктивных рисков. Это также способствовало сертификации CO_2 как крупнотоннажного морского груза. Логистическое плечо морской поставки от Осло (эмитенты) до Бергена (терминал приемки CO_2) составляет порядка 550 км. Два судна запланированы к постройке в III–IV кв. 2023 г. на китайской судоверфи Dalian Shipbuilding Industry. Стоимость контракта по строительству судов публично не объявлена, однако, по различным оценкам, оценивается в размере более 50 млн евро за одно судно. Проектные характеристики судна для перевозки CO_2 под средним давлением на проекте Longship:

– длина 130 м, осадка 8,5 м;
– общая вместимость резервуаров 7500 м^3 (два резервуара, типа С), заполняемость 97–98 %;
– полностью под давлением (Fully Pressured);
– производительность приемки CO_2 на терминале Northern Lights — 800 м^3/ч;
– проектное давление 13–18 атм, равновесная температура –30 ºС (минимальная возможная температура в резервуаре до –46 ºС);
– СПГ-топливо при ходе судна, аккумуляторная батарея на 60 мин маневровых операций в акватории порта с подзарядкой на морских терминалах;
– команда на борту до 18 чел.

Суда под большим давлением. В случае перевозки CO_2 под большим давлением его плотность снижается, что позволяет вмещать большое количество груза. При этом возрастает количество резервуаров и дополнительного подтрюмного пространства с зазорами между ними для инспекций, что приводит к значительному увеличению металлоемкости и кратному удорожанию. В частности, в исследовании Y. Seo [48] отмечается, что что для перевозки 12 310 т CO_2 на судне под большим давлением (45 атм) потребуется на 34 % меньше объемов резервуаров и на 122 % больше объемов подтрюмного пространства по сравнению с перевозками в судне под малым давлением (6 атм). В связи с этим концепция перевозок CO_2 под большим давлением является наименее конкурентной.

Морские портовые терминалы для перевалки CO_2. От промышленного предприятия-эмитента необходимо отправлять CO_2 через портовый терминал отправки (экспорт), а после выполнения плеча морской логистики осуществлять разгрузку углекислого газа на терминале приемки (импорт). Упрощенная технологическая схема процессов на терминалах приведена на рис. 13.

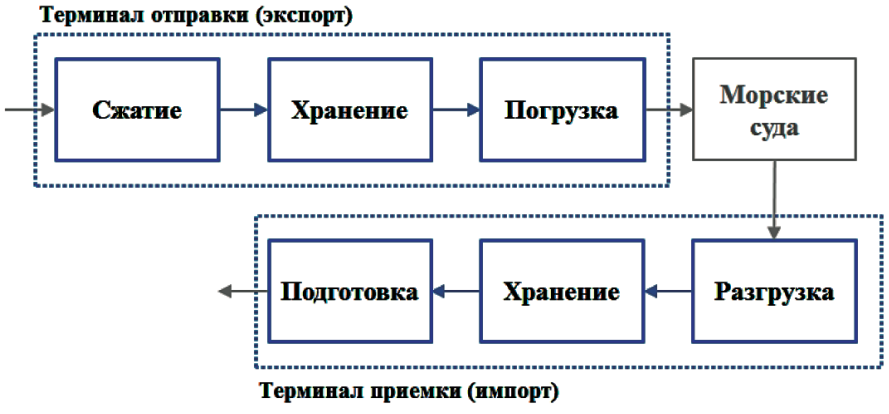

Рис. 13. Технологические операции с CO_2 на морских терминалах

Портовый терминал отправки (экспорт). Основной принцип сжатия заключается в комбинации (сочетании) процессов охлаждения и компримирования. Технологически существует две схемы сжатия CO_2: с использованием внешней системы охлаждения (так называемые «закрытые» системы) и без использования внешнего хладагента за счет сжатия и расширения («открытые» системы или «интегрированное» охлаждение). Открытые системы имеют более простую конструкцию, но менее эффективны. Во время сжижения воду необходимо удалять из входящего потока CO_2 путем конденсации и регенеративной адсорбции для того, чтобы предотвратить гидратацию, замерзание и коррозию.

В затратах на сжижение преобладают затраты на электроэнергию, потребление которой зависит от начальных условий CO_2 (степень очистки от примесей, температура и давление) на входе на терминал и необходимых характеристик для морского транспорта. Если терминал располагается вблизи или на территории эмитента, то с установки улавливания очищенный CO_2 выходит в состоянии, близком к атмосферному давлению («non-pressurised», 1–2 атм) и на экспортном терминале необходимо выполнить сжатие (в частности таким образом будет обустроена площадка улавливания на норвежском цементном заводе Norcem). В большинстве случаев на отдаленный портовый терминал от эмитентов CO_2 будет поступать по трубопроводам под большим давлением («pressurised», 70–100 атм). В этом случае не терминале потребуется затратить меньше энергии и средств на отгрузку в резервуары, так как CO_2 уже будет находиться под давлением.

Для накопления судовых партий на терминале используют криогенные резервуары, обеспечивающие хранение CO_2 с необходимой температурой, плотностью и давлением. По различным оценкам специалистов, размеры складской зоны должны составлять до 150 % от объемов судовой партии. В большинстве исследований используется запас, равный 120 % (в соответствии с опытом работы терминалов СПГ по обеспечению гибкости производства и невозникновению чрезмерных затрат). Для условий среднего давления в резервуарах используется углеродистая сталь в сочетании с изоляцией, для малого давления требуются специальные низкотемпературные материалы (углеродистая марганцевая сталь или марки низкотемпературной стали). Возможно применение цилиндрических и сферических резервуаров, при этом в большинстве исследований и на практике (терминал Northern Lights) выбор осуществляется в пользу цилиндрических резервуаров. Резервуары заполняются до 98 % ввиду того, что часть объема находится не только в жидком, но и в газообразном состоянии.

Погрузочные работы на судах выполняются через стендеры, которые аналогично используются для жидких криогенных грузов СУГ или СПГ. CO_2 в жидком состоянии перекачивается по термоизолированному трубопроводу, рассчитанному на выбранное давление и температуру, от резервуара к стендеру с помощью складских насосов.

Портовый терминал приемки (импорт). На портовом терминале приемки разгрузочные работы у причала выполняются стендерами, хранение осуществляется в резервуарах аналогично операциям на экспортном терминале. После кратковременного хранения в складских резервуарах выполняют подготовку CO_2 до транспортного состояния в трубопроводе — нагнетают до давления и нагревают до температуры необходимых в системе.

Примером импортного терминала приемки является Northern Lights (рис. 14). По этому проекту в 2020 г. было завершено выполнение проектной документации (FEED), в 2021 г. начались строительные работы, запуск запланирован в 2024 г. Характеристики терминала:

– первый этап развития с приемкой 1,5 млн т CO_2/год (в 2022 г. Европейский союз выделил финансирование на проектирование расширения терминала до 5 млн т CO_2/год);

– глубина у причала 10,5 м;

– подход судов каждые 2 дня (с учетом двух судов с двух локаций улавливания);

– три стендера (первый — приемка CO_2 производительностью 800 м^3/ч, второй — возврат отпарных газов в систему, третий — резервный для CO_2);

– резервуарный парк общей вместимостью 8250 м^3 (в составе двенадцать вертикальных цилиндрических резервуаров диаметром 6,1 м и высотой 24,5 м);

– насосы для отправки на трубопровод и закачку с вариативной производительностью от 45 т/ч (грузооборот 0,4 млн т/год CO_2) до 171 т/ч (грузооборот 1,5 млн т/год CO_2).

Рис. 14. Терминал Northern Lights для приемки CO_2

Таким образом, по результатам выполненного системного анализа можно отметить следующее:

1. За рубежом активно обсуждается, поддерживается на международном и государственных уровнях и в ближайшие десятилетия будет развиваться направление декарбонизации — CCS, являющееся одной из ключевых крупнотоннажных технологий снижения выбросов CO_2 на промышленных объектах.

2. В рамках CCS-цепочек морской транспорт является перспективной технологией доставки углекислого газа от территориально отдаленных эмитентов (более 1 км) до месторождений по закачке CO_2, что подтверждают результаты достаточного количества научных исследований и факт реализации подобных проектов в мире (первый в мире норвежский проект Longship будет введен к 2024 г.).

3. По отдельным направлениям достигнут заметный научный прогресс зарубежных специалистов (транспортные характеристики CO_2, выбор малого или среднего давления для транспортировки в морских судах, технологические операции на морских терминалах CO_2).

В настоящее время направление исследований морской транспортировки CO_2 не представлено в Российской Федерации, что формирует возможности апробации уже накопленных оптимально доступных мировых решений и проведения более глубокого технико-экономического анализа. При этом необходимо отметить, что большинство научных предположений по морской транспортировке CO_2 не подтверждено на практике несмотря на достаточное количество исследований от ведущих научных институтов и стран. В ближайшей перспективе идеи будут подтверждены или актуализированы при реализации фактических портовых проектов (до 2030 г. в Европе подтверждено более пяти проектов).

В 2021 г. определена государственная задача по выходу РФ к 2060 г. на углеродную нейтральность. Государство начинает заниматься сокращением выбросов углекислого газа. Так, в 2021 г. началось проведение государственного климатического эксперимента по квотированию выбросов парниковых газов на Сахалине. Анализ мировых тенденций показывает, что в прибрежных районах РФ существует потенциал создания крупнотоннажных хабов по подземному хранению углекислого газа. В мировой практике подобные хабы создаются для снижения углеродного следа собственных производств и оказания трансграничных услуг промышленным предприятиям из других стран.

В настоящее время стоимость углеродных единиц (тонны CO_2) не позволяет обеспечить экономическую рентабельность создания подобных проектов, поэтому создание первых хабов может расцениваться как опережающая инфраструктура. Существует гипотеза, что в долгосрочной перспективе морские хабы CO_2 смогут выйти на самоокупаемость при формировании стабильной цены и спроса на геологическое хранение CO_2 (стратегические консультанты и отдельные правительства заявляют о цене 70–100 евро за тонну CO_2 к 2030 г.).

В настоящее время российские нефтегазовые компании в большей степени заявляют о возможности реализации CCS-проектов в традиционных сухопутных регионах добычи («Газпромнефть» в Оренбурге, «Татнефть» в Татарстане, «Сибур» в Тобольске). При этом «Новатэк» рассматривает использование прибрежных геологических резервуаров на Гыдане и Ямале. Российская нефтегазовая отрасль имеет преимущества геологической изученности и масштабности месторождений для потенциальной закачки CO_2. С большой долей вероятности можно рассчитывать, что проектам по портовой перевалке и морской транспортировке CO_2 в дальнейшем будет дана положительная оценка российскими промышленными компаниями. Это создает необходимые условия в вопросах российского научного сообщества для дальнейшего углубленного анализа элементов и технологий морского транспорта CO_2 в цепочках CCS для реализации новых портовых проектов и создания новых судов. Данное направление обладает высоким исследовательским и прикладным потенциалом.

Выводы (Conclusions)

На основе выполненного обзора можно сделать следующие выводы:

1) рассмотрены перспективы морской транспортировки и создания портовой терминальной инфраструктуры для транспортировки углекислого газа;

2) выполнена систематизация международного опыта, исследованы преимущества и недостатки различных технологий, предложены унифицированные подходы к цепочке морского транспорта CO_2;

3) использованы методы системного анализа научных исследований, технико-экономической документации, отраслевых обзоров, проектной информации и спецификаций производителей оборудования для получения следующих результатов:

– общая функционально-технологическая логика для цепочки морской транспортировки CO_2;

– оптимальные перспективные технологии для элементов технологической цепочки (морские суда и оборудование на портовых терминалах).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ekwurzel B.* The rise in global atmospheric CO2, surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers / B. Ekwurzel, J. Boneham, M. W. Dalton, R. Heede, R. J. Mera, M. R. Allen, P. C. Frumhoff // Climatic Change. — 2017. — Vol. 144. — Is. 4. — Pp. 579–590. DOI: 10.1007/s10584-017-1978-0.

2. Emissions Gap Report 2021: The heat is on. A world climate promises not yet delivered. — United Nations Environment Programme, 2021. — 82 p.

3. Climate action fast facts [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.un.org/en/climatechange/science/key-findings (дата обращения: 28.01.2022).

4. *Friedlingstein P.* Global Carbon Budget 2021 / P. Friedlingstein, [et al] // Earth System Science Data Discussions. — 2021. DOI: 10.5194/essd-2021–386 [preprint].

5. Paris agreement. — United Nations, 2015. — 25 p.

6. КС-26: климатический пакт Глазго; United Nations Change conference UK 2021. — 2021. — 26 p.

7. *Fragkos P.* Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States / P. Fragkos, [et al.] // Energy. — 2021. — Vol. 216. — Pp. 119385. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119385.

8. Net Zero by 2050. A roadmap for the global energy sector. — International energy agency, 2021. — 224 p.

9. Global status of CCS 2021. CCS accelerating to net zero. — Global CCS institute, 2021. — 43 p.

10. Proposal for a regulation of the European parliament and of the council establishing a carbon border adjustment mechanism. — Euporean Comission, 2021. — 291 p.

11. *Svensson R.* Transportation systems for CO_2 — application to carbon capture and storage / R. Svensson, M. Odenberger, F. Johnsson, L. Strömberg // Energy Conversion and Management. — 2004. — Vol. 45. — Is. 15–16. — Pp. 2343–2353. DOI: 10.1016/j.enconman.2003.11.022.

12. *Metz B.* Carbon Dioxide Capture and Storage / B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer. — UK: IPCC, Cambridge University Press, 2005. — 431 p.

13. The costs of CO_2 transport: post-demonstration CCS in the EU. — Brussels, Belgium: European technology platform for zero emission fossil fuel poer plants, 2011. — 53 p.

14. *Weihs G. A. F.* Understanding the economic feasibility of ship transport of CO2 within the CCS chain / G. A. F. Weihs, K. Kumar, D. E. Wiley //Energy Procedia. — 2014. — Vol. 63. — Pp. 2630–2637. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.285.

15. *Yoo B. Y.* Development of CO_2 terminal and CO_2 carrier for future commercialized CCS market / B. Y. Yoo, D. K. Choi, H. J. Kim, Y. S. Moon, H. S. Na, S. G. Lee // International Journal of Greenhouse Gas Control. — 2013. — Vol. 12. — Pp. 323–332. DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.11.008.

16. *Knoope M. M.J.* Investing in CO_2 transport infrastructure under uncertainty: A comparison between ships and pipelines / M.M.J. Knoope, A. Ramírez, A.P.C. Faaij // International Journal of Greenhouse Gas Control. — 2015. — Vol. 41. — Pp. 174–193. DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.07.013.

17. *Roussanaly S.* Benchmarking of CO_2 transport technologies: Part I — Onshore pipeline and shipping between two onshore areas / S. Roussanaly, J. P. Jakobsen, E. H. Hognes, A. L. Brunsvold // International Journal of Greenhouse Gas Control. — 2013. — Vol. 19. — Pp. 584–594. DOI: 10.1016/j.ijggc.2013.05.031.

18. *Roussanaly S.* Benchmarking of CO_2 transport technologies: Part II — Offshore pipeline and shipping to an offshore site / S. Roussanaly, A. L. Brunsvold, E. S. Hognes // International Journal of Greenhouse Gas Control. — 2014. — Vol. 28. — Pp. 283–299. DOI: 10.1016/j.ijggc.2014.06.019.

19. *Al Baroudi H.* A review of large-scale CO_2 shipping and marine emissions management for carbon capture, utilisation and storage / H. Al Baroudi, A. Awoyomi, K. Patchigolla, K. Jonnalagadda, E. J. Anthony // Applied Energy. — 2021. — Vol. 287. — Pp. 116510. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116510.

20. Ship transport of CO_2. Report Number PH4/30. — Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2004. — 115 p.

21. Preliminary feasibility study on CO2 carrier for ship-based CCS. — Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd., 2011. — 180 p.

22. Preliminary Feasibility Study on CO_2 Carrier for Ship-based CCS (Phase-2 — unmanned offshore facility). — Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd., 2012. — 112 p.

23. The status and challenges of CO2 shipping infrastructures. IEAGHG technical report 2020–10. — IEA greenhouse gas R&D programme, 2020. — 162 p.

24. *Decarre S.* CO_2 maritime transportation / S. Decarre, J. Berthiaud, N. Butin, J. L. Guillaume-Combecave // International Journal of Greenhouse Gas Control. — 2010. — Vol. 5. — Is. 5. — Pp. 857–864. DOI: 10.1016/j.ijggc.2010.05.005.

25. *Tetteroo M.* Knowledge Sharing Report — CO_2 Liquid Logistics Shipping Concept Business Model / M. Tetteroo, C van der Ben. — Global Carbon Capture and Storage Institute Limited, 2011. — 41 p.

26. *Vermeulen T. N.* Knowledge Sharing Report — CO_2 Liquid Logistics Shipping Concept (LLSC) Overall Supply Chain Optimization / T. N. Vermeulen. — Global Carbon Capture and Storage Institute Limited, 2011. — 142 p.

27. *Ozaki M.* Ship-based Offshore CCS Featuring CO2 Shuttle Ships Equipped with Injection Facilities / M. Ozaki, T. Ohsumi, R. Kajiyama // Energy Procedia. — 2013. — Vol. 37. — Pp. 3184–3190. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.205.

28. *Jung J. Y.* CO_2 transport strategy and its cost estimation for the offshore CCS in Korea / J. Y. Jung, C. Huh, S. G. Kang, Y. Seo, D. Chang // Applied Energy. — 2013. — Vol. 111. — Pp. 1054–1060. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.06.055.

29. *Nam H.* Design of carrier-based offshore CCS system: Plant location and fleet assignment / H. Nam, T. Lee, J. Lee, J. Lee, H. Chung // International Journal of Greenhouse Gas Control. — 2013. — Vol. 12. — Pp. 220–230. DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.10.002.

30. *Kjärstad J.* Ship transport — A low cost and low risk CO_2 transport option in the Nordic countries / J. Kjärstad, R. Skagestad, N. H. Eldrup, F. Johnsson // International Journal of Greenhouse Gas Control. — 2016. — Vol. 54. — Pp. 168–184. DOI: 10.1016/j.ijggc.2016.08.024.

31. Feasibility study for fullscale CCS in Norway. — Ministry of Petroleum and Energy, 2016. — 63 p.

32. Shipping CO_2 — UK Cost Estimation Study. Final report for Business, Energy & Industrial Strategy Department. — Element Energy Limited, 2018. — 61 p.

33. *Dooley J. J.* Comparing Existing Pipeline Networks with the Potential Scale of Future U. S. CO_2 Pipeline Networks / J. J. Dooley, R. T. Dahowski, C. L. Davidson // Energy Procedia. — 2009. — Vol. 1. — Is. 1. — Pp. 1595–1602. DOI: 10.1016/j.egypro.2009.01.209.

34. *Hegerland G.* Liquefaction and handling of large amounts of CO2 for EOR / G. Hegerland, T. Jørgensen, J. O. Pande // Greenhouse Gas Control Technologies 7. — Elsevier Science Ltd., 2005. — Pp. 2541–2544. DOI: 10.1016/B978-008044704-9/50369-4.

35. *Neele F.* Ship transport of CO_2 — breaking the CO_2-EOR deadlock / F. Neele, H. A. Haugen, R. Skagestad // Energy Procedia. — 2014. — Vol. 63. — Pp. 2638–2644. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.286.

36. *Aspelund A.* Ship Transport of CO_2: Technical Solutions and Analysis of Costs, Energy Utilization, Exergy Efficiency and CO_2 Emissions / A. Aspelund, M. J. Mølnvik, G. De Koeijer // Chemical Engineering Research and Design. — 2006. — Vol. 84. — Is. 9. — Pp. 847–855. DOI: 10.1205/cherd.5147.

37. Longship — Carbon capture and storage. Meld. St. 33 (2019–2020) Report to the Storting (white paper). — Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, 2020. — 92 p.

38. Northern Lights FEED report. RE-PM673–00057. — Equinor, 2020. — 178 p.

39. *Deng H.* Techno-economic analyses of CO2 liquefaction: Impact of product pressure and impurities / H. Deng, S. Roussanaly, G. Skaugen // International Journal of Refrigeration. — 2019. — Vol. 103. — Pp. 301–315. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.04.011.

40. *Fraga D. M.* Design of a multi-user CO_2 intermediate storage facility in the Grenland region of Norway / D. M. Fraga, R. Skagestad, N. H. Eldrup, A. Korre, H. A. Haugen, Z. Nie, S. Durucan // International Journal of Greenhouse Gas Control. — 2021. — Vol. 112. — Pp. 103514. DOI: 10.1016/j.ijggc.2021.103514.

41. *Roussanaly S.* At what Pressure Shall CO2 Be Transported by Ship? An in-Depth Cost Comparison of 7 and 15 Barg Shipping / S. Roussanaly, H. Deng, G. Skaugen, T. Gundersen // Energies. — 2021. — Vol. 14. — Is. 18. — Pp. 5635. DOI: 10.3390/en14185635.

42. *Jakobsen J.* A techno-economic case study of CO2 capture, transport and storage chain from a cement plant in Norway / J. Jakobsen, S. Roussanaly, R. Anantharaman // Journal of Cleaner Production. — 2017. — Vol. 144. — Pp. 523–539. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.120.

43. *Noh H.* Conceptualization of CO_2 Terminal for Offshore CCS Using System Engineering Process / H. Noh, K. Kang, C. Huh, S. G. Kang, S. J. Han, H. Kim // Energies. — 2019. — Vol. 12. — Is. 22. — Pp. 4350. DOI: 10.3390/en12224350.

44. *Bjerketvedt V. S.* Optimal design and cost of ship-based CO_2 transport under uncertainties and fluctuations / V. S. Bjerketvedt, A. Tomasgard, S. Roussanaly // International Journal of Greenhouse Gas Control. — 2020. — Vol. 103. — Pp. 103190. DOI: 10.1016/j.ijggc.2020.103190.

45. *Roussanaly S.* Towards improved cost evaluation of Carbon Capture and Storage from industry / S. Roussanaly, N. Berghout, T. Fout, M. Garcia, S. Gardarsdottir, S. M. Nazir, A. Ramirez, E. S. Rubin // International Journal of Greenhouse Gas Control. — 2021. — Vol. 106. — Pp. 103263. DOI: 10.1016/j.ijggc.2021.103263.

46. CO_2 pipeline infrastructure. — IEA Environmental Projects Ltd. (IEAGHG), 2013. — 122 p.

47. Transportation and unloading of CO_2 by ship — a comparative assessment. WP9 final report. — CATO-2, 2016. — 117 p.

48. *Seo Y.* Comparison of CO2 liquefaction pressures for ship-based carbon capture and storage (CCS) chain / Y. Seo, C. Huh, S. Lee, D. Chang // International Journal of Greenhouse Gas Control. — 2016. — Vol. 52. — Pp. 1–2. DOI: 10.1016/j.ijggc.2016.06.011.

REFERENCES

1. Ekwurzel, B., J. Boneham, M. W. Dalton, R. Heede, R. J. Mera, M. R. Allen, P. C. Frumhoff. "The rise in global atmospheric CO2, surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers." *Climatic Change* 144.4 (2017): 579–590. DOI: 10.1007/s10584-017-1978-0.

2. *Emissions Gap Report 2021: The heat is on. A world climate promises not yet delivered*. United Nations Environment Programme, 2021.

3. Climate action fast facts. Web. 28 Jan. 2022 <https://www.un.org/en/climatechange/science/key-findings>.

4. Friedlingstein, P., et al. "Global Carbon Budget 2021." *Earth System Science Data Discussions* (2021). DOI: 10.5194/essd-2021–386. [preprint].

5. *Paris agreement*. United Nations, 2015.

6. *COP-26: climape pact Glasgo*. United Nations, 2021.

7. Fragkos, Panagiotis. "Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States." *Energy* 216 (2021): 119385. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119385.

8. *Net Zero by 2050. A roadmap for the global energy sector*. International energy agency, 2021.

9. *Global status of CCS 2021. CCS accelerating to net zero*. Global CCS institute, 2021.

10. *Proposal for a regulation of the European parliament and of the council establishing a carbon border adjustment mechanism.* Euporean Comission, 2021.

11. Svensson, Rickard, Mikael Odenberger, Filip Johnsson, and Lars Strömberg. "Transportation systems for CO2––application to carbon capture and storage." *Energy conversion and management* 45.15–16 (2004): 2343–2353. DOI: 10.1016/j.enconman.2003.11.022.

12. Metz, B., O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, and L. Meyer. *Carbon Dioxide Capture and Storage*. UK: IPCC, Cambridge University Press, 2005.

13. *The costs of CO2 transport: post-demonstration CCS in the EU*. Brussels, Belgium: European technology platform for zero emission fossil fuel poer plants, 2011.

14. Weihs, GA Fimbres, K. Kumar, and D. E. Wiley. "Understanding the economic feasibility of ship transport of CO2 within the CCS chain." *Energy Procedia* 63 (2014): 2630–2637. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.285.

15. Yoo, Byeong-Yong, Dong-Kyu Choi, Hyun-Jin Kim, Young-Sik Moon, Hee-Seung Na, and Sung-Geun Lee. "Development of CO2 terminal and CO2 carrier for future commercialized CCS market." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 12 (2013): 323–332. DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.11.008.

16. Knoope, M.M.J., A. Ramírez, and A.P.C. Faaij. "Investing in CO2 transport infrastructure under uncertainty: A comparison between ships and pipelines." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 41 (2015): 174–193. DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.07.013.

17. Roussanaly, Simon, Jana P. Jakobsen, Erik H. Hognes, and Amy L. Brunsvold. "Benchmarking of CO2 transport technologies: Part I — Onshore pipeline and shipping between two onshore areas." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 19 (2013): 584–594. DOI: 10.1016/j.ijggc.2013.05.031.

18. Roussanaly, Simon, Amy L. Brunsvold, and Erik S. Hognes. "Benchmarking of CO2 transport technologies: Part II–Offshore pipeline and shipping to an offshore site." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 28 (2014): 283–299. DOI: 10.1016/j.ijggc.2014.06.019.

19. Al Baroudi, Hisham, Adeola Awoyomi, Kumar Patchigolla, Kranthi Jonnalagadda, and E. J. Anthony. "A review of large-scale CO2 shipping and marine emissions management for carbon capture, utilisation and storage." *Applied Energy* 287 (2021): 116510. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116510.

20. *Ship transport of CO2. Report Number PH4/30*. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2004.

21. *Preliminary feasibility study on CO2 carrier for ship-based CCS.* Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd., 2011.

22. *Preliminary Feasibility Study on CO2 Carrier for Ship-based CCS (Phase-2 — unmanned offshore facility)*. Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd., 2012.

23. *The status and challenges of CO2 shipping infrastructures. IEAGHG technical report 2020–10.* IEA greenhouse gas R&D programme, 2020.

24. Decarre, Sandrine, Julien Berthiaud, Nicolas Butin, and Jean-Louis Guillaume-Combecave. "CO2 maritime transportation." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4.5 (2010): 857–864. DOI: 10.1016/j.ijggc.2010.05.005.

25. Tetteroo, M., and C van der Ben. *Knowledge Sharing Report — CO2 Liquid Logistics Shipping Concept Business Model.* Global Carbon Capture and Storage Institute Limited, 2011.

26. Vermeulen, T. N. *Knowledge Sharing Report — CO2 Liquid Logistics Shipping Concept (LLSC) Overall Supply Chain Optimization*. Global Carbon Capture and Storage Institute Limited, 2011.

27. Ozaki, Masahiko, Takashi Ohsumi, and Ryuichiro Kajiyama. "Ship-based offshore CCS featuring CO2 shuttle ships equipped with injection facilities." *Energy Procedia* 37 (2013): 3184–3190. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.205.

28. Jung, Jung-Yeul, Cheol Huh, Seong-Gil Kang, Youngkyun Seob, and Daejun Chang. "CO2 transport strategy and its cost estimation for the offshore CCS in Korea." *Applied energy* 111 (2013): 1054–1060. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.06.055.

29. Nam, H., T. Lee, J. Lee, J. Lee, and H. Chung. "Design of carrier-based offshore CCS system: Plant location and fleet assignment." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 12 (2013): 220–230. DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.10.002.

30. Kjärstad, Jan, Ragnhild Skagestad, Nils Henrik Eldrup, and Filip Johnsson. "Ship transport — A low cost and low risk CO2 transport option in the Nordic countries." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 54 (2016): 168–184. DOI: 10.1016/j.ijggc.2016.08.024.

31. *Feasibility study for fullscale CCS in Norway*. Ministry of Petroleum and Energy, 2016.

32. *Shipping CO_2 — UK Cost Estimation Study. Final report for Business, Energy & Industrial Strategy Department*. Element Energy Limited, 2018.

33. Dooley, J.J., R. T. Dahowski, and C. L. Davidson. "Comparing Existing Pipeline Networks with the Potential Scale of Future U. S. CO_2 Pipeline Networks." *Energy Procedia* 1.1 (2009): 1595–1602. DOI: 10.1016/j.egypro.2009.01.209.

34. Hegerland, Georg, Terje Jørgensen, and John O. Pande. "Liquefaction and handling of large amounts of CO2 for EOR." *Greenhouse Gas Control Technologies 7*. Elsevier Science Ltd, 2005. 2541–2544. DOI: 10.1016/B978-008044704-9/50369-4.

35. Neele, Filip, Hans Aksel Haugen, and Ragnhild Skagestad. "Ship transport of CO2-breaking the CO2-EOR deadlock." *Energy Procedia* 63 (2014): 2638–2644. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.286.

36. Aspelund, Auden, M. J. Mølnvik, and G. De Koeijer. "Ship transport of CO2: Technical solutions and analysis of costs, energy utilization, exergy efficiency and CO2 emissions." *Chemical Engineering Research and Design* 84.9 (2006): 847–855. DOI: 10.1205/cherd.5147.

37. *Longship — Carbon capture and storage. Meld. St. 33 (2019–2020) Report to the Storting (white paper)*. Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, 2020.

38. *Northern Lights FEED report. RE-PM673–00057*. Equinor, 2020.

39. Deng, Han, Simon Roussanaly, and Geir Skaugen. "Techno-economic analyses of CO2 liquefaction: Impact of product pressure and impurities." *International Journal of Refrigeration* 103 (2019): 301–315. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2019.04.011.

40. Fraga, Denis Martins, Ragnhild Skagestad, Nils Henrik Eldrup, Anna Korre, Hans Aksel Haugen, Zhenggang Nie, and Sevket Durucan. "Design of a multi-user CO2 intermediate storage facility in the Grenland region of Norway." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 112 (2021): 103514. DOI: 10.1016/j.ijggc.2021.103514.

41. Roussanaly, Simon, Han Deng, Geir Skaugen, and Truls Gundersen. "At what Pressure Shall CO2 Be Transported by Ship? An in-Depth Cost Comparison of 7 and 15 Barg Shipping." *Energies* 14.18 (2021): 5635. DOI: 10.3390/en14185635.

42. Jakobsen, Jana, Simon Roussanaly, and Rahul Anantharaman. "A techno-economic case study of CO2 capture, transport and storage chain from a cement plant in Norway." *Journal of cleaner production* 144 (2017): 523–539. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.120.

43. Noh, Hyonjeong, Kwangu Kang, Cheol Huh, Seong-Gil Kang, Seong Jong Han, and Hyungwoo Kim. "Conceptualization of CO2 Terminal for Offshore CCS Using System Engineering Process." *Energies* 12.22 (2019): 4350. DOI: 10.3390/en12224350.

44. Bjerketvedt, Vegard Skonseng, Asgeir Tomasgard, and Simon Roussanaly. "Optimal design and cost of ship-based CO2 transport under uncertainties and fluctuations." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 103 (2020): 103190. DOI: 10.1016/j.ijggc.2020.103190.

45. Roussanaly, Simon, Niels Berghout, Tim Fout, Monica Garcia, Stefania Gardarsdottir, Shareq Mohd Nazir, Andrea Ramirez, and Edward S. Rubin. "Towards improved cost evaluation of Carbon Capture and Storage from industry." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 106 (2021): 103263. DOI: 10.1016/j.ijggc.2021.103263.

46. *CO2 pipeline infrastructure*. IEA Environmental Projects Ltd. (IEAGHG), 2013.

47. *Transportation and unloading of CO2 by ship — a comparative assessment. WP9 final report*. CATO-2, 2016.

48. Seo, Youngkyun, Cheol Huh, Sangick Lee, and Daejun Chang. "Comparison of CO2 liquefaction pressures for ship-based carbon capture and storage (CCS) chain." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 52 (2016): 1–12. DOI: 10.1016/j.ijggc.2016.06.011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Купцов Николай Владимирович —
кандидат технических наук, руководитель направления по планированию и инвестициям
ООО «Газпромнефть НТЦ»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 75–79
e-mail: *kuptsov.nv@gazprom-neft.ru*, *kuptsov.nikolay@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuptsov, Nikolay V. —
PhD, Planning & Investment Manager
Gazpromneft Science & Technology Center
75–79 Moika River Emb.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: *kuptsov.nv@gazprom-neft.ru*, *kuptsov.nikolay@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2022 г.
Received: February 22, 2022.