

КОМПЛЕКС ТЕХНОЛОГИЙ УЛАВЛИВАНИЯ, ХРАНЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ CO₂: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ФОРМ РЕАЛИЗАЦИИ

И. П. Дорожкина¹, А. А. Череповицына²

^{1, 2} Институт экономических проблем имени Г. П. Лузина
Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия
² Центр экологической промышленной политики, Мытищи, Россия
¹ irinadorozhkina.99@gmail.com, ² iljinovaaa@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сегодня промышленные и энергетические компании, в том числе отечественные, все больше ориентируют свою деятельность на сбалансированное экологическое развитие и декарбонизацию. Одним из перспективных направлений декарбонизации применительно к промышленным и энергетическим системам считается комплекс технологий улавливания, хранения и использования углекислого газа (CC(U)S – carbon capture, storage and utilization). Однако развитие данных инициатив на текущем этапе в России отсутствует по ряду причин. В исследовании учитываются особенности этих инициатив при организации разных этапов технологической цепи, уделяется внимание подходам к их построению с целью изучения моделей реализации комплекса CC(U)S в промышленности. *Материалы и методы.* Исследование выполнено на основе открытых источников информации (научные статьи по теме, аналитические отчеты различных организаций) с применением методов кабинетного исследования, контент-анализа, систематизации, декомпозиции, типологии и экспертных методов. *Результаты.* Результатами исследования выступают анализ межотраслевого характера технологических цепей CC(U)S на примере реальных проектов и терминологического аппарата применительно к организационным формам реализации таких инициатив, а также разработанная система факторов, определяющих возможности их внедрения. *Выводы.* Разработанная система может служить ориентиром при принятии решений о реализации инициатив CC(U)S на разных управленческих уровнях, в том числе в условиях России.

Ключевые слова: улавливание, хранение и использование CO₂, CC(U)S, технологические цепи, межотраслевой характер, организационные формы, система факторов

Для цитирования: Дорожкина И. П., Череповицына А. А. Комплекс технологий улавливания, хранения и использования CO₂: теория и практика организационных форм реализации // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 3. С. 38–52. doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-3

COMPLEX OF TECHNOLOGIES FOR CARBON CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE: THEORY AND PRACTICE OF ORGANIZATIONAL FORMS OF IMPLEMENTATION

I.P. Dorozhkina¹, A.A. Cherepovitsyna²

^{1, 2} Luzin Institute for Economic Studies – Subdivision of the Federal Research center
"Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia
² Center for Environmental Industrial Policy, Mytishchi, Russia
¹ irinadorozhkina.99@gmail.com, ² iljinovaaa@mail.ru

Abstract. *Background.* Today, industrial and energy companies, including domestic ones, are increasingly focusing their activities on balanced environmental development and decarbonization. A complex of technologies for carbon dioxide capture, utilization and storage (CC(U)S) is considered one of the promising areas of decarbonization in relation to industrial and energy systems. However, there is no development of these initiatives at the current stage in Russia for a number of reasons. The authors of this study take into account the peculiarities of these initiatives when organizing different stages of the technological chain, and pay attention to organizational approaches to their construction in order to study models for the implementation of the CC(U)S. *Materials and methods.* The research was carried out on the basis of open sources of information (scientific articles on the topic, analytical reports of various organizations) using the methods of desk research, content analysis, systematization, decomposition, typology and expert methods. *Results.* The results of the study are the analysis of the intersectoral nature of CC(U)S technological chains on the example of real projects and terminology in relation to organizational forms of implementation of such initiatives, as well as the developed system of factors determining the possibilities of their implementation. *Conclusions.* The developed system can serve as a guide when making decisions on the implementation of CC(U)S initiatives at various management levels, including in Russia.

Keywords: carbon capture, utilization and storage, CC(U)S, technological chains, intersectoral nature, organizational forms, system of factors

For citation: Dorozhkina I.P., Cherepovitsyna A.A. Complex of technologies for carbon capture, utilization and storage: theory and practice of organizational forms of implementation. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2023;(3):38–52. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-3-3

Введение

В настоящее время мировая и отечественная промышленность сталкивается с новыми вызовами. Мировое сообщество обеспокоено проблемой глобального потепления, что обуславливает определенное давление на промышленные и энергетические сектора, ответственные за существенную часть выбросов парниковых газов (ПГ) – порядка 12 и 30 % по миру соответственно¹. В сложившихся условиях российские промышленные компании, деятельность которых связана с существенными выбросами ПГ, формируют новые стратегии и внедряют новые практики, еще больше ориентированные на устойчивое развитие, движение к углеродной нейтральности и декарбонизацию своей деятельности.

В качестве примера можно рассмотреть низкоуглеродные практики некоторых российских компаний. Так, ПАО «ГМК "Норильский никель"» реализует программу по снижению выбросов серы и сохранению объемов выбросов ПГ с ростом объемов производства, планирует осуществлять переход на низкоуглеродные источники энергии². ПАО «Газпром нефть» для достижения климатических целей занимается развитием программ повышения уровня полезного использования попутного нефтяного газа (ПНГ), проектов по

¹ World Resources Institute. URL: <https://www.wri.org/> (дата обращения: 02.03.2023).

² Стратегия в области экологии и изменения климата. Отчет ПАО «ГМК "Норильский никель"». URL: https://www.nornickel.ru/upload/iblock/1cd/Norilsk_Nickel_Environmental_Strategy_2021_ru.pdf (дата обращения: 04.02.2023).

повышению энергоэффективности, инициатив и проектов CC(U)S, направленных среди прочего на увеличение нефтеотдачи пластов¹. ПАО «Северсталь» также поддерживает идею внедрения инициатив CC(U)S наравне с водородными проектами и проектами по повышению энергоэффективности².

Основываясь на разных заявлениях, можно сделать вывод, что российские компании действительно пересматривают фокус своего стратегического развития в сторону декарбонизации деятельности, в том числе проявляют интерес к технологиям CC(U)S. По мнению ряда ученых, проекты улавливания, хранения и использования CO₂ играют основополагающую роль в декарбонизации энергетики и промышленности, смягчая и делая более постепенными процессы энергетического перехода [1]; особое значение данные инициативы принимают в отраслях, испытывающих большую потребность в энергии, например в нефте- и газопереработке [2, 3]. Комплекс CC(U)S также видится промышленным компаниям как один из наиболее реалистичных и коммерчески доступных по сравнению с другими направлениями декарбонизации, а также перспективным для внедрения в нефтегазовой отрасли, так как CO₂ может быть использован для повышения нефтеотдачи пластов (технологии CO₂-EOR).

Несмотря на то, что комплекс технологий CC(U)S рассматривают как перспективный, количество действующих проектов в мире невелико. На сегодняшний день, согласно базе данных Глобального института CCS, в мире насчитывается 33 действующих коммерческих проекта CC(U)S. Лидерами являются США, Канада, Китай, страны Европы и Ближнего Востока. Реализация полноценных коммерческих проектов CC(U)S в России на данном этапе отсутствует.

К основным причинам, сдерживающим распространение инициатив CC(U)S, эксперты относят высокие затраты на их реализацию [4], а также незрелость технологий (прежде всего, улавливания), нормативно-правовой базы и ряд других; кроме того, наблюдаются сложности в выстраивании всей технологической цепочки – от улавливания до захоронения/использования. В аналитических отчетах³ и научной литературе предпринимаются попытки определения подходов к оценке стоимости реализации различных звеньев технологической цепи CC(U)S в отраслях промышленности [5]. Ряд статей посвящен исследованию факторов, влияющих на развитие CC(U)S, среди которых выделяют политико-правовые, технологические, экологические, экономические, организационные и др. [6–8]. Есть отдельные исследования, посвященные организационным моделям выстраивания таких процессов⁴. Ряд ученых

¹ ПАО «Газпром нефть». Новостной портал. URL: https://www.gazprom-neft.ru/press-center/news/gazprom_neft_obedit_usiliya_s_severstalyu_i_evrazom_po_razvitiyu_tekhnologiy_dlya_sokrashcheniya_u/ (дата обращения: 04.02.2023).

² Будущее декарбонизации металлургической отрасли: вызовы и решения. Отчет ПАО «Северсталь». URL: <https://vmeste.severstal.com/sustainability/budushchee-dekarbonizatsii-metallurgii-vyzovy-i-resheniya/> (дата обращения: 04.02.2023).

³ CCUS: монетизация выбросов CO₂. Отчет Vygon Consulting. 2021. URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/967/jzgy572b7ome167wi4dbao9fnsqsfj13/vygon_consulting_CCUS.pdf (дата обращения: 17.04.2023) ; ZEP: The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage. 2011. URL: <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Overall-CO2-Costs-Report.pdf> (дата обращения: 18.04.2023).

⁴ Understanding industrial CCS hubs and clusters. 2019. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf> (дата обращения: 10.03.2023).

занимается изучением особенностей конкретных организационных форм реализации CC(U)S, в том числе транспортных сетей и хабов CC(U)S [9,10], промышленных кластеров CC(U)S [11], но не рассматриваются их принципиальные отличия, факторы, определяющие возможности их организации. Анализ моделей и организационных форм реализации комплекса технологий CC(U)S остается недостаточно изученным.

Понимание специфики организации таких цепочек в разных отраслях промышленности, принципиальных отличий организационных форм CC(U)S, а также основ их функционирования необходимо для выработки подходов к внедрению CC(U)S в промышленности с учетом ряда организационных факторов, определяющих возможности их реализации, что формирует цель настоящего исследования.

Материалы и методы

Исследование выполнено на основе открытых источников информации с целью систематизации знаний о формах и возможностях организации цепей CC(U)S в промышленности. Исследование базируется на методах кабинетного исследования и контент-анализа. Для интерпретации полученных данных, в том числе по терминологическому аппарату, использовались методы сравнительного, критического, причинно-следственного анализа. Методы систематизации, декомпозиции, типологии и экспертные методы были ключевыми при формировании системы факторов, определяющих возможности для реализации различных организационных форм технологической цепи CC(U)S.

Теоретико-методологическую базу исследования составляют научные статьи зарубежных и российских ученых по теме, информационную – аналитические отчеты таких организаций, как Глобальный институт CCS (Global CCS Institute), Институт энергетического перехода Керни (The Kearney Energy Transition Institute), Vygon Consulting, официальные сайты приведенных в работе проектов CC(U)S. Основным источником статистических данных в области улавливания, хранения и использования CO₂ является база данных Глобального института CCS.

Сущность комплекса технологий CC(U)S и мировой опыт реализации проектов

В общем виде комплекс технологий CC(U)S включает три последовательных технологических этапа: улавливание газа на источнике выбросов, его подготовка и транспортировка одним из известных способов, полезное использование и/или закачка с целью долгосрочного хранения под землей.

Существуют примеры проектов CC(U)S, функционирующих в рамках одной отрасли, однако они, скорее, являются единичными и зачастую базируются на объектах по производству водорода и биоэтанола, в нефтегазовой отрасли¹. Для реализации всей технологической цепи CC(U)S чаще задействованы разные сектора промышленности, что объясняется необходимостью реализации нескольких технологических этапов. В табл. 1 представлены примеры таких проектов.

¹ CCS Database. URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 04.01.2023).

Таблица 1

Проекты CC(U)S, реализующиеся в рамках одной и нескольких отраслей промышленности (составлено авторами по данным Global CCS Institute ¹)

Проект	Страна	Количество задействованных отраслей	Категория проекта (по объемам ² улавливания)	Стадия проекта ³	Отрасли, в которых реализуется проект
Проект на месторождении Русанда	Сербия / Россия	1	Мелкий	В эксплуатации	Нефтегазовая
Baytown Low Carbon Hydrogen	США	1	Крупнейший глобальный	Активная разработка	Производство водорода
ACTL	Канада	2	Крупный	В эксплуатации	Нефтегазовая, химическое производство
CCU Lighthouse Carboneras	Испания	2	Средний	н /д	Цементное и химическое производство
Zero Carbon Humber	Великобритания	4	Крупнейший глобальный	н /д	Цементное и химическое производство, производство чугуна и стали, энергетическая

Так, на российском проекте ПАО «Газпром нефть» на месторождении Русанда в Сербии задействована одна отрасль – нефтегазовая. Другим примером проекта, реализующегося в рамках одной отрасли, является американский проект Baytown Low Carbon Hydrogen на базе крупнейшего завода по производству водорода⁴.

Среди примеров проектов, реализующихся в двух и более отраслях, можно выделить канадский проект ACTL, где углекислый газ улавливается на химических заводах и заводе по производству удобрений, далее транспортируется трубопроводом, принадлежащем сервисной компании Wolf

¹ Global Status of CCS 2021 / Global CCS Institute. 2021. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/> (дата обращения: 14.04.2023) ; Carbon Capture Utilization and Storage / The Kearney Energy Transition Institute. 2021 URL: <https://www.kenearney.com/documents/17779499/17781864/CCUS-2021+FactBook.pdf> (дата обращения: 14.04.2023) ; CCS Database. URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 04.01.2023).

² Для отнесения проекта к категории по объему мощностей и стадии проекта используются классификации, разработанные Глобальным институтом CCS и Институтом энергетического перехода Керни.

³ Для отнесения проекта к категории по объему мощностей и стадии проекта используются классификации, разработанные Глобальным институтом CCS и Институтом энергетического перехода Керни.

⁴ CCS Database. URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 04.01.2023).

Midstream, на нефтяные месторождения, где закачивается в пласты с целью повышения нефтеотдачи¹. Проект CCU Lighthouse Carboneras в Испании будет базироваться на цементном заводе и будет направлен на улавливание CO₂ для дальнейшего преобразования, очистки и повторного использования для повышения урожайности в сельском хозяйстве². Крупнейший глобальный проект Zero Carbon Humber в Великобритании объединяет химические, металлургические, цементные и другие промышленные заводы, выбрасывающие CO₂³.

Так, этапы технологической цепи CC(U)S в рамках одного проекта в общем виде могут быть организованы следующим образом: CO₂ обычно улавливается на промышленных заводах, энергетических объектах, транспортируется по трубопроводам, операторами которых являются нефтегазовые компании, закачивается в нефтегазовые пласты с целью увеличения нефтеотдачи или направляется на повторное полезное использование в сельском хозяйстве и других отраслях. Это позволяет сформировать идею о том, что технологические цепи и проекты CC(U)S носят межотраслевой характер, что определяет особые подходы к организации и управлению такими инициативами. При этом организационные формы их реализации приобретают различные виды и в научной литературе и практико-ориентированных аналитических материалах могут называться по-разному.

Анализ терминологического аппарата применительно к организационным формам реализации инициатив и проектов CC(U)S

Организационные формы CC(U)S могут различаться в зависимости от количества источников улавливания, особенностей использования газа / его захоронения, характеристик транспортной системы, объектов, являющихся участниками технологического процесса, и прочего, что определяет набор критериев, по которым можно провести их сравнительный анализ (табл. 2).

Самой простой формой организации CC(U)S является цепочка создания стоимости (value chain) или единичный объект (CC(U)S facility), обычно интегрирующая все этапы технологической цепи CC(U)S от улавливания до захоронения/использования CO₂. Зачастую проекты с таким типом организации технологической цепи относят к категории мелких, в которых CO₂ улавливается из одного источника и захороняется/используется на одном объекте.

Существуют и более сложные организационные формы CC(U)S, которые в зарубежной литературе могут носить название кластеров (clusters), сетей (networks) и хабов (hubs).

¹ Global CCS Institute welcomes the 20th and 21st large-scale CCS facilities into operation. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/press-room/media-releases/global-ccs-institute-welcomes-the-20th-and-21st-large-scale-ccs-facilities-into-operation/> (дата обращения: 25.01.2023).

² Lighthouse Carboneras. URL: <https://www.carbonclean.com/news/lafargeholcim-and-carbon-clean-to-develop-large-scale-ccus-plant> (дата обращения: 25.01.2023).

³ Zero Carbon Humber. URL: <https://www.zerocarbonhumber.co.uk/> (дата обращения: 29.01.2023).

Сравнительный анализ различных организационных форм реализации инициатив и проектов СС(U)S (составлено авторами с использованием данных¹)

Организационная форма	Количество источников улавливания	Количество мест хранения	Наличие транспортной инфраструктуры	Основные компании-участники
Цепочка создания стоимости (Value chain)	1	1	Отсутствует / есть трубопровод	Промышленные, энергетические, транспортные
Промышленный кластер (Industrial cluster)	Много	–	–	Промышленные, энергетические
Кластер хранения (Storage cluster)	–	Много	–	Энергетические
Кластерная сеть (Cluster / СС(U)S network)	Много	1	Есть трубопровод / разветвленная транспортная сеть	Промышленные, энергетические, транспортные
Международные сети и партнерство (International networks and collaboration)	1 и более	1 и более	Есть трубопровод / разветвленная транспортная сеть	Международные промышленные, энергетические, транспортные
Хаб СС(U)S (CC(U)S hub)	Много	Много	Разветвленные транспортные сети, объединенные центральным пунктом сбора	Промышленные, энергетические, транспортные

В контексте СС(U)S можно выделить два вида кластеров:

1. Промышленные кластеры (industrial clusters) – форма организации этапа улавливания технологической цепи СС(U)S. Для СС(U)S идея кластеров улавливания порождена тем, что по всему миру существует множество объектов выбросов ПГ, которые зачастую расположены на небольших расстояниях друг от друга.

2. Кластеры хранения (storage clusters) – форма организации этапа захоронения технологической цепи СС(U)S. В кластерах хранения CO₂ обычно распределяется между группой различных, но достаточно близких по расположению геологических мест хранения и/или нефтегазовых месторождений.

Развитие идеи кластеров поспособствовало созданию другой организационной модели – кластерной сети (cluster/CC(U)S network), которая тесно

¹ CCS Database. URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 10.03.2023) ; Understanding industrial CCS hubs and clusters. 2019. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf> (дата обращения: 10.03.2023).

связана с понятием «транспортная сеть» или «трубопроводная сеть» (pipeline network) [10, 12]. В общем случае это укрупненная организационная модель, которая объединяет элементы цепочки создания стоимости с несколькими совместно расположенными (кластеризованными) источниками улавливания, поставляющими CO₂ в единую систему транспортировки и хранения¹. По сравнению с единичными объектами CC(U)S, кластерные сети крупнее и включают в себя больше заинтересованных сторон с более активным участием местных и региональных органов власти [11]. Разновидностью кластерной сети являются международные сети и партнерство (international networks and collaboration). Это кластерные сети, реализующиеся на территории нескольких государств или объединяющие объекты, операторами которых являются международные компании.

По мере увеличения промышленных кластеров (кластеров улавливания) инфраструктура транспортировки и хранения может также расширяться, и в географических районах, где наблюдается высокая концентрация как промышленных и энергетических объектов, так и близлежащих мощностей для хранения CO₂, создаются предпосылки для развития хабов CC(U)S (CC(U)S hubs). Эта наиболее сложная и одновременно «молодая» организационная модель, обычно объединяющая промышленные кластеры и кластеры хранения с разветвленными транспортными сетями, объединенными центральным пунктом сбора. Хабы могут создаваться как на этапе улавливания, так и на этапе хранения, или одновременно на обоих этапах.

Исследование данных организационных форм от самой простой к более сложной позволяет выделить их принципиальные отличия, на основе которых могут быть выявлены ключевые факторы, определяющие возможности для реализации каждой модели.

Организационные факторы, определяющие возможности реализации различных форм организации технологической цепи CC(U)S

Накопленный мировой опыт позволяет проводить исследования, направленные на изучение вопросов, связанных с реализацией проектов CC(U)S в определенных странах и регионах. Ряд исследований посвящен формированию общих факторов, влияющих на развитие таких инициатив, – механизмов, которые стимулируют их внедрение [3, 13]. Ученые сходятся во мнениях, что наибольшее влияние на проекты CC(U)S оказывают политико-правовые факторы [8, 14], среди которых выделяют общепринятые нормативно-правовые базы, меры государственной поддержки и регулирования, образовательные и финансовые инструменты, включающие схемы торговли выбросами. К другим группам факторов ученые относят экономические (затраты на реализацию и коммерческие эффекты), экологические (уровень выбросов ПГ), социальные (восприятие/одобрение проектов и других экологических инициатив общественностью) и организационные (уровень экономического развития в стране, опыт использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), значимость традиционных видов топлива и др.) [8].

¹ Understanding industrial CCS hubs and clusters. 2019. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf> (дата обращения: 10.03.2023).

Несмотря на наличие общих факторов в конкретных странах и регионах, для реализации той или иной организационной формы существует ряд частных факторов, идентификация и анализ которых позволяет определить целесообразность реализации той или иной формы в каждом конкретном случае. Авторы выявили и систематизировали следующие частные факторы:

- наличие источника выбросов;
- концентрация нескольких объектов/источников выбросов на одной географической территории;
- возможность создания/использования существующей транспортной системы;
- возможность создания/использования существующих центральных пунктов сбора и распределения;
- наличие мощностей хранения;
- концентрация мощностей хранения на одной географической территории;
- возможность международного сотрудничества.

Проведенное исследование выявленных принципиальных отличий организационных моделей (см. табл. 2) позволило идентифицировать факторы, являющиеся решающими, определяющими возможности реализации той или иной организационной формы. В результате анализа выявленных факторов сформировалась система (табл. 3), учитывающая характерные, отличительные особенности выявленных организационных моделей СС(U)S.

Для цепочки создания стоимости решающим фактором является наличие источника выбросов и мощностей хранения. Для кластера улавливания определяющим фактором становится наличие источника улавливания, для кластера хранения – мощностей хранения с возможностью их концентрации на одной географической территории. Другие факторы, по мнению авторов, не являются решающими при принятии решения о реализации данных форм.

Важным и отличительным от предыдущих форм фактором при реализации кластерной сети является наличие возможности создания или использования существующей транспортной системы и концентрации нескольких источников улавливания в определенной географической области, что следует из определения кластерной сети. Для данной модели характерно наличие одного места хранения, поэтому необходимость в концентрации мощностей хранения в этом случае отсутствует.

Отличительной особенностью и фактором, определяющим возможности реализации международных сетей и партнерства, является, в первую очередь, возможность международного сотрудничества. Допускается, что данный фактор может быть характерным и для любой другой организационной модели, но решающим является только в случае реализации международной сети.

Возможность организации хаба – самой сложной организационной формы СС(U)S – зависит от большого количества факторов, решающим среди которых является возможность организации разветвленной транспортной сети и центральных пунктов сбора, что отличает хаб от других организационных моделей. В случае хаба снижается значимость международного сотрудничества, однако существуют примеры такого взаимодействия.

Таблица 3

Система факторов, определяющих возможности реализации различных форм организации технологической цепи CC(U)S (составлено авторами)

	Наличие источника выбросов	Концентрация нескольких объектов/источников выбросов на одной географической территории	Возможность создания/использования существующей транспортной системы	Возможность создания/использования существующих центральных пунктов сбора и распределения	Наличие мощностей хранения	Концентрация мощностей хранения на одной географической территории	Возможность международного сотрудничества
Цепочка создания стоимости							
Кластер улавливания							
Кластер хранения							
Кластерная сеть							
Международная сеть							
Хаб							

 – фактор, определяющий возможности реализации организационной формы.

Обсуждение

Важно отметить, что анализ форм организации технологических цепей CC(U)S и исследование в целом проводилось на основе открытых источников информации, что обуславливает ряд сложностей при сборе данных, получении результатов и их интерпретации.

Разработанная система факторов может служить ориентиром для принятия решений о том, какую модель организации технологической цепи целесообразно выбирать для внедрения в определенном регионе, при различных условиях. Так, с помощью нее можно теоретизировать потенциальные регионы России, где в перспективе могут реализовываться различные формы организации технологической цепи CC(U)S с учетом выявленных факторов. Авторы предполагают, что простые формы могут внедряться на базе промышленных заводов и объектов энергетики, которые, в свою очередь, достаточно распространены, в случае наличия по близости мощностей хранения и транспортных систем, согласно разработанной системе факторов.

Видится, что основными объектами, где может улавливаться углекислый газ, в России могут стать нефтеперерабатывающие заводы; металлургические комбинаты; заводы по производству аммиака, минеральных удобрений и др. Наибольшая концентрация российских промышленных заводов данных отраслей характерна для территорий Уральского, Центрального, Приволжского федерального округа. Перечисленные регионы могут рассматриваться, согласно разработанной системе факторов, как потенциальные кластеры улавливания углекислого газа. Стоит принимать к сведению, что предложенная система учитывает лишь те особенности, которые отличают одну организационную форму от другой, однако не исключено, что на их реализацию могут влиять и другие факторы. В случае кластера улавливания таким фактором будет наличие мощностей для захоронения CO₂, расположенных на разумном для реализации проекта расстоянии, так как улавливание углекислого газа нецелесообразно без его дальнейшей утилизации.

Решающим фактором при реализации кластера хранения, согласно разработанной системе, является концентрация мощностей хранения на одной географической территории. Согласно различным исследованиям [15, 16], в России такими территориями потенциально могут стать области нефтегазоносных провинций: Западно-Сибирской, Волго-Уральской, Тимано-Печорской, Северо-Кавказской, так как они отличаются сосредоточением месторождений в одном регионе.

Создание в регионах кластерных сетей и хабов вызывает больше всего вопросов и сомнений в силу ограниченности информации. Ситуация также осложняется рядом исключений, которые можно выявить на практике. Так, в базе данных Глобального института CCS все реальные функционирующие проекты CC(U)S классифицируются по двум категориям: единичный объект и сеть CC(U)S, однако известно о том, что в мире создаются и развиваются хабы, международные сети и т.д. Учитывая вышесказанное, авторы предприняли попытку систематизации мирового опыта для определения более четких границ между выявленными организационными формами CC(U)S и установления решающих факторов, определяющих возможности их внедрения.

Одновременно с тем, согласно Vygon Consulting¹, расположение Волго-Уральской нефтегазоносной провинции вблизи крупных производственных

¹ CCUS: монетизация выбросов CO₂. Отчет Vygon Consulting. 2021. URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/967/jzgys72b7ome167wi4dbao9fnsqsfj13/vygon_consulting_CCUS.pdf (дата обращения: 17.04.2023).

мощностей считается наиболее благоприятным и перспективным для создания в регионе хаба СС(U)S. Однако хаб СС(U)S на сегодняшний день является наиболее сложной и молодой в сравнении с другими формами организации технологической цепи СС(U)S организационной формой, что становится ограничивающим фактором при проведении исследований по данному вопросу.

Выводы

Авторы настоящей статьи предприняли попытку систематизации накопленного опыта с целью формирования новых идей и взглядов на реализацию комплекса технологий СС(U)S в промышленности. В результате исследования были сделаны выводы, что технологические цепи СС(U)S в основном являются межотраслевыми: этапы технологического процесса могут быть реализованы в нескольких отраслях промышленности и энергетики, что подтверждается примерами реальных проектов.

Проведенный сравнительный анализ различных организационных моделей построения цепей СС(U)S позволил выделить простые формы, такие как цепочка создания стоимости или единичный объект, и формы, связанные с возможностью концентрации производственных мощностей, укрупнения их в кластеры, кластерные сети и хабы СС(U)S. Авторы допускают, что выявленные характеристики организационных моделей СС(U)S в общем случае будут присущи конкретным проектам, но могут быть исключения.

На основе анализа терминологического аппарата и выявленных принципиальных отличий организационных моделей СС(U)S авторы предприняли попытку выявления факторов, определяющих возможности их внедрения. Авторы рассмотрели ряд микро- и макроэкономических факторов, а также идентифицировали решающие для каждой организационной модели. В результате была разработана система факторов, определяющих возможности реализации различных организационных форм построения технологической цепи СС(U)S. Результаты исследования, по мнению авторов, могут быть использованы при планировании реализации проектов СС(U)S и выборе оптимальной организационной формы в определенном регионе, в том числе российскими промышленными и энергетическими компаниями, а также на государственном уровне.

Список литературы

1. Bui M., Adjiman C. S., Bardow A. [et al.]. Carbon capture and storage (CCS): the way forward // *Energy & Environmental Science*. 2018. Vol. 11, № 5. P. 1062–1176. doi: 10.1039/C7EE02342A
2. Khorasani M., Sarker S., Kabir G., Ali S. M. Evaluating strategies to decarbonize oil and gas supply chain: Implications for energy policies in emerging economies // *Energy*. 2022. Vol. 258. P. 124805. doi: 10.1016/j.energy.2022.124805
3. Dalla Longa F., Detz R., van der Zwaan B. Integrated assessment projections for the impact of innovation on CCS deployment in Europe // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2020. Vol. 103. P. 103133. doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103133
4. Budinis S., Krevor S., Dowell N. M. [et al.]. An assessment of CCS costs, barriers and potential // *Energy Strategy Reviews*. 2018. Vol. 22. P. 61–81. doi: 10.1016/j.esr.2018.08.003

5. Skobelev D., Cherepovitsyna A., Guseva T. Carbon capture and storage: net zero contribution and cost estimation approaches // *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. P. 125–140. doi: 10.31897/PMI.2023.10
6. Dixon T., McCoy S. T., Havercroft I. Legal and Regulatory Developments on CCS // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2015. Vol. 40. P. 431–448. doi: 10.1016/j.ijggc.2015.05.024
7. Torvanger A., Meadowcroft J. The political economy of technology support: Making decisions about carbon capture and storage and low carbon energy technologies // *Global Environmental Change*. 2011. Vol. 21, № 2. P. 303–312. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.01.017
8. Romasheva N., Ilinova A. CCS Projects: How Regulatory Framework Influences Their Deployment // *Resources*. 2019. Vol. 8, № 4. P. 181. doi: 10.3390/resources8040181
9. Harkin T., Filby I., Sick H. [et al.]. Development of a CO₂ Specification for a CCS Hub Network // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 114. P. 6708–6720. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1801
10. Wetenhall B., Race J. M., Aghajani H. [et al.]. Considerations in the Development of Flexible CCS Networks // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 114. P. 6800–6812. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1810
11. Gough C., Mander S. CCS industrial clusters: Building a social license to operate // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2022. Vol. 119. P. 103713. doi: 10.1016/j.ijggc.2022.103713
12. Guo J.-X. Integrated optimization model for CCS hubs and pipeline network design // *Computers & Chemical Engineering*. 2020. Vol. 132. P. 106632. doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.106632
13. Koelbl B. S., van den Broek M., van Ruijven B. J. [et al.]. Uncertainty in the deployment of Carbon Capture and Storage (CCS): A sensitivity analysis to techno-economic parameter uncertainty // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2014. Vol. 27. P. 81–102. doi: 10.1016/j.ijggc.2014.04.024
14. Groenenberg H., de Coninck H. Effective EU and Member State policies for stimulating CCS // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2008. Vol. 2, № 4. P. 653–664. doi: 10.1016/j.ijggc.2008.04.003
15. Череповицын А. Е., Васильев Ю. Н. Оценка перспектив внедрения технологий секвестрации CO₂ // РИСК: ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. 2018. № 2. С. 86–89.
16. Новиков Д. А., Дульцев Ф. Ф., Юрчик И. И. [и др.]. Региональный прогноз перспектив захоронения углекислого газа на территории Российской Федерации // *Нефтяное хозяйство*. 2022. № 3. С. 36–42. doi: 10.24887/0028-2448-2022-3-36-42

References

1. Bui M., Adjiman C. S., Bardow A. et al. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science*. 2018;11(5):1062–1176. doi: 10.1039/C7EE02342A
2. Khorasani M., Sarker S., Kabir G., Ali S.M. Evaluating strategies to decarbonize oil and gas supply chain: Implications for energy policies in emerging economies. *Energy*. 2022;258:124805. doi: 10.1016/j.energy.2022.124805
3. Dalla Longa F., Detz R., van der Zwaan B. Integrated assessment projections for the impact of innovation on CCS deployment in Europe. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2020;103:103133. doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103133
4. Budinis S., Krevor S., Dowell N.M. et al. An assessment of CCS costs, barriers and potential. *Energy Strategy Reviews*. 2018;22:61–81. doi: 10.1016/j.esr.2018.08.003

5. Skobelev D., Cherepovitsyna A., Guseva T. Carbon capture and storage: net zero contribution and cost estimation approaches. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:125–140. doi: 10.31897/PMI.2023.10
6. Dixon T., McCoy S.T., Havercroft I. Legal and Regulatory Developments on CCS. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2015;40:431–448. doi: 10.1016/j.ijggc.2015.05.024
7. Torvanger A., Meadowcroft J. The political economy of technology support: Making decisions about carbon capture and storage and low carbon energy technologies. *Global Environmental Change*. 2011;21(2):303–312. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.01.017
8. Romasheva N., Ilinova A. CCS Projects: How Regulatory Framework Influences Their Deployment. *Resources*. 2019;8(4):181. doi: 10.3390/resources8040181
9. Harkin T., Filby I., Sick H. et al. Development of a CO₂ Specification for a CCS Hub Network. *Energy Procedia*. 2017;114:6708–6720. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1801
10. Wetenhall B., Race J.M., Aghajani H. et al. Considerations in the Development of Flexible CCS Networks. *Energy Procedia*. 2017;114:6800–6812. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1810
11. Gough C., Mander S. CCS industrial clusters: Building a social license to operate. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2022;119:103713. doi: 10.1016/j.ijggc.2022.103713
12. Guo J.-X. Integrated optimization model for CCS hubs and pipeline network design. *Computers & Chemical Engineering*. 2020;132:106632. doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.106632
13. Koelbl B.S., van den Broek M., van Ruijven B. J. et al. Uncertainty in the deployment of Carbon Capture and Storage (CCS): A sensitivity analysis to techno-economic parameter uncertainty. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2014;27:81–102. doi: 10.1016/j.ijggc.2014.04.024
14. Groenenberg H., de Coninck H. Effective EU and Member State policies for stimulating CCS. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2008;2(4):653–664. doi: 10.1016/j.ijggc.2008.04.003
15. Cherepovitsyn A.E., Vasil'ev Yu.N. Assessment of prospects for the introduction of CO₂ sequestration technologies. *RISK: resursy, informatsiya, snabzhenie, konkurentsia = RISK: resources, information, supply, competition*. 2018;(2):86–89. (In Russ.)
16. Novikov D.A., Dul'tsev F.F., Yurchik I.I. et al. Regional forecast of prospects for the disposal of carbon dioxide on the territory of the Russian Federation. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil economy*. 2022;(3):36–42. (In Russ.). doi: 10.24887/0028-2448-2022-3-36-42

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Петровна Дорожкина

стажер-исследователь
лаборатории управления
устойчивым развитием
промышленных и природных систем,
Институт экономических проблем
имени Г. П. Лузина Кольского
научного центра РАН
(Россия, Мурманская обл., г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24а)
E-mail: irinadorozhkina.99@gmail.com

Irina P. Dorozhkina

Trainee researcher
of the laboratory for management
of the sustainable development
of industrial and natural systems,
Luzin Institute for Economic Studies –
Subdivision of the Federal Research center
"Kola Science Center of the Russian
Academy of Sciences"
(24a Fersmana street, Apatity, Murmansk
region, Russia)

Алина Александровна Череповицына
кандидат экономических наук, доцент,
заведующий лабораторией управления
устойчивым развитием промышленных
и природных систем,
Институт экономических проблем
имени Г. П. Лузина Кольского
научного центра РАН
(Россия, Мурманская обл., г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24а);
главный научный сотрудник отдела
промышленной экологии,
Центр экологической
промышленной политики
(Россия, Московская обл., г. Мытищи,
Олимпийский пр-кт, 42)
E-mail: iljinovaaa@mail.ru

Alina A. Cherepovitsyna
Candidate of economical sciences,
associate professor,
head of the laboratory for management
of the sustainable development
of industrial and natural systems,
Luzin Institute for Economic Studies –
Subdivision of the Federal Research center
"Kola Science Center of the Russian
Academy of Sciences"
(24a Fersmana street, Apatity, Murmansk
region, Russia);
chief researcher of the industrial ecology
department,
Center for Environmental Industry Policy
(42 Olympiyskiy avenue, Mytishchi,
Moscow Region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 02.09.2023

Поступила после рецензирования/Revised 12.09.2023

Принята к публикации/Accepted 13.09.2023