

А.А. Череповицына^{1,2}, И.П. Дорожкина²

¹Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
Мытищи, Россия

²Институт экономических проблем имени Г. П. Лузина, Кольский научный центр,
Апатиты, Россия

Организационно-экономические аспекты развития технологий и проектов секвестрации и использования углекислого газа

Аннотация. В текущих реалиях энергетика и промышленность по всему миру сталкивается с рядом вызовов, среди которых главные – климатические. В этой связи компании все больше ориентируют свою деятельность на движение к углеродной нейтральности посредством работы по разным направлениям, одним из которых является комплекс технологий улавливания, хранения и использования углекислого газа (CC(U)S – carbon capture, utilization and storage), направленный на предотвращение техногенных выбросов CO₂ в атмосферу. По разным причинам данные инициативы пока не развиваются в России, тем не менее, в мире накоплен определенный опыт. В исследовании представлен анализ мирового опыта реализации CC(U)S, выявлены особенности построения технологических цепей, представлены элементы классификации и анализа организационных форм проектов CC(U)S. Определены общие перспективы развития таких инициатив в России, а также представлена укрупненная оценка затрат на внедрение CC(U)S в Волго-Уральской нефтегазоносной провинции.

Ключевые слова: углекислый газ, секвестрация, использование, CC(U)S, мировой опыт, классификация, оценка затрат.

A.A. Cherepovitsyna^{1,2}, I.P. Dorozhkina²

¹ Research Institute “Environmental Industrial Policy Centre”, Mytishchi, Russia

² Luzin Institute for Economic Studies, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia

Organizational and Economic Aspects of the Development of Carbon Dioxide Sequestration and Utilization Technologies and Projects

Abstract. In the current realities, the energy and industrial sectors around the world are facing a number of challenges, among which the main ones are climate. In this regard, companies are increasingly focusing their activities on moving towards net zero through working in various areas, one of which is a complex of CC(U)S technologies – carbon capture, utilization and storage, aimed at preventing anthropogenic CO₂ emissions into the atmosphere. For various reasons, these initiatives are not yet being developed in Russia, however, some experience has been accumulated in the world. The study presents an analysis of the world experience in the implementation of CC(U)S, identifies the features of the construction of technological chains, presents the elements of classification and analysis of organizational forms of CC(U)S projects. The general prospects for the development of such initiatives in Russia are determined, and an enlarged estimate of the costs of implementing CC(U)S in the Volga-Urals oil and gas province is presented.

Keywords: carbon dioxide, sequestration, utilization, CC(U)S, world experience, classification, cost estimation.

Введение. Проблема изменения климата становится все более актуальной и оказывает все большее влияние на промышленные и энергетические сектора, ответственные за существ-

венную часть выбросов парниковых газов (ПГ). Наибольшая доля выбросов приходится на энергетический сектор – в совокупности около 30% по миру [World Resource Institution].

Ежегодно масса выбросов ПГ увеличивается – в среднем на 1,3% в год [Friedlingstein, 2022], что требует принятия ряда конкретных мер. В 2015 г. 195 стран, в том числе Россия, стали сторонами Парижского соглашения по климату, которое закрепляет климатические цели на международном уровне. Это побудило промышленные и энергетические компании по всему миру на действия по планомерному движению к углеродной нейтральности за счет работы по разным направлениям.

Существуют различные подходы к определению мер достижения углеродной нейтральности. Согласно одному из них, достичь «чистого нуля» можно через реализацию следующих основных направлений: (1) компенсационные меры – уменьшение выбросов ПГ в одном секторе для компенсации выбросов, произведенных в другом, а также инвестирование в проекты по поглощению CO₂ (например, проекты лесовосстановления); (2) сокращение выбросов ПГ – минимизация количества выбросов CO₂ и других ПГ путем корректировки промышленных, энергетических и других процессов, например, посредством использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), внедрения проектов по повышению энергоэффективности и водородных проектов и т.д.; (3) удаление / секвестрация углекислого газа (естественными и искусственным путем), включающее комплекс технологий улавливания, хранения и использования CO₂ (технологии CC(U)S – carbon capture, utilization and storage) [Matemilola, 2020].

Инициативы CC(U)S на сегодня рассматриваются как одни из наиболее доступных для реализации в отраслях, испытывающих большую потребность в энергии, например, нефте- и газопереработке, а также в тех, в которых внедрение других мер ограничено. Наиболее перспективными отраслями-адаптерами технологий считаются традиционные отрасли энергетического и промышленного сектора, так как комплекс CC(U)S позволяет сохранить использование ископаемых видов топлива без существенных изменений в энергетических и промышленных процессах.

Однако, существует ряд факторов, ограничивающих полноценное масштабирование таких инициатив, среди которых основной – высокие затраты на их реализацию [Budinis, 2018], а также незрелость технологий (прежде всего, улавливания), отсутствие единой нормативно-правовой базы и другие. На сегодняшний день в мире действует 33 коммерческих проекта CC(U)S (13 – в США) с суммарной мощностью около 150 млн т CO₂ (2021), однако для достижения климатических целей к 2050 году необходимо увеличить этот показатель почти в 40 раз [Global Status of CCS, 2021].

Реализация действующих коммерческих проектов CC(U)S в России на сегодня отсутствует – известно лишь об одном проекте на ранних этапах разработки – Ямал СПГ CCS (ПАО «Новатэк»). Тем не менее, этот комплекс технологий вызывает интерес как со стороны промышленности, так и на государственном уровне [Скобелев, 2023]. Данное исследование направлено на систематизацию накопленного опыта с целью формирования организационно-экономических основ и подходов к оценке перспектив реализации CC(U)S в России.

Особенности построения технологической цепи и подходы к классификации проектов CC(U)S. В общем виде технологическая цепь CC(U)S включает 3 этапа: улавливание CO₂ на источнике выбросов, транспортировка и захоронение и / или использование газа. Перечисленные этапы могут реализовываться с применением разных способов, что формирует технологические признаки, по которым можно классифицировать проекты CC(U)S (рис. 1).



Рисунок 1 – Классификация проектов СС(U)S по группе технологических признаков

Источник: составлен авторами на основе [Череповицына, 2022;

Global Status of CCS, 2021; Carbon Capture ..., 2021].

Такие цепи могут состоять из набора определенных этапов, и от различных вариантов их организации будет зависеть тип проекта (рис. 2), а также другие параметры и характеристики.

Согласно рис. 2, все проекты СС(U)S укрупненно делятся на три типа: ССS (carbon capture and storage – улавливание и хранение CO₂), ССU (carbon capture and utilization – улавливание и использование CO₂), ССUS (carbon capture, utilization and storage – улавливание, хранение и использование CO₂). Последние предполагают использование углекислого газа в качестве агента для повышения нефтеотдачи (реже – газоотдачи) пластов (CO₂-EOR – enhanced oil recovery) и обычно реализуются в нефтегазовой отрасли.

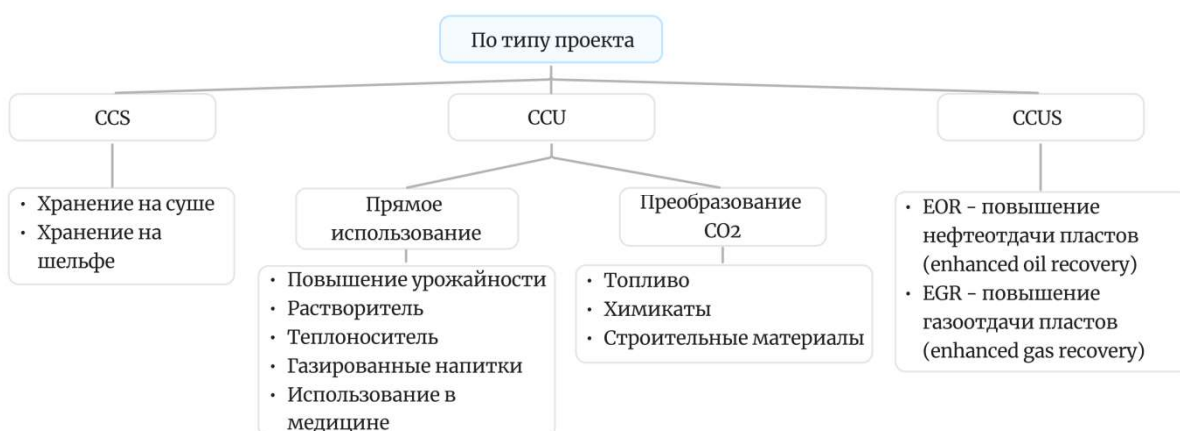


Рисунок 2 – Классификация проектов СС(U)S по типу

Источник: составлен авторами на основе [Череповицына, 2022;

Global Status of CCS, 2021; Carbon Capture ..., 2021].

Существуют примеры проектов CC(U)S, функционирующих в рамках одной отрасли, однако для реализации технологической цепи чаще задействованы разные сектора промышленности. Таким образом, чаще всего это межотраслевые комплексы, охватывающие две и более отраслей промышленности.

Формы организации межотраслевых комплексов CC(U)S. Инициативы CC(U)S могут принимать различные организационные формы – от простых, единичных объектов, до более сложных, предполагающих концентрацию, укрупнение производственных мощностей. Проведенный анализ терминологического аппарата и накопленного мирового опыта позволил определить следующие модели:

1) цепочка создания стоимости (value chain) или единичный объект (CC(U)S facility). Данная модель интегрирует все этапы технологической цепи и обычно характерна для мелких и средних проектов. Примером является американский проект Baytown Low Carbon Hydrogen, предполагающий улавливание и захоронение CO₂ на водородной установке – то есть, «на месте».

2) кластер CC(U)S (CC(U)S cluster). Выделяют два вида кластеров: промышленные кластеры (industrial clusters), или кластеры улавливания, и кластеры хранения (storage clusters). Кластеры предполагают концентрацию взаимосвязанных компаний, производственных мощностей, их сосредоточение на одной географической территории. Среди примеров промышленного кластера можно выделить кластер Тиссайд в Великобритании, объединяющий источники выбросов в энергетической отрасли и тяжелой промышленности. Примером кластера хранения является совокупность газовых месторождений в Северном море, используемых для захоронения углекислого газа в рамках проекта Porthos (Нидерланды).

3) кластерная сеть (clusters/CC(U)S network). В общем случае это укрупненная организационная модель, которая объединяет элементы цепочки создания стоимости с несколькими совместно расположенными (кластеризованными) источниками улавливания одного или разных типов, поставляющими CO₂ в единую систему транспортировки и хранения. Разновидностью кластерной сети являются международные сети и партнерство (international networks and collaboration). Ярким примером является британский проект Zero Carbon Number, партнером которого выступает норвежская компания National Grid, предоставляющая транспортную и инфраструктуру хранения.

4) хаб CC(U)S (CC(U)S hub). Обычно объединяет промышленные кластеры и кластеры хранения с разветвленными транспортными сетями, объединенными центральным пунктом сбора. К примерам можно отнести хабы распределения CO₂ по трубопроводам в США – Денвер-Сити Хаб и Мак Ками Хаб в Техасе.

Посредством анализа выявленных форм можно определить их принципиальные отличия, на основе которых становится возможным создание перечня ключевых факторов, формирующих предпосылки для реализации каждой модели. Проведенные исследования показали, что решающую роль играют три фактора: наличие источника выбросов, наличие мощностей для захоронения, возможность создания / использования существующей транспортной системы.

Организационно-экономические предпосылки для реализации проектов CC(U)S в России. По оценкам различных организаций, Россия обладает большим потенциалом для реализации CC(U)S с организационно-экономической точки зрения. Так, в 2020 г. суммарные выбросы ПГ в России составили 2 051,4 млн т CO₂-экв., из которых 1 624,2 млн т – углекислый газ [Федеральная служба государственной статистики]. Уровень компенсации выбросов за счет землепользования и лесного хозяйства оценивается в 569,2 млн т CO₂-экв. (только треть от суммарных выбросов ПГ). Наибольшая доля выбросов приходится на энергетический сектор, включая сжигание топлива, технологические выбросы от добычи твердых топлив и от деятельности, связанной с нефтью и газом – около 78%. Примерно 12% составляют выбросы от промышленной деятельности, в том числе химической промышленности, металлургии, производства продукции из минерального сырья и др. Согласно [Global Energy

Review, 2021], уровень суммарных антропогенных выбросов ПГ в России в 2021 г. был примерно равен уровню совокупных выбросов стран Европы.

Ряд отечественных исследований посвящен оценке возможностей захоронения и использования углекислого газа в России. Согласно [Сидорова, 2013], Россия, наравне с США, Канадой, Ближним Востоком и Северной Африкой, обладает наибольшим потенциалом для захоронения CO₂, а потенциально большие резервуары могут располагаться в крупнейших нефтегазовых провинциях, в частности, Волго-Уральской, Западно-Сибирской и Северо-Кавказской [Череповицын, 2018]. По оценкам МЭА, потенциальный объем геологических мощностей для хранения CO₂ в России и СНГ составляет около 1 трлн т. Согласно другим подсчетам [CCUS: Монетизация ..., 2021], емкость российских хранилищ составляет 1,173 трлн т, а емкость только нефтяных и газовых месторождений, подходящих для хранения и использования углекислого газа, – 305 млрд т. Европейская экономическая комиссия ООН (UNECE) оценивает потенциал для хранения CO₂ на российских нефтяных месторождениях в 56 млрд т. Также ученые сходятся во мнениях, что направление CO₂-EOR является наиболее перспективным для реализации в России по сравнению с другими вариантами организации третьего этапа (захоронение и / или использование) технологической цепи CC(U)S [Скобелев, 2023].

Таким образом, территория России является перспективной для внедрения комплекса CC(U)S, на что указывают оценки различных организаций по потенциалу захоронения, а также статистика по антропогенным выбросам ПГ и развитая нефтегазовая отрасль. Вместе с тем, Россия обладает одной из самых развитых газотранспортных систем, и возможность ее использования в технологических цепях CC(U)S также потенциально является организационно-экономической предпосылкой для реализации таких инициатив. Однако, как было указано ранее, одной из причин полноценного масштабирования CC(U)S считаются высокие затраты на реализацию технологий, особенно на этапе улавливания [Скобелев, 2023]. В следующем разделе предпринята попытка оценки затрат для двух вариантов реализации CCUS проекта на территории Волго-Уральской нефтегазоносной провинции (НГП) с использованием технологии CO₂-EOR.

Подходы к оценке затрат на внедрение комплекса CC(U)S в Волго-Уральской НГП. Оценка затрат на реализацию комплекса технологий CC(U)S в России проведена по двум вариантам. Первый вариант предполагает улавливание углекислого газа на Оренбургском газохимическом комплексе (объем выбросов – около 800 тыс. т CO₂ в год [Капуста, 2022]), транспортировку газа трубопроводным транспортом (протяженность – 75 км [Капуста, 2022]) и закачку в пласты Оренбургского газоконденсатного месторождения (ближайший объект к источнику улавливания). Для данного варианта выбрана простая организационная форма – цепочка создания стоимости. Второй вариант представляет собой попытку организации хаба CC(U)S на территории Волго-Уральской НГП и потенциального промышленного кластера, объединяющего металлургические предприятия Урала и Орский нефтеперерабатывающий завод (НПЗ). Суммарный объем эмиссии углекислого газа по промышленному кластеру оценивается в 40 млн т CO₂ в год [CCUS: Монетизация ..., 2021], общая протяженность трубопровода – 1300 км (с учетом перевозки газа от эмитентов до центрального пункта сбора по единой сети) [CCUS: Монетизация ..., 2021].

Капитальные затраты по проектам объединяют затраты по трем этапам технологической цепи CC(U)S (сооружение установок улавливания, трубопроводов, промышленной инфраструктуры). Оценка затрат на этапе улавливания и транспортировки проводилась на основе данных [Meeting the Dual Challenge, 2019] с учетом отрасли-адаптера технологий, мощности улавливания, протяженности трубопровода и др. Операционные затраты рассчитывались также для каждого этапа технологической цепи, согласно [Meeting the Dual Challenge, 2019; CCUS: Монетизация ..., 2021]. В табл. 1 представлены результаты укрупненных расчетов.

Таблица 1 – Результаты оценки затрат на реализацию CCUS проектов по двум вариантам

Группа затрат	Проект CCUS Мощность улавливания: 800 тыс. т CO ₂ в год	Хаб CCUS Мощность улавливания: 40 млн т CO ₂ в год
Капитальные, млн руб.	25 336	540 618
Операционные, млн руб. в год	735	51 806

Источник: составлена авторами.

Согласно табл. 1, с ростом мощности улавливания значительно увеличиваются капитальные и операционные затраты, но не пропорционально, что косвенно подтверждает большую возможную эффективность комплексов большей мощности и перспективность создания кластеров / хабов в России. Потенциал ресурсной базы, развитость инфраструктуры и наличие крупных промышленных объектов-эмитентов углекислого газа вблизи нефтегазовых месторождений рассматриваются в качестве ключевых организационно-экономических предпосылок для реализации CC(U)S. Так называемая возможная «монетизация выбросов CO₂» через технологии CO₂-EOR – главный стимул для развития таких технологий в России.

Стоит отметить, что оценка затрат для двух вариантов проводилась на основе открытых источников информации и предполагала получение укрупненных результатов. Дальнейшие исследования авторов будут направлены на уточнение исходных данных и разработку экономической модели с возможностью применения для разных вариантов и форм реализации CC(U)S в условиях России.

ЛИТЕРАТУРА

Капушта Е.В., Кундик А.А., Кызыма К.Ю. Пилотный проект по улавливанию CO₂ в Оренбургской области // Материалы международной научно-практической конференции «Решение Европейского союза о декарбонизации. Год спустя». – 2022. – С. 14-18.

Сидорова К.И., Череповицын А.Е. Оценка возможностей захоронения углекислого газа в геологических резервуарах // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2013. – Т. 8, – № 4. – С. 5.

Скобелев Д.О., Череповицына А.А., Гусева Т.В. Технологии секвестрации углекислого газа: роль в достижении углеродной нейтральности и подходы к оценке затрат // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 125-140.

Федеральная служба государственной статистики (Росстат). – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ochrana_okruj_sredi_2022.pdf (дата обращения 27.03.2023).

Череповицын А.Е., Васильев Ю.Н., Цветкова А.Ю. Оценка перспектив внедрения технологий секвестрации CO₂ // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2018. – № 2. – С. 86-89.

Череповицына А.А., Дорожкина И.П., Костылева В.М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – № 15 (4). – С. 473-487.

Budinis S. et al. An Assessment of CCS Costs, Barriers and Potential // Energy strategy reviews. – 2018. – Vol. 22. – P. 61-81.

Carbon Capture, Utilization and Storage. Towards Net-Zero. The Kearney Energy Transition Institute. – 2021. – URL: <https://www.kearney.com/documents/17779499/17781864/CCUS-2021+FactBook.pdf> (дата обращения 10.04.2023).

CCUS: Монетизация выбросов CO₂. Отчет VYGON Consulting. 2021. – URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/967/jzgy572b7ome167wi4dbao9fnsqsfj13/vygon_consulting_CCUS.pdf (дата обращения 10.04.2023).

Friedlingstein P. et al. Global Carbon Budget 2022 // Earth System Science Data. 2022. – Vol. 14. – P. 4811-4900.

Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021. – IEA. – 2021. – URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2> (дата обращения 20.03.2023).

Global Status of CCS. – Global CCS Institute. – 2021. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf (дата обращения 10.04.2023).

Matemilola S., Salami H. Net Zero Emission // Encyclopedia of Sustainable Management. – 2020. – P. 1-6.

Meeting the Dual Challenge. A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use and Storage. A Report of the National Petroleum Council. – 2019. – URL: https://dualchallenge.npc.org/files/CCUS-Chap_2-030521.pdf (дата обращения 15.04.2023).

World Resource Institution. – URL: <https://www.wri.org/> (дата обращения 12.04.2023).

Сведения об авторах:

Череповицына Алина Александровна, кандидат экономических наук, доцент, зав. лабораторией, старший научный сотрудник, Институт экономических проблем имени Г. П. Лузина, Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия; главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», Мытищи, Россия.

Дорожкина Ирина Петровна, стажер-исследователь, Институт экономических проблем имени Г. П. Лузина, Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия.

Cherepovitsyna Alina A., Candidate of Economic Science, Associate Professor, Head of Laboratory, Senior Researcher, Luzin Institute for Economic Studies – Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia; Senior Researcher, Research Institute “Environmental Industrial Policy Centre”, Mytishchi, Russia.

Dorozhkina Irina P., Junior Researcher, Luzin Institute for Economic Studies – Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia.

УДК: 338.0

JEL O13, Q01, Q56

Чжао Цзиэр

Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва, Россия

Стратегический анализ российско-китайского энергетического сотрудничества в Арктике в контексте низкоуглеродного развития

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы и направления российско-китайского сотрудничества в сфере зеленой экономики и низкоуглеродного развития. Принятая в 2020 году «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 года» согласуется с «Китайской стратегией по возрождению Северо-Востока, координации развития Пекина, Тяньцзиня и Хэбэя и интеграции Дельты реки Янцзы» в сфере низкоуглеродного развития. Рассматриваются возможности развития и укрепления стратегического сотрудничества России и Китая в области низкоуглеродной энергетики в Арктике. Анализируются инвестиционные проекты по развитию водородной