

## АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ И ФАКТОРОВ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ УЛАВЛИВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Светлана Валерьевна РАТНЕР<sup>a,\*</sup>,

Анастасия Валерьевна СИНЕЛЬНИКОВА<sup>b</sup>

<sup>a</sup> доктор экономических наук, главный научный сотрудник  
лаборатории экономической динамики и управления инновациями,  
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН);  
профессор кафедры экономико-математического моделирования,  
Российский университет дружбы народов (РУДН),  
Москва, Российская Федерация  
lanaratner@ipu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3485-5595>  
SPIN-код: 7840-4282

<sup>b</sup> аспирантка лаборатории управления инновациями в технических системах,  
Кубанский государственный университет (КубГУ),  
Краснодар, Российская Федерация  
sinelnikova\_nast@mail.ru  
ORCID: отсутствует  
SPIN-код: 5124-9024

\* Ответственный автор

### История статьи:

Reg. № 353/2023  
Получена 31.07.2023  
Получена в  
доработанном виде  
10.08.2023  
Одобрена 21.08.2023  
Доступна онлайн  
28.09.2023

Специальность: 5.2.3

УДК 338.2

JEL: O32, Q20, Q42,  
Q55

### Аннотация

**Предмет.** В настоящее время технологии улавливания, использования и хранения водорода (CCUS) считаются единственной группой инновационных технологий, которая способствует как непосредственному сокращению выбросов в ключевых секторах экономики, так и удалению CO<sub>2</sub> из уже произведенных выбросов, которых технологически невозможно избежать. Без развития данных технологий невозможно достижение целей по декарбонизации мировой экономики в 2050 г. Однако скорость развития технологий CCUS в настоящее время значительно ниже, чем ожидалось ранее.

**Цели.** Обзор динамики и факторов развития технологий CCUS, а также анализ наиболее коммерчески перспективных направлений их промышленного применения в России.

**Методология.** Исследование проведено методами литературного обзора, контент-анализа нормативно-правовой документации, дескриптивной статистики и кейс-стади. Информационной базой исследования послужили аналитические обзоры Международного энергетического агентства и база данных проектов CCUS Мирового института CCUS.

**Результаты.** В настоящее время США остаются лидером по практическому использованию технологий CCUS. Во многом это связано с наличием разветвленной сети трубопроводов, по которым может транспортироваться CO<sub>2</sub>, высоким спросом на углекислый газ, формируемым многочисленными нефтедобывающими компаниями в целях использования в технологиях повышения нефтеотдачи, а также программами государственного финансирования, в том числе введенными после глобального финансового кризиса 2008–2009 гг. Наиболее перспективными сферами внедрения технологий CCUS являются

энергетика, тяжелая промышленность, транспортировка на большие расстояния и производство низкоуглеродистого водорода.

**Ключевые слова:**

энергетический переход, декарбонизация, улавливание и хранение диоксида углерода, низкоуглеродистый водород

**Выводы.** Главными драйверами развития технологий CCUS за рубежом являются технические ограничения на снижение выбросов CO<sub>2</sub> в промышленном и транспортном секторах. В России основным фактором, стимулирующим развитие технологий CCUS, является государственный план развития экспортно ориентированного производства «чистого» водорода. Основными барьерами развития технологий CCUS в мире являются нестабильность национальных политик ведущих стран в сфере ограничений на выбросы CO<sub>2</sub>. Основными барьерами в России являются санкционные ограничения, наложенные на энергетический сектор страны, и снижающиеся темпы роста водородной энергетики как за счет сокращения доступа к зарубежным инновационным разработкам, так и за счет увеличения барьеров выхода на международные рынки инновационных энергетических продуктов РФ.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2023

**Для цитирования:** Ратнер С.В., Синельникова А.В. Анализ тенденций и факторов развития технологий улавливания и хранения диоксида углерода в России и за рубежом // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2023. – Т. 22, № 9. – С. 1725 – 1745.  
<https://doi.org/10.24891/ea.22.9.1725>

## Введение

Развитие и широкое практическое применение технологий улавливания, использования и хранения водорода (Carbon capture, use, and storage – CCUS) сегодня считается необходимым условием для достижения целей по декарбонизации мировой экономики. В настоящее время – это единственная группа технологий, которая способствует как непосредственному сокращению выбросов в ключевых секторах экономики, так и удалению CO<sub>2</sub> из уже произведенных выбросов, которых технологически невозможно избежать. Еще одним важным фактором привлекательности технологий CCUS является то, что они предоставляют возможность модернизации энергетических объектов, которые построены без учета климатических целей сравнительно недавно и еще могли бы функционировать в течение десятилетий, если бы существовала возможность сокращения их выбросов CO<sub>2</sub>. Кроме того, технологии CCUS могут обеспечить производство низкоуглеродистого водорода на основе природного газа или угля в странах с недорогими ресурсами наименее затратным способом. Дополнительным плюсом данного кластера технологий является то, что улавливаемый CO<sub>2</sub> может быть использован в различных технологических процессах, в том числе для производства экологически чистого авиационного топлива, что повышает коммерческую привлекательность технологии<sup>1</sup>.

Тем не менее, скорость развития технологий CCUS в настоящее время значительно ниже, чем ожидалось ранее. Еще 2009 г. в дорожной карте Международного

<sup>1</sup> CCUS in Clean Energy Transitions. URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

энергетического агентства (МЭА) по продвижению CCUS была поставлена цель разработать с 2010 по 2020 г. 100 крупномасштабных проектов с общей мощностью накопительных систем около 300 млн т CO<sub>2</sub> в год. Однако по данным на конец 2020 г., фактическая мощность накопителей CCUS составляет всего около 40 млн т, то есть 13% от целевого показателя<sup>2</sup>.

Инвестиции в CCUS значительно отстают от инвестиций в другие технологии так называемой чистой энергетики и составляют примерно 0,5% от всего объема мировых инвестиций в возобновляемую энергетику и энергоэффективные технологии<sup>3</sup>. В качестве основных причин такого сдержанного интереса инвесторов к объектам CCUS эксперты выделяют отсутствие последовательной политики [1]. При отсутствии штрафов (налогов) на выбросы углекислого газа инвестиции в CCUS могут быть коммерчески неоправданными, особенно в тех регионах и отраслях, где CO<sub>2</sub> не используется в качестве промышленного сырья. Высокая стоимость установки инфраструктуры и трудности с интеграцией различных элементов цепочки поставок CO<sub>2</sub>, технические риски, связанные с установкой или расширением мощностей CCUS в некоторых областях применения, трудности с распределением коммерческих рисков между партнерами по проекту и проблемы с обеспечением финансирования также препятствовали инвестициям. Общественное сопротивление хранению, особенно на суше, также сыграло свою роль в некоторых случаях, особенно в Европе. Кроме того, CCUS часто относят к технологиям использования ископаемого топлива, которые конкурируют за государственные и частные инвестиции с возобновляемыми источниками энергии, хотя на практике использование данных технологий параллельно с возобновляемой энергетикой дает значительный синергетический эффект для достижения климатических целей [2].

Целью нашего исследования является обзор динамики и факторов развития технологий CCUS, а также анализ наиболее коммерчески перспективных направлений их промышленного применения в России. Информационной базой исследования послужили аналитические обзоры Международного энергетического агентства и база данных проектов CCUS Мирового института CCUS<sup>4</sup>. Исследование проведено методами литературного обзора, контент-анализа нормативно-правовой документации, дескриптивной статистики и кейс-стади.

## **Динамика и прогнозы развития технологий CCUS**

Улавливание, использование и хранение углерода относится к набору технологий, которые включают улавливание CO<sub>2</sub> из крупных точечных источников, таких как объекты по производству электроэнергии, промышленные объекты, использующие

<sup>2</sup> Clean Energy Innovation. URL: <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation>

<sup>3</sup> CCS Targeting Climate Change. URL: [https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/03/11204-GCC\\_GLOBAL2019-STATUS-REPORT\\_ES\\_PRINT\\_Digital-1.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/03/11204-GCC_GLOBAL2019-STATUS-REPORT_ES_PRINT_Digital-1.pdf)

<sup>4</sup> Global CSS Institute. URL: <https://co2re.co/FacilityData>

в качества топлива либо углеводороды или биомассу. Также CO<sub>2</sub> может улавливаться непосредственно из атмосферы. Если улавливаемый CO<sub>2</sub> не используется на месте, он подвергается компрессии и транспортировке посредством трубопровода, морского или наземного транспорта для последующего использования в различных областях или закачивается в глубокие геологические формации (включая истощенные запасы нефти и газа или солончаковые пласты) на постоянное хранение. Степень сокращения выбросов CO<sub>2</sub> в чистом выражении зависит от того, сколько CO<sub>2</sub> улавливается из точечного источника, а также как и каким образом используется CO<sub>2</sub> [3].

Использование CO<sub>2</sub> в промышленных целях может обеспечить потенциальный источник дохода для объектов CCUS. До настоящего времени коммерческая привлекательность подавляющего большинства проектов CCUS обеспечивалась доходами от продажи CO<sub>2</sub> нефтяным компаниям, которые использовали его для повышения коэффициента извлечения нефти. Однако в настоящее время уже имеются достаточно зрелые технологии применения CO<sub>2</sub> в качестве сырья для производства синтетического топлива, химикатов и строительных материалов<sup>5</sup>.

Технологии CCUS могут обеспечить удаление уже выброшенного CO<sub>2</sub> из атмосферы, то есть позволяют достичь отрицательных выбросов в качестве компенсации выбросов из секторов, где достижение нулевых выбросов может оказаться экономически или технически неосуществимым<sup>6</sup>. Биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода (BECCS) представляет собой улавливание и постоянное хранение CO<sub>2</sub>, произведенного в результате процессов, в ходе которых биомасса (которая извлекает CO<sub>2</sub> из атмосферы по мере роста) сжигается для выработки энергии. Электростанция, работающая на биомассе и оснащенная технологиями улавливания и хранения, является разновидностью технологии BECCS. Наиболее продвинутой из всего кластера технологии CCUS к настоящему времени является технология DAC, которая обеспечивает улавливание CO<sub>2</sub> непосредственно из окружающего воздуха (в отличие от точечного источника). Собранный таким образом CO<sub>2</sub> может быть в дальнейшем либо использован в качестве исходного сырья (например, в синтетическом топливе), либо его можно постоянно хранить для достижения отрицательных выбросов. Эти высокотехнологичные подходы к удалению углерода из атмосферы могут дополнять природные решения, такие как лесовосстановление<sup>7</sup>.

Первые проекты CCUS появились в США (1972, 1982 и 1986 гг.) на газовых месторождениях и биоэнергетических установках для того, чтобы использовать уловленный CO<sub>2</sub> для повышения коэффициента извлечения нефти на нефтяных

<sup>5</sup> CCUS Technology Innovation.

URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-technology-innovation>

<sup>6</sup> Direct Air Capture. A Key Technology for Net Zero.

URL: <https://www.iea.org/events/direct-air-capture-a-key-technology-for-net-zero>

<sup>7</sup> Experience Curves for Energy Technology Policy.

URL: <https://www.iea.org/reports/experience-curves-for-energy-technology-policy>

месторождениях (рис. 1). Первый крупномасштабный проект улавливания и закачки CO<sub>2</sub> со специализированным хранилищем CO<sub>2</sub> и мониторингом был введен в эксплуатацию на морском газовом месторождении Слейпнер в Норвегии в 1996 г., где в настоящее время в глубоком соленом водоносном горизонте накоплено более 20 млн т CO<sub>2</sub>. За последнее десятилетие объекты CCUS были введены в эксплуатацию в Австралии, Бразилии, Канаде, Китае, Саудовской Аравии и Объединенных Арабских Эмиратах<sup>8</sup>.

Однако несмотря на активизацию развития технологий CCUS в других странах, пока что США остаются неоспоримым лидером по их практическому использованию (рис. 2). Во многом это связано с наличием разветвленной сети трубопроводов, по которым может транспортироваться CO<sub>2</sub>, высоким спросом на углекислый газ, формируемым многочисленными нефтедобывающими компаниями в целях использования в технологиях повышения нефтеотдачи, а также программами государственного финансирования, в том числе введенными после глобального финансового кризиса 2008–2009 гг.<sup>9</sup>

Более жесткие климатические цели, заявленные в рамках Парижского соглашения по климату 2015 г., в частности, цели по недопущению роста среднегодовой температуры более чем на 1,5°C, способствовали росту интереса к вариантам смягчения последствий выбросов углекислого газа, которые выходят за рамки развития возобновляемых источников энергии, в том числе к технологиям CCUS<sup>10</sup>. Все большее число стран и организаций принимают целевые показатели по нулевым выбросам, закладывая в свои стратегии и дорожные карты развития энергетики необходимость применения CCUS. К августу 2020 г. 14 стран и Европейский союз, на долю которых приходится около 10% глобальных выбросов CO<sub>2</sub>, связанных с энергетикой, приняли официальные целевые показатели по нулевым выбросам в национальном законодательстве к 2045, 2050 гг. или на более поздний период<sup>11</sup>. Аналогичные целевые показатели обсуждаются примерно в 100 других странах. Из 16 национальных стратегий достижения климатических целей, представленных к августу 2020 г., в девяти упоминается важная роль CCUS. Это стратегии Канады, Франции, Германии, Японии, Мексики, Португалии, Сингапура, Великобритании и США<sup>12</sup>. В совокупности на эти страны приходится 96% от общего объема выбросов CO<sub>2</sub>, связанных с энергетикой, в странах, которые представили стратегии декарбонизации к 2050 г.

В сценарии устойчивого развития МЭА, согласно которому глобальные выбросы CO<sub>2</sub> в энергетическом секторе снизятся до нуля на чистой основе к 2070 г., на долю

<sup>8</sup>The Global Status of CCS 2019: Targeting Climate Change.

URL: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/globalstatus-report/>; CCUS in Clean Energy Transitions.

URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-technology-innovation>

<sup>9</sup>Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector. URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

<sup>10</sup>CCUS in Clean Energy Transitions. URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

<sup>11</sup>Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector. URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

<sup>12</sup>Там же.

CCUS приходится почти 15% совокупного сокращения выбросов по сравнению со сценарием заявленной политики<sup>15</sup>. Вклад CCUS растет с течением времени по мере совершенствования технологии, снижения затрат и исчерпания более дешевых вариантов борьбы с загрязнением в некоторых секторах. В 2070 г. во всем энергетическом секторе будет улавливаться 10,4 Гт CO<sub>2</sub> (табл. 1).

Первоначальное внимание к внедрению CCUS в данном сценарии сосредоточено на модернизации существующих электростанций и промышленных установок, работающих на ископаемом топливе, а также на более дешевых возможностях улавливания CO<sub>2</sub>, таких как производство водорода. Со временем акцент смещается на биоэнергетику с использованием улавливания и хранения (BECCS) и прямого улавливания воздуха (DAC) для удаления углерода и в качестве источника климатически нейтрального CO<sub>2</sub> для различных применений, особенно синтетического топлива.

Что касается использования накопленного CO<sub>2</sub>, то согласно сценарию устойчивого развития, более 90% всего углеводорода, улавливаемого в течение 2020–2070 гг. накапливается. Из используемого CO<sub>2</sub> около 95% используется в качестве сырья для производства синтетического топлива, в то время как остальная часть используется в химическом секторе.

Это представляет собой серьезное изменение в способах использования CO<sub>2</sub>. Сегодня большая часть улавливаемого и используемого CO<sub>2</sub> поступает на энергетические предприятия, где почти весь CO<sub>2</sub> хранится постоянно, или на предприятия химической промышленности, где CO<sub>2</sub> улавливается и используется в рамках того же процесса для производства удобрений и в конечном счете выбрасывается в атмосферу (рис. 3).

В период до 2030 г. использование CO<sub>2</sub> для производства синтетического топлива будет расширено на основе уже реализуемых проектов, таких как планируемый топливный проект Norsk-e в Норвегии. Это увеличивает использование CO<sub>2</sub> примерно на три четверти по сравнению с сегодняшним днем и позволит обеспечить более широкое использование синтетического топлива в авиации в долгосрочной перспективе.

Заметим, что вклад использования CO<sub>2</sub> в достижение чистого нулевого уровня выбросов в значительной степени зависит от источника CO<sub>2</sub>. К 2070 г. при производстве всего синтетического топлива будет использоваться CO<sub>2</sub>, получаемый из биоэнергетики или DAC, так что сжигание этих видов топлива будет углеродно нейтральным (использование CO<sub>2</sub>, улавливаемого из источников ископаемого топлива, все равно приведет к выбросам) (рис. 4).

<sup>15</sup> CCUS in Clean Energy Transitions. URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

В предыдущий период часть используемого CO<sub>2</sub> поступала из ископаемого топлива или с промышленных предприятий, что способствовало сокращению выбросов за счет уменьшения зависимости от прямого использования ископаемого топлива в транспортном и промышленном секторах.

### **Наиболее перспективные сектора применения технологий CCUS**

Тяжелая промышленность и транспорт на большие расстояния сегодня выделяют около 30% от общего объема выбросов. Согласно сценарию устойчивого развития, выбросы в этих секторах должны сократиться почти на 90% и составить примерно 1,5 Гт к 2070 г. Достижение этих сокращений требует широкого внедрения технологий CCUS. К 2070 г. в сталелитейном, цементном и химическом секторах должно будет улавливаться около 2,7 Гт CO<sub>2</sub>, а в авиационном секторе потребляться около 5 млн барр. синтетического топлива в сутки с использованием около 0,8 Гт улавливаемого CO<sub>2</sub>.

Большегрузные автоперевозки, судоходство и авиация являются одними из наиболее трудно поддающихся обезуглероживанию секторов мировой экономики [4, 5]. Электрификация грузовых автомобилей и прямое использование водорода и аммиака на судах являются одними из основных технологических альтернатив использованию биотоплива (объемы производства которого ограничены наличием земель для выращивания сельскохозяйственных культур в энергетических целях) и синтетических видов топлива. Электрификация авиаперелетов на большие расстояния пока что является развивающейся технологией, сдерживаемой рядом технических ограничений. Например, электрифицированному пассажирскому коммерческому самолету, способному летать на расстояния 750–1 100 км, требуются элементы питания с энергетической плотностью 800 Втч/кг, что более чем в три раза превышает текущие характеристики литий-ионных аккумуляторов [6, 7].

Технологии CCUS могут способствовать декарбонизации транспорта на большие расстояния, накапливая CO<sub>2</sub> в качестве источника для синтетического углеводородного топлива. Улавливаемый CO<sub>2</sub> может быть использован для преобразования низкоуглеродистого водорода в синтетическое углеводородное топливо (дизельное топливо, бензин и керосин), которое легче хранить, транспортировать и использовать, но при этом выбросы CO<sub>2</sub> в течение жизненного цикла потенциально ниже, чем у обычного ископаемого топлива. Однако производство синтетических углеводородов является энергоемким и требует большого количества водорода, что делает их относительно дорогими [8, 9]. Поскольку ограничения на выбросы CO<sub>2</sub> со временем возрастают, исходный CO<sub>2</sub> все чаще приходится получать из биомассы или воздуха (технология DAC).

В тяжелой промышленности технологии CCUS могут применяться непосредственно на производственных объектах (в промышленных процессах) и на энергетических объектах. Как правило, выбросы в промышленных процессах, основанных на

химических реакциях (например, в производстве определенных сыпучих материалов) практически невозможно сократить без улавливания CO<sub>2</sub>. Ярким примером здесь является производство клинкера – ключевого активного ингредиента цемента. Технологические выбросы составляют около двух третей выбросов в цементной печи. Даже если бы печь, в которой он производится, была электрифицирована или работала на биоэнергетическом топливе, эти выбросы сохранялись бы. Альтернативные связующие материалы, которые могли бы заменить цемент в строительстве (например, оксид магния, полученный из силикатов магния), сегодня все еще находятся в стадии исследований и разработок (R&D).

На данный момент также существуют ограниченные альтернативы CCUS для сокращения выбросов при производстве стали и химикатов [10, 11]. Технологии CCUS в сталелитейном и химическом секторах также, как правило, находятся на более высоком уровне технологической зрелости, чем их альтернативы на основе водорода. Способ производства стали с прямым восстановлением железа на основе водорода (DRI), который существенно сокращает выбросы, может стать экономически жизнеспособной альтернативой установкам, оснащенным CCUS, но, вероятно, только в регионах, имеющих доступ к очень недорогой возобновляемой электроэнергии для производства водорода путем электролиза воды. Основываясь на текущих оценках средних производственных затрат для промышленных предприятий, производство одной тонны стали с помощью технологии DRI, оснащенного CCUS, и инновационных процессов восстановления плавки, как правило, на 8–9% дороже, чем при использовании современных основных способов коммерческого производства, но использование метода DRI на основе водорода обычно повышает затраты примерно на 35–70% [12, 13]. Аналогичная проблема наблюдается в химическом секторе. Водород, полученный посредством электролиза и используемый в качестве сырья для производства аммиака и метанола, мог бы стать важной альтернативой CCUS, но сегодня в большинстве регионов это обходится дороже, чем применение CCUS на существующих или новых установках. Стоимость производств аммиака и метанола, оснащенных CCUS, как правило, примерно на 20–40% выше, чем у их аналогов, не требующих снижения затрат, в то время как стоимость электролитических водородных установок на 50–115% выше [10].

В настоящее время производство водорода из природного газа с использованием процессов риформинга и из угля с использованием газификации являются хорошо зарекомендовавшими себя технологиями. В случае использования природного газа паровой риформинг метана (SMR) является ведущим способом производства на сегодняшний день, при этом часть природного газа (30–40%) используется в качестве топлива для производства пара, образуя «разбавленный» поток CO<sub>2</sub>, в то время как остальная его часть расщепляется с помощью пара в водород и более концентрированный «перерабатываемый» CO<sub>2</sub>. Концентрация CO<sub>2</sub> в выходных

потоках влияет на затраты на улавливание. Улавливание CO<sub>2</sub> из концентрированного «технологического» потока обходится примерно в 50 долл. США за тонну, что приводит к общему сокращению выбросов на 60%. Также CO<sub>2</sub> может улавливаться из потока более разбавленного газа. Это может повысить уровень общего сокращения выбросов до 90% и более, но также увеличивает затраты примерно до 80 долл США за тонну CO<sub>2</sub> на коммерческих водородных установках<sup>14</sup> [10].

Несколько проектов SMR CCUS в настоящее время находятся на стадии технико-экономического обоснования, и предполагается, что они будут введены в эксплуатацию к 2030 г., особенно в густонаселенных промышленных зонах. К ним относятся проект H-Vision, целью которого является модернизация улавливания CO<sub>2</sub> для промышленного использования в Роттердаме, и проект Magnum в Нидерландах, который может создать спрос для каждой из трех газовых электростанций<sup>15</sup>.

Автотермический риформинг (ATR) – это альтернативная технология, при которой необходимое количество тепла вырабатывается в самом процессе. Это означает, что весь CO<sub>2</sub> образуется внутри реактора, что обеспечивает более высокие скорости извлечения CO<sub>2</sub>, чем могут быть достигнуты с помощью SMR. Также ATR может быть дешевле SMR, поскольку выбросы более концентрированные. Значительная доля мирового производства аммиака и метанола уже использует технологию ATR, и два новых проекта в Великобритании – HyNet и H21 – планируют также использовать эту технологию [11].

Существуют и другие варианты использования природного газа для производства водорода, но они все еще находятся на лабораторной или демонстрационной стадии. В альтернативной конструкции SMR в качестве сырья по-прежнему потребовался бы природный газ, но необходимый пар можно было бы получать из альтернативных источников, таких как электричество или концентрированная солнечная энергия, что позволило бы исключить разбавленный поток CO<sub>2</sub> при выработке тепла в традиционных конструкциях SMR. Пиролиз метана (или расщепление) – еще одна развивающаяся технология. Он включает расщепление метана при высоких температурах, например, в плазме, генерируемой электричеством, с получением водорода и твердого углерода, но без CO<sub>2</sub>. Полученный углерод потенциально может быть использован в качестве сырья в химической, сталелитейной или алюминиевой промышленности, обеспечивая еще один источник дохода, помимо водорода [4]. В США компания Monolith Materials эксплуатирует пилотную установку пиролиза метана в Калифорнии и коммерческую демонстрационную установку в Небраске. В Австралии строится коммерческая демонстрационная установка Hazel производительностью 100 т H<sub>2</sub> в год, которая будет использовать биогаз для производства водорода и графита<sup>16</sup>.

<sup>14</sup> CCUS in Clean Energy Transitions. URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

<sup>15</sup> Там же.

<sup>16</sup> Там же.

Газификация угля – это зрелая технология, используемая главным образом в химической промышленности для производства аммиака, в частности в Китае. Газификацию угля можно комбинировать с CCUS, хотя существуют технические проблемы. В частности, есть немного технологий, которые позволяют получать как водород высокой чистоты, так и CO<sub>2</sub>, достаточно чистый для других целей или хранения, поскольку технологии разделения газов направлены либо на удаление водорода, либо на удаление CO<sub>2</sub>. Таким образом, выбор и конструкция технологии улавливания зависят от того, для чего будет использоваться водород, а также от производственных затрат. В Австралии планируемый проект цепочки поставок водородной энергии в Латроб-Вэлли направлен на производство водорода из бурого угля с использованием газификации, при этом CO<sub>2</sub> транспортируется и хранится с помощью проекта CarbonNet [4].

Производство водорода из ископаемого топлива с помощью CCUS, вероятно, останется самым экономически доступным низкоуглеродистым способом в регионах с дешевыми местным углем, природным газом и доступными хранилищами CO<sub>2</sub>, таких как Ближний Восток, Северная Африка, Россия и США.

### **Перспективы применения технологий CCUS в России**

Анализируя стратегические планы развития различных отраслей экономики в РФ, нетрудно заметить, что наиболее реалистичные перспективы масштабного применения технологий CCUS в нашей стране напрямую связаны с планами развития водородной энергетики. С октября 2020 г. Правительство РФ предпринимает активные меры по формированию в стране высокопроизводительной экспортно ориентированной области водородной энергетики для удержания лидирующих позиций на мировом энергетическом рынке и обеспечения конкурентоспособности экономики страны в условиях глобального энергетического перехода. По оценкам Минэнерго России, потенциальные объемы экспорта водорода из Российской Федерации на мировой рынок могут составить до 0,2 млн т в 2024 г., от 2 до 12 млн т к 2035 г. и 15–50 млн т к 2050 г. в зависимости от темпов развития мировой низкоуглеродной экономики и роста спроса на водород на мировом рынке [14].

Однако мировое сообщество предъявляет высокие требования к условиям производства водорода; развитые страны ставят высокие барьеры входа на мировой рынок водорода, используя классификацию «коричневый» – «голубой» – «красный» – «зеленый» в зависимости от того, использовались ли при производстве водорода ископаемые топлива, низкоуглеродная энергетика (например, атомная) или возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

За последние годы в России было сформировано и заявлено о 54 водородных проектах. В настоящее время эти проекты находятся на различных стадиях разработки, начиная от стадий раннего планирования и заканчивая уже действующими. Все проекты разбиты на пять географических кластеров: Сахалин

(проект Росатома по доставке «голубого» водорода морским путем в Китай), Якутия (проект Северо-Восточного Альянса по доставке «голубого» водорода в Китай по железной дороге), Ямал (проект НОВАТЭКа по экспорту «голубого» водорода морским путем в Германию), Восточная Сибирь (поставки «зеленого» водорода Еп+ в Китай по железной дороге) и Северо-Западный (проекты «зеленого» водорода). От заявленных проектов 53% относятся к категории «зеленых», то есть производство водорода планируется осуществлять на основе технологии электролиза воды и использования ВИЭ [14]. В почти 15% проектов планируется использование технологий производства водорода из углеводородных источников с использованием технологий улавливания CO<sub>2</sub> (табл. 2).

По нашему мнению, реализация заявленных водородных проектов придаст необходимый импульс дальнейшему развитию технологий CCUS в России и даст возможность достичь эффектов масштаба производства и эффектов обучения в производстве, которые, со временем, приведут к снижению себестоимости самой технологии [15]. Снижение себестоимости и накопление необходимых технических компетенций позволит в будущем расширить применение технологий CCUS в тяжелой промышленности и в транспортном секторе, обеспечит достижение климатических целей России.

## **Выводы**

Проведенный анализ динамики и факторов развития технологий улавливания, использования и хранения диоксида углерода показал, что данной группе технологий отводится особая роль в достижении целей декарбонизации мировой экономики к середине XXI в. Главными драйверами развития технологий CCUS за рубежом являются технические ограничения на снижение выбросов CO<sub>2</sub> в промышленном и транспортном секторах другими способами. В России основным фактором, стимулирующим развитие технологий CCUS является государственный план развития экспортно ориентированного производства «чистого» водорода. Основными барьерами развития технологий CCUS в мире являются нестабильность национальных политик ведущих стран в сфере ограничений на выбросы CO<sub>2</sub>. Основными барьерами в России являются санкционные ограничения, наложенные на энергетический сектор страны, и снижающие темпы роста водородной энергетики как за счет сокращения доступа к зарубежным инновационным разработкам, так и за счет увеличения барьеров выхода на международные рынки инновационных энергетических продуктов РФ.

В данных условиях сохранение темпов развития водородной энергетики в России и частичная переориентация производства на внутренний рынок и рынки азиатских стран являются жизненно важными условиями для дальнейшего развития технологий CCUS и их последующего распространения на углеродоемкие сектора экономики РФ.

**Таблица 1****Ключевые глобальные показатели развития CCUS в сценарии устойчивого развития МЭА****Table 1****Key global indicators of CCUS development in the IEA Sustainable Development scenario**

Показатель	2030 г.	2050 г.	2070 г.	Всего
<b>Общий объем улавливания CO<sub>2</sub>, млн т</b>				
Улавливание CO <sub>2</sub> , всего	840	5 635	10 409	240 255
В том числе:				
– из угля	320	1 709	2 145	64 399
– из нефти	21	141	230	5 301
– из природного газа	96	1 733	3 209	72 948
– из биомассы	81	955	3 010	52 257
– в результате промышленных процессов	312	979	1 073	36 562
– прямой захват воздуха	11	117	741	8 788
– хранятся	650	5 266	9 533	220 845
– используются	189	369	877	19 409
<b>Улавливание CO<sub>2</sub> по секторам, млн т</b>				
Промышленность	453	2 038	2 724	77 092
Железо и сталь	16	394	723	15 772
Химикаты	178	461	571	18 363
Цемент	258	1 174	1 411	42 614
Целлюлозно-бумажная промышленность	0	8	18	343
Выработка электроэнергии, всего	223	1 877	4 050	87 529
В том числе:				
– из угля	201	895	1 031	34 378
– из природного газа	21	605	1 175	26 942
– из биомассы	0	377	1 844	26 209
Другое преобразование топлива	153	1 603	2 895	66 846
В том числе:				
– удаление CO <sub>2</sub> , всего	76	821	2 920	47 739
– биоэнергетика с улавливанием и хранением CO <sub>2</sub> (BECCS)	75	802	2 649	45 000
– прямой захват воздуха с хранением CO <sub>2</sub> (DACs)	1	19	271	2 739
<b>Вклад CCUS в сокращение выбросов CO<sub>2</sub> в секторе, %</b>				
Железо и сталь	4	25	31	25
Цемент	47	63	61	61
Химикаты	10	31	33	28
Преобразование топлива	86	86	92	90
Выработка электроэнергии	9	13	25	15

Источник: CCUS in Clean Energy Transitions.

URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

Source: CCUS in Clean Energy Transitions.

URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

**Таблица 2****Характеристики водородных проектов с использованием технологий улавливания CO<sub>2</sub>****Table 2****Characteristics of hydrogen projects using CO<sub>2</sub> capture technologies**

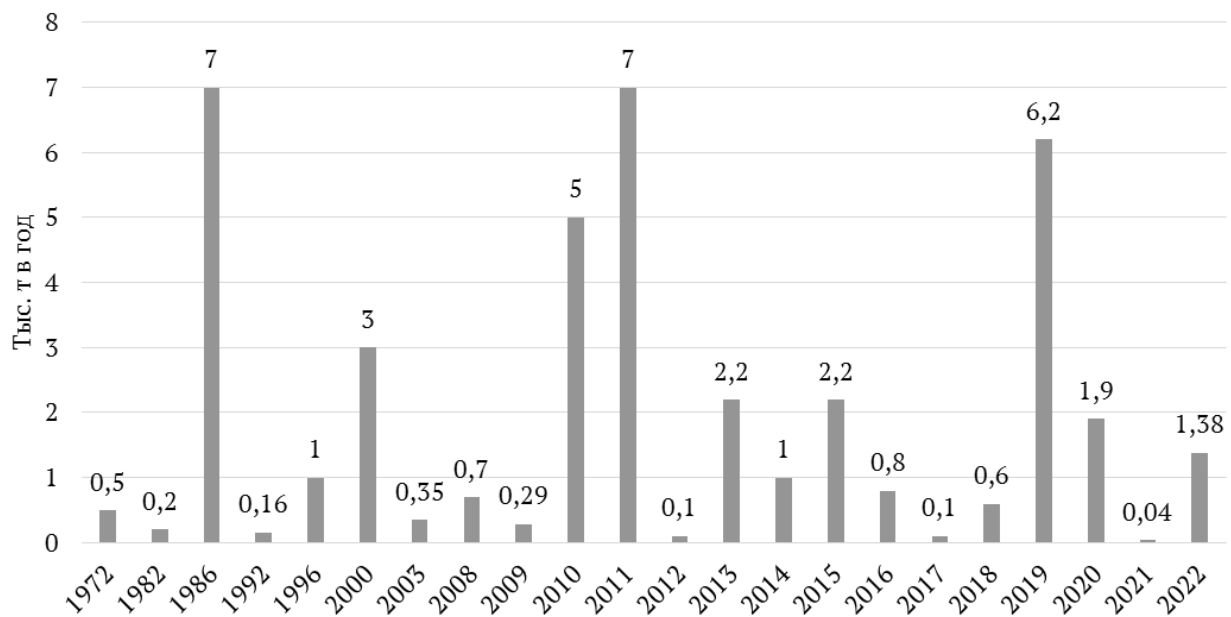
Проект	Регион	Участники	Срок реализации	Прогнозируемый объем производства
Производство «голубого» водорода / аммиака методом паровой конверсии метана с улавливанием CO <sub>2</sub> на газохимических предприятиях Ленинградской области	Ленинградская область	Агентство экономического развития Ленинградской области	2023 г.	1 000
Производство «голубого» водорода / аммиака методом паровой конверсии метана с улавливанием CO <sub>2</sub>	Сахалинская область	Росатом, Air Liquide	2024 г.	30 000
Производство «голубого» аммиака методом паровой конверсии метана с улавливанием CO <sub>2</sub>	Саратовская область	СПК «Горный»	2026 г.	...
Комплекс переработки природного газа с производством водорода, аммиака и другой низкоуглеродной продукции с применением технологий улавливания и долговременного подземного хранения CO <sub>2</sub>	Ямало-Ненецкий автономный округ	НОВАТЭК	2027 г.	...
Производство «голубого» аммиака методом паровой конверсии метана с применением технологий улавливания и долговременного подземного хранения CO <sub>2</sub>	Ямало-Ненецкий автономный округ	Фонд «Энергия», TOYO Engineering Corporation, ITOCHU Plantech Inc	2025 г.	...
Производство «голубого» аммиака методом паровой конверсии метана с применением технологий улавливания и долговременного подземного хранения CO <sub>2</sub>	Ямало-Ненецкий автономный округ	Фонд «Энергия», TOYO Engineering Corporation, ITOCHU Plantech Inc	2026 г.	...
Производства «голубого» аммиака путем газификации бурого угля с применением технологии улавливания и захоронения CO <sub>2</sub>	Красноярский край	СУЭК	2027 г.	...
Производство «голубого» аммиака на базе газовых месторождений с применением технологий улавливания CO <sub>2</sub>	Республика Саха (Якутия)	АКБ «Северо-Восточный Альянс», газодобывающие компании Западной Якутии	2026 г. – 1-й этап, 2030 г. – 2-й этап	...

*Источник:* авторская разработка

*Source:* Authoring

**Рисунок 1**  
Динамика ввода в эксплуатацию мощностей CCUS

**Figure 1**  
Dynamics of CCUS capacity commissioning

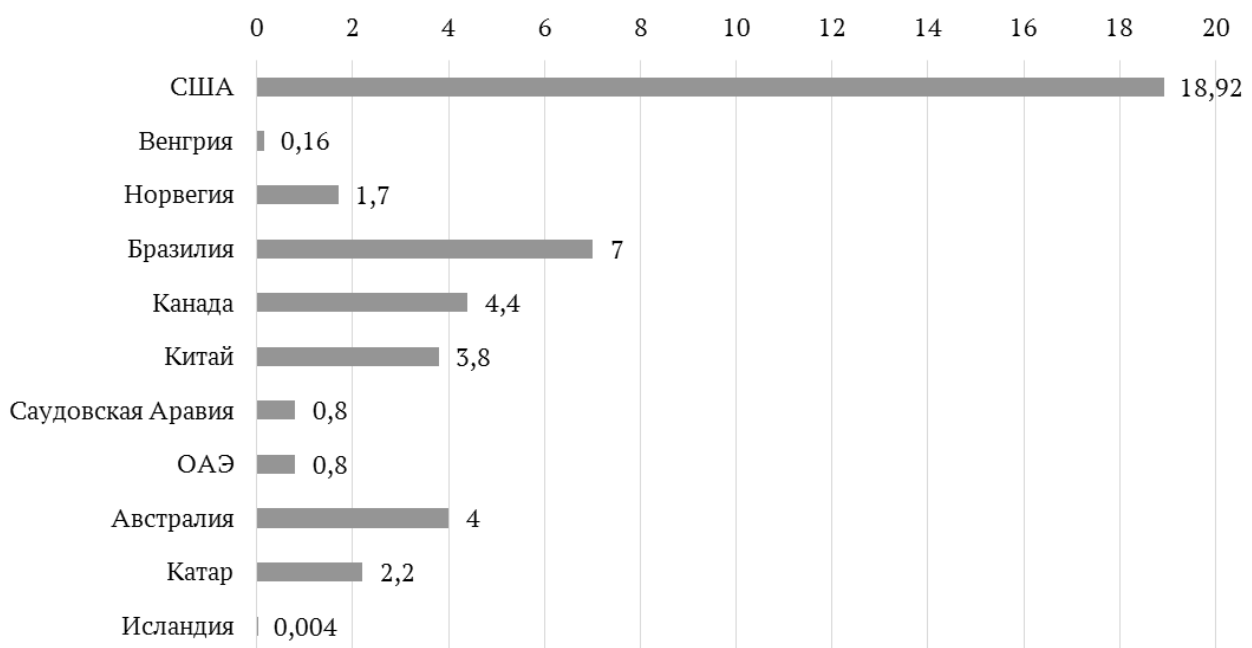


Источник: Global CSS Institute. URL: <https://co2re.co/FacilityData>

Source: Global CSS Institute. URL: <https://co2re.co/FacilityData>

**Рисунок 2**  
Объем мощностей CCUS по странам на 2022 г.

**Figure 2**  
CCUS capacity by country for 2022



Источник: Global CSS Institute. URL: <https://co2re.co/FacilityData>

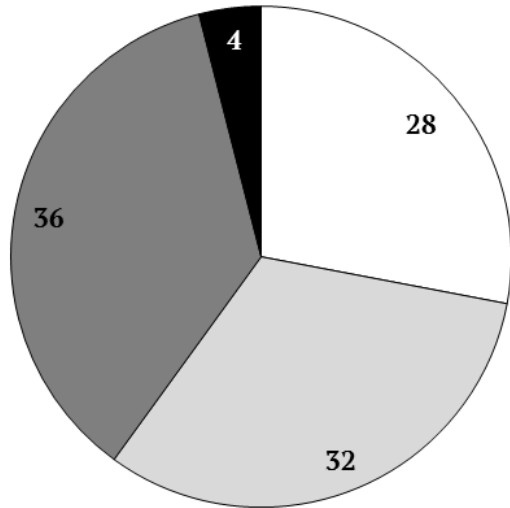
Source: Global CSS Institute. URL: <https://co2re.co/FacilityData>

**Рисунок 3**

**Прогноз использования улавливаемого CO<sub>2</sub> согласно сценарию устойчивого развития МЭА по секторам экономики, %**

**Figure 3**

**Forecast of the use of captured CO<sub>2</sub> according to the IEA Sustainable Development scenario by economic sector, percentage**



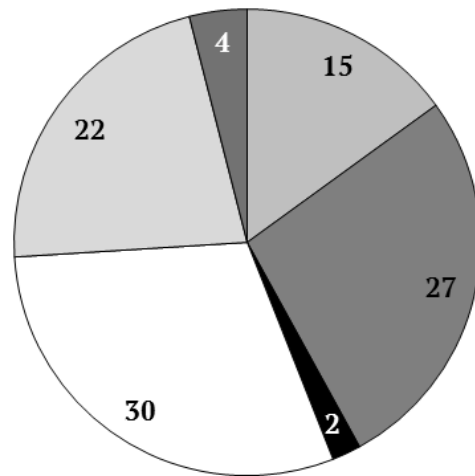
- Преобразование топлива    □ Промышленность
- Выработка электроэнергии    ■ Прямой захват воздуха

*Источник:* CCUS in Clean Energy Transitions.

*URL:* <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

*Source:* CCUS in Clean Energy Transitions.

*URL:* <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

**Рисунок 4****Прогноз получения CO<sub>2</sub> согласно сценарию устойчивого развития МЭА по источнику, %****Figure 4****Forecast of CO<sub>2</sub> production according to the IEA Sustainable Development scenario by source, percentage**

- |                                   |                            |
|-----------------------------------|----------------------------|
| ▣ Выбросы в процессе производства | ▣ Уголь                    |
| ▀ Нефть                           | □ Природный газ            |
| ▣ Биомасса                        | ▣ Прямой захват из воздуха |

Источник: CCUS in Clean Energy Transitions.

URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

Source: CCUS in Clean Energy Transitions.

URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

**Список литературы**

1. Nan Wang, Keigo Akimoto, Nemet G.F. What went wrong? Learning from three decades of carbon capture, utilization and sequestration (CCUS) pilot and demonstration projects. *Energy Policy*, 2021, vol. 158, no. 112546. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112546>
2. Ozkan M., Saswat Priyadarshi Nayak, Ruiz A.D., Wenmei Jiang. Current status and pillars of direct air capture technologies. *iScience*, 2022, vol. 25, iss. 4. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103990>
3. Loria P., Bright M.B.H. Lessons captured from 50 years of CCS projects. *The Electricity Journal*, 2021, vol. 34, iss. 7. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106998>
4. Fasihi M., Efimova O., Breyer C. Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 224, pp. 957–980. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>

5. *Fuss S., Lamb W.F., Callaghan M.W. et al.* Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, iss. 6. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
6. *Ratner S.V., Chepurko Yu., Nguen Hoang Hien.* Prospects of Transition of Air Transportation to Clean Fuels: Economic and Environmental Management Aspects. *International Energy Journal*, 2019, vol. 19, iss. 3, pp. 125–138. URL: <http://www.ericjournal.ait.ac.th/index.php/eric/article/view/2084>
7. *Schäfer A., Barrett S.R.H., Doyme Khan et al.* Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. *Nature Energy*, 2019, vol. 4, pp. 160–166. URL: <https://hdl.handle.net/1721.1/126682>
8. *Minx J.C., Lamb W.F., Callaghan M.W. et al.* Negative emissions – Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, iss. 6. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>
9. *Nemet G.F., Callaghan M.W., Creutzig F. et al.* Negative emissions – Part 3: Innovation and upscaling. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, iss. 6. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabff4>
10. *Филиппов С.П.* Экономические характеристики технологий улавливания и захоронения диоксида углерода (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2022. № 10. С. 17–31. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=tepen&y=2022&v=0&n=10&a=ТепEn2210002Filippov>
11. *Филиппов С.П., Жданеев О.В.* Возможности использования технологий улавливания и захоронения диоксида углерода при декарбонизации мировой экономики (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2022. № 9. С. 5–21. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=tepen&y=2022&v=0&n=9&a=ТепEn2209001Filippov>
12. *Салаватов Т.Ш., Байрамова А.С.К., Воробьев К.А.* Использование диоксида углерода в качестве химического сырья // *Вестник Евразийской науки*. 2021. Т. 13. № 2. URL: <https://esj.today/PDF/03NZVN221.pdf>
13. *Зайченко В.М., Штеренберг В.Я.* Улавливание CO<sub>2</sub> на тепловых электростанциях как одно из главных направлений борьбы за снижение антропогенных выбросов диоксида углерода // *Теплоэнергетика*. 2019. № 6. С. 75–85.
14. *Gomonov K., Reshetnikova M., Ratner S.* Economic Analysis of Recently Announced Green Hydrogen Projects in Russia: A Multiple Case Study. *Energies*, 2023, vol. 16, iss. 10. URL: <https://doi.org/10.3390/en16104023>
15. *Ratner S., Khrustalev E.* Learning Rates in Wind Energy: Cross-countries Analysis and Policy Applications for Russia. *International Journal of Energy Economics and*

*Policy*, 2018, vol. 8, iss. 3, pp. 258–266.

URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/6234/3727>

### **Информация о конфликте интересов**

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

## ANALYSIS OF TRENDS AND DEVELOPMENT FACTORS OF CARBON CAPTURE AND STORAGE TECHNOLOGIES IN RUSSIA AND ABROAD

Svetlana V. RATNER <sup>a,\*</sup>,

Anastasiya V. SINEL'NIKOVA <sup>b</sup>

<sup>a</sup> V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation  
lanaratner@ipu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3485-5595>

<sup>b</sup> Kuban State University (KubSU),  
Krasnodar, Russian Federation  
sinelnikova\_nast@mail.ru  
ORCID: not available

\* Corresponding author

### Article history:

Article No. 353/2023  
Received 31 July 2023  
Received in revised form  
10 August 2023  
Accepted 21 August 2023  
Available online  
28 September 2023

**JEL classification:** O32,  
Q20, Q42, Q55

**Keywords:** energy transition, decarbonization, carbon dioxide capture and storage, low-carbon hydrogen

### Abstract

**Subject.** The article deals with hydrogen and carbon capture, use and storage technologies (CCUS). Without them it is impossible to achieve the goals of decarbonization of the world economy in 2050. However, currently, the speed of CCUS technologies development is significantly lower than previously expected.

**Objectives.** The study aims to review the dynamics and factors of CCUS technologies development and analyze the most commercially promising areas of their industrial application in Russia.

**Methods.** The study draws on methods of literature review, content analysis of regulatory documentation, descriptive statistics, and case study. The analytical reviews of the International Energy Agency and the CCUS project database of the Global CCS Institute served as the information base of the paper.

**Results.** Currently, the U.S. remains the leader in the practical use of CCUS technologies due to extensive network of pipelines, through which CO<sub>2</sub> can be transported, high demand for carbon dioxide generated by numerous oil producing companies for use in enhanced oil recovery technologies, and government financing programs, including those introduced after the global financial crisis of 2008–2009. The most promising areas of CCUS technologies implementation are energy, heavy industry, long-distance transportation, and low-carbon hydrogen production.

**Conclusions.** In the world, the main barriers to CCUS technologies development are the instability of national policies of the leading countries in the field of restrictions on CO<sub>2</sub> emission. In Russia, these barriers are sanction restrictions on the country's energy sector, declining growth rates of hydrogen energy due to reduced access to foreign innovative developments, and increased barriers to entry into international markets of innovative energy products of the Russian Federation.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2023

**Please cite this article as:** Ratner S.V., Sinel'nikova A.V. Analysis of Trends and Development Factors of Carbon Capture and Storage Technologies in Russia and Abroad. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2023, vol. 22, iss. 9, pp. 1725–1745.  
<https://doi.org/10.24891/ea.22.9.1725>

## References

1. Nan Wang, Keigo Akimoto, Nemet G.F. What went wrong? Learning from three decades of carbon capture, utilization and sequestration (CCUS) pilot and demonstration projects. *Energy Policy*, 2021, vol. 158, no. 112546.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112546>
2. Ozkan M., Saswat Priyadarshi Nayak, Ruiz A.D., Wenmei Jiang. Current status and pillars of direct air capture technologies. *iScience*, 2022, vol. 25, iss. 4.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103990>
3. Loria P., Bright M.B.H. Lessons captured from 50 years of CCS projects. *The Electricity Journal*, 2021, vol. 34, iss. 7.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106998>
4. Fasihi M., Efimova O., Breyer C. Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 224, pp. 957–980.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>
5. Fuss S., Lamb W.F., Callaghan M.W. et al. Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, iss. 6.  
URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
6. Ratner S.V., Chepurko Yu., Nguen Hoang Hien. Prospects of Transition of Air Transportation to Clean Fuels: Economic and Environmental Management Aspects. *International Energy Journal*, 2019, vol. 19, iss. 3, pp. 125–138.  
URL: <http://www.ericjournal.ait.ac.th/index.php/eric/article/view/2084>
7. Schäfer A., Barrett S.R.H., Doyme Khan et al. Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. *Nature Energy*, 2019, vol. 4, pp. 160–166. URL: <https://hdl.handle.net/1721.1/126682>
8. Minx J.C., Lamb W.F., Callaghan M.W. et al. Negative emissions – Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, iss. 6.  
URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>
9. Nemet G.F., Callaghan M.W., Creutzig F. et al. Negative emissions – Part 3: Innovation and upscaling. *Environmental Research Letters*, 2018, vol. 13, iss. 6.  
URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabff4>
10. Filippov S.P. [The economics of carbon dioxide capture and storage technologies (review)]. *Teploenergetika*, 2022, no. 10, pp. 17–31.  
URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=tepen&y=2022&v=0&n=10&a=TepEn2210002Filippov> (In Russ.)

11. Filippov S.P., Zhdaneev O.V. [Opportunities for the application of carbon dioxide capture and storage technologies in case of global economy decarbonization (review)]. *Teploenergetika*, 2022, no. 9, pp. 5–21. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=tepen&y=2022&v=0&n=9&a=TepEn2209001Filippov> (In Russ.)
12. Salavatov T.Sh., Bairamova A.S.K., Vorob'ev K.A. [Using carbon dioxide as a chemical raw material]. *Vestnik Evraziiskoi Nauki*, 2021, vol. 13, no. 2. (In Russ.) URL: <https://esj.today/PDF/03NZVN221.pdf>
13. Zaichenko V.M., Shterenberg V.Ya. [Capture of CO<sub>2</sub> at thermal power stations as one of the main trends towards reducing anthropogenic carbon dioxide emissions]. *Teploenergetika*, 2019, no. 6, pp. 75–85. (In Russ.)
14. Gomonov K., Reshetnikova M., Ratner S. Economic Analysis of Recently Announced Green Hydrogen Projects in Russia: A Multiple Case Study. *Energies*, 2023, vol. 16, iss. 10. URL: <https://doi.org/10.3390/en16104023>
15. Ratner S., Khrustalev E. Learning Rates in Wind Energy: Cross-countries Analysis and Policy Applications for Russia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2018, vol. 8, iss. 3, pp. 258–266. URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/6234/3727>

### **Conflict-of-interest notification**

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.