

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
«ЦЕНТР ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ»

На правах рукописи

Череповицына Алина Александровна

**Декарбонизация промышленных систем:
экономика улавливания и хранения углекислого газа**

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика
(экономика природопользования и землеустройства)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора экономических наук

Научный консультант:
доктор экономических наук
Скобелев Дмитрий Олегович

Апатиты – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ И ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ	25
1.1 Проблема декарбонизации промышленных систем в контексте устойчивого и низкоуглеродного развития: теоретический аспект	25
1.2 Декарбонизация промышленных систем: подходы к управлению выбросами ПГ и основы терминологической систематики.....	44
1.3 Направления и существенные вопросы декарбонизации мировой и российской промышленности.....	55
1.4 Стратегические аспекты декарбонизации промышленных компаний.....	66
1.4.1 Стратегии декарбонизации и низкоуглеродная трансформация промышленных компаний (на примере нефтегазовых)	67
1.4.2 Стратегическое развитие российских нефтегазовых компаний в условиях декарбонизации: вклад в ЦУР ООН, цели по снижению выбросов ПГ и фактический прогресс.....	80
1.4.2.1 Анализ вклада российских нефтегазовых компаний в достижение ЦУР 7 и ЦУР 13	82
1.4.2.2 Анализ климатических целей российских нефтегазовых компаний по адаптированной методике SMART	86
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	88
ГЛАВА 2. СУЩНОСТЬ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ УЛАВЛИВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА .	94
2.1 Декарбонизационная деятельность промышленных компаний: систематизация опций, роль и место УХУ (на примере нефтегазовых).....	94
2.2 Сущность и типология технологических цепочек УХУ	106
2.3 Реализация УХУ в промышленности: мировой опыт, проблемы управления и роль в достижении углеродной нейтральности	114
2.4 Государственное регулирование и институты поддержки УХУ: мир и Россия	128
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	139
ГЛАВА 3. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК УХУ	143
3.1 Технико-экономическое обобщение теоретических и практических знаний по улавливанию и хранению углерода.....	143
3.2 Проекты УХУ: организационные формы и договорные отношения.....	155
3.3 Подходы к оценке затрат на УХУ	162
3.4 Система факторов, определяющая уровень затрат на УХУ, и базовые организационные составляющие различных форм	177
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	185
ГЛАВА 4. КОНСТРУКЦИИ УХУ И КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ВИДЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК В РОССИИ	188
4.1 Конструкции технологических цепочек УХУ.....	188
4.2 Трансформация конструкции УХУ и их применимость в России.....	200

4.3 Стратегические факторы, определяющие развитие УХУ в России.....	209
4.4 Концептуальное представление развития УХУ в условиях России	219
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	230
ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ УХУ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В РОССИИ	233
5.1 Оценка затрат на внедрение технологии улавливания углекислого газа на угольной ТЭЦ (на примере Апатитской ТЭЦ в Мурманской области)	233
5.2 Экономическое обоснование формирования межотраслевой технологической цепочки УХУ с использованием CO ₂ для повышения нефтеотдачи	243
5.3 Предложения по обеспечению экономической жизнеспособности УХУ в России	252
5.4 Рекомендации по развитию мер государственного регулирования, планированию и внедрению технологических цепочек УХУ в России	258
5.4.1 Рекомендации по развитию мер государственного регулирования	259
5.4.2 Рекомендации по планированию и внедрению технологических цепочек УХУ в России	267
5.4.3 Развитие УХУ: широкий контекст	272
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5	274
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	277
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	285

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Проблема глобального изменения климата становится все более актуальной и требует принятия комплекса мер по ее решению. В сложившихся условиях энергетика и промышленность, ответственные за существенную часть выбросов парниковых газов (ПГ) (порядка 32 % для электричества и тепла и 7 % для промышленных процессов по миру соответственно)¹, сталкиваются с новыми вызовами. Компании все больше смещают свой фокус в сторону устойчивого развития, а также движения к углеродной нейтральности и декарбонизации деятельности в условиях усиливающихся трендов экологизации экономики, что требует существенных изменений на стратегическом и операционных уровнях.

В науке и практике рассматриваются разные направления декарбонизации глобальной и российской промышленности, включая энергетику. На мировом уровне особая роль в снижении выбросов ПГ отводится внедрению возобновляемых источников энергии (ВИЭ), мерам повышения энергоэффективности, ускорению электрификации и сокращению выбросов метана при использовании ископаемого топлива². В России признается, что в контексте климатической проблемы принципиальное значение для развития экономики имеют вопросы ее энергоэффективности^{3,4}, однако ограниченный потенциал повышения последней предопределяет в ближайшем будущем необходимость ориентации и на другие направления, такие как переход на неископаемые виды топлива и сырья, биомассу и водород, а также внедрение технологий улавливания, хранения и использования углекислого газа (CO₂)

¹ World Greenhouse Gas Emissions in 2020 // World Resource Institute. – 2020. – URL: <https://files.wri.org/d8/s3fs-public/2023-10/ghg-emissions-2020.png> (дата обращения: 14.03.2024).

² World Energy Outlook 2023. Executive Summary // IEA. – 2023. – 353 p. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-cdf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (дата обращения: 01.08.2024).

³ Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 г. № 3052-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 08.11.2021 г.

⁴ Колпаков А. Ю. Энергоэффективность: роль в сдерживании выбросов углекислого газа и определяющие факторы // Проблемы прогнозирования. – 2020. – № 6. – С. 141–153. – DOI: 10.47711/0868-6351-183-141-153.

(далее – улавливание и хранение углерода, УХУ; англ. CCUS – Carbon Capture, Utilization and Storage). Самыми «дешевыми» мерами снижения выбросов ПГ в России могут оказаться проекты в области сохранения и повышения поглощающей способности лесов и в сфере жилищно-коммунального хозяйства, а также снижение фугитивных выбросов, а самыми «дорогими» – реализация проектов в области управления отходами и внедрение технологий УХУ⁵. Вместе с тем, последние рассматриваются как обязательные составляющие декарбонизации энергетики, традиционных и новых отраслей промышленности во всех сценариях, что в последние годы побудило рост активности в области УХУ по всему миру.

Улавливание и хранение углерода относят к обособленной группе опций декарбонизации, так как они направлены на предотвращение поступления уже образовавшегося CO₂ в атмосферу. Данный факт является критическим и позволяет при использовании таких технологий двигаться к углеродной нейтральности постепенно, без радикальных изменений в промышленных и энергетических процессах. В общем случае технологическая цепочка УХУ включает в себя три последовательных этапа: 1) улавливание CO₂ на источнике выбросов; 2) транспортировка CO₂ одним из известных способов; 3) полезное использование (утилизация) и/или закачка газа с целью долгосрочного хранения под землей. С учетом того, что наибольшая доля выбросов ПГ в мире приходится на объекты энергетики и промышленности, на этапе улавливания именно им отводится ключевая роль. На текущем уровне развития технологий самым распространенным вариантом транспортировки углекислого газа является трубопровод, а преобладающим вариантом использования – его закачка в пласты на месторождениях для повышения нефтеотдачи (CO₂-EOR, англ. enhanced oil recovery).

В последние годы интерес к инициативам по улавливанию и хранению углерода значительно вырос. Технологии и решения, используемые на разных этапах, совершенствуются, формы организации и бизнес-модели реализации

⁵ Проект Стратегии низкоуглеродного развития и позиция России к 26-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата в Глазго // Министерство экономики развития Российской Федерации. – 2021. – 22 с.

технологических цепочек развиваются, а с 2020 года среднегодовой темп роста мощностей коммерческих проектов УХУ в мире на разных стадиях стабильно превышает 50 %⁶. Однако суммарный объем действующих мощностей невелик (порядка 40-50 Мт CO₂ в год⁷), а в России такие проекты отсутствуют. Вместе с тем, улавливание и хранение углерода рассматривается как одно из значимых направлений в рамках Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года⁸, что подтверждает признание данного комплекса технологий на государственном уровне и перспективность его развития в России.

На сегодня существует целый спектр факторов, сдерживающих развитие и масштабирование УХУ. Так, данные технологии не являются зрелыми по всему спектру решений, высока их энергоемкость, а реализация всей технологической цепочки, особенно этапа улавливания, связана с высокими финансовыми затратами. Проекты УХУ по своей сути лишь косвенно связаны с получением дохода, а в ряде случаев, когда предусмотрено только геологическое хранение CO₂, он отсутствует. Потенциальные доходы от повышения нефтеотдачи, как показывает мировой опыт, лишь частично могут компенсировать затраты на функционирование всей цепочки, а текущих мер государственного регулирования в большей части стран недостаточно для развития проектов на коммерческой основе. Законодательная база по долгосрочному хранению CO₂ под землей в большинстве стран только зарождается, а решения по улавливанию требуют совершенствования для достижения приемлемого уровня затрат и использования технологии в промышленных масштабах. Все это сдерживает развитие УХУ по всему миру, в том числе и в России.

С учетом ведущей роли ископаемого топлива в экономике России, традиционного характера всей энергетической системы и промышленных мощностей необходимо создать условия для разумной, плавной декарбонизации и

⁶ CCS Facilities Database // Global CCS institute. – 2023. – URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 17.04.2024).

⁷ Там же.

⁸ Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 г. № 3052-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 08.11.2021 г.

принятия взвешенных решений с фокусом на национальные интересы. Поэтому наиболее вероятным сценарием декарбонизации является ориентация на технологии, способные достигать сокращения выбросов ПГ без существенной перестройки действующих промышленных и энергетических систем. Все это определяет необходимость совершенствования концептуальных и методических основ планирования деятельности по снижению выбросов ПГ с фокусом на реализацию проектов улавливания и хранения углерода в реальном секторе экономики России, оценку экономической жизнеспособности таких инициатив и разработку соответствующих рекомендаций. Это позволит повысить степень готовности промышленного сектора России к сокращению выбросов ПГ и реализации его вклада в решение климатических задач.

Отметим, что решения по улавливанию и хранению углерода могут сократить выбросы в энергоемких отраслях промышленности, где отказаться от их образования практически невозможно, а сократить иными способами – трудно. Развитие УХУ может внести существенный вклад в продолжение эксплуатации действующих мощностей, позволяя избежать преждевременного вывода ценных активов. Кроме того, УХУ являются частью комплекса решений, направленных на ограничение роста концентрации CO₂ в атмосфере через проекты в области биоэнергетики с улавливанием и хранением углерода (англ. BECCS – Bioenergy with Carbon Capture and Storage) или прямого улавливания CO₂ из атмосферы (англ. DAC – Direct Air Capturing), что в будущем позволит прийти к углеродно-отрицательным моделям. Данные факты определяют актуальность темы исследования.

В качестве фокуса данной работы принят комплекс решений по улавливанию и хранению углерода, «работающий» с техногенными выбросами CO₂.

Степень разработанности проблемы

Теоретическим и методологическим вопросам экономики устойчивого развития, «зеленой» экономики посвящено множество работ зарубежных авторов, а также российских ученых, среди которых можно отметить таких как

Бобылев С. Н., Иванова М. В., Крюков В. А., Кудрявцева О. В., Макаров И. А., Маликова О. И., Мешалкин В. П., Папенков К. В., Плотников В. А., Скобелев Д. О., Скуфьина Т. П., Соловьева С. В., Толстых Т. О., Федосеев С. В., Хачатуров Т. С., Ховавко И. Ю. и др.

Отдельные аспекты экономики низкоуглеродного развития, декарбонизации промышленности нашли широкое отражение в работах зарубежных ученых, а также российских исследователей и экспертов, таких как Башмаков И. А., Ильинский А. А., Колпаков А. Ю., Лебедев О. В., Митрова Т. А., Никоноров С. М., Пахомова Н. В., Порфирьев Б. Н., Сафонов Г. В., Череповицын А. Е., Широков А. А., Юлкин М. А. и др. Учеными исследованы экономические аспекты климатических изменений в России (например, работы Порфирьева Б. Н., Колпакова А. Ю., Макарова И. А.), существенные вопросы декарбонизации российской промышленности и регионов (например, труды Башмакова И. А., Юлкина М. А.), особенности реализации «зеленого» энергоперехода в России (например, труды Пахомовой Н. В.), а также ряд частных вопросов, таких как формирование углеродного регулирования (например, работы Львовой Н. А.) и др. Вместе с тем, научные проблемы и практические аспекты экономики технологий улавливания и хранения углерода в промышленности исследовались, в большей степени, зарубежными учеными, такими как Budinis S., Consoli C., Kearns D., Koytoumpa E., Krevor S., Liu H., Ozkan M., Rubin E. и др. Можно выделить отдельные работы российских исследователей по общим организационно-экономическим вопросам реализации технологий УХУ (Осипцов А. А., Гайда И. В.), эколого-экономической оценке технологий захоронения углекислого газа (Потравный И. М., Яшалова Н. Н., Ильинский А. А.), экономике «чистых» угольных технологий с применением УХУ (Пономаренко Т. В.), развитию нормативно-правового регулирования в области улавливания и хранения углерода (Ромашева Н. В.), общественной эффективности и восприятия УХУ (Васильев Ю. Н.) и др.

В то же время целый комплекс вопросов по организационно-экономическому обоснованию планирования и реализации проектов УХУ

в промышленности остается недостаточно исследованным, особенно в условиях России. Степень проработанности данной проблемы крайне низкая, предпринимаются лишь первые попытки исследований в этом направлении, в большей степени — в области декарбонизации промышленности в целом. Данная работа призвана внести вклад в совершенствование подходов к декарбонизации промышленности с развитием представлений о возможностях и ограничениях внедрения улавливания и хранения углерода в промышленном секторе России.

Цель и задачи исследования

Цель исследования заключается в совершенствовании подходов к планированию деятельности по снижению выбросов ПГ с организационно-экономическим обоснованием проектов улавливания и хранения углерода в промышленном секторе России.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие логично взаимосвязанные **задачи**:

- 1) уточнить понятие декарбонизации и другую терминологию в области снижения выбросов ПГ на уровне промышленной системы;
- 2) определить концептуальные основы низкоуглеродной трансформации промышленных компаний (на примере нефтегазовых) в условиях необходимости декарбонизации;
- 3) предложить систематизацию доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса с уточнением роли УХУ и оценкой возможностей участия компаний в таких проектах;
- 4) обобщить имеющийся теоретический материал и практический опыт реализации комплекса технологий УХУ в мире, выявить ключевые факторы формирования затрат и условия экономической жизнеспособности проектов;
- 5) исследовать природу формирования, функционирования и развития во времени технологических цепочек улавливания и хранения углерода в отраслях-адаптерах технологий;

б) оценить перспективы реализации проектов УХУ в России, в том числе в части предпосылок, условий и необходимых компонентов будущего развития;

7) смоделировать наиболее вероятные варианты внедрения технологических цепочек УХУ в России, провести стоимостную и экономическую оценку реализации таких проектов;

8) разработать рекомендации по совершенствованию государственной климатической и экологической промышленной политики, оценить влияние предложенных мер государственного регулирования на экономику проектов УХУ.

Предмет и объект исследования

Объект исследования – декарбонизация промышленных систем.

Предмет исследования – экономические и управленческие отношения, возникающие в результате деятельности по снижению выбросов ПГ в атмосферу в рамках проблемы климатических изменений в части реализации технологий улавливания и хранения CO₂.

Теоретическая, методологическая и информационная база исследования

Теоретической базой исследования послужили концепции и положения, изложенные в трудах российских и зарубежных ученых в области устойчивого развития, низкоуглеродного развития, экономики изменения климата, декарбонизации, стратегического управления.

Методологическая основа исследования базируется на применении различных научных подходов, таких как системный, комплексный, динамический, ситуационный, а также набора научных методов, таких как анализ и синтез, обобщение и группировка, типология и декомпозиция, систематизация, экспертные оценки, статистические методы, методы прогнозирования, концептуального моделирования и экономической оценки. На разных этапах исследования применялись специализированные подходы к оценке затрат на УХУ, методы экономической оценки эффективности инвестиций, сценарный

подход, методы оценки рисков. В работе использованы информационно-аналитические и поисковые системы, специализированные базы данных.

Информационную базу исследования составили аналитические материалы, фундаментальные и прикладные исследования, статистические данные, базы данных, стандарты различных международных и российских организаций, таких как Глобальный институт CCS (Global CCS Institute), Международное энергетическое агентство (МЭА) (International Energy Agency, IEA), Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), Институт мировых ресурсов (World Resources Institute, WRI), Институт энергетического перехода Керни (Kearney Energy Transition Institute), VYGON Consulting, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Сколково, Аналитический центр при Правительстве РФ и др.; соглашения, являющиеся правовой основой международного взаимодействия по вопросам изменения климата (Киотский протокол (1997), Парижское соглашение по климату (2015) и др.); данные открытой отчетности российских и зарубежных нефтегазовых компаний (годовые отчеты (Annual Reports), отчеты об устойчивом развитии (Sustainability Reports), экологические отчеты, справочники ESG-данных, а также специализированные отчеты по климату – Energy Transition Report, Climate Risk Resilience, Climate Report и др.); официальные сайты и данные по объектам генерирующих компаний России; официальные данные Федеральной службы государственной статистики; нормативные и правовые документы органов государственной власти РФ и зарубежных стран по стратегическим и частным вопросам в области низкоуглеродного развития, сокращения выбросов ПГ, реализации УХУ; научные статьи в профильных периодических изданиях.

Научная новизна результатов исследования

1) Уточнено понятие декарбонизации в части его сущности и мер реализации; уточнена сущность и предложено распределение по иерархии таких терминов, как направление, группы опций, опции и технологии декарбонизации

в рамках планирования деятельности по снижению выбросов ПГ на уровне промышленной системы;

2) определены концептуальные основы низкоуглеродной трансформации нефтегазовых компаний как результата деятельности по снижению выбросов ПГ с выявлением типов стратегий и подходов к целеполаганию; впервые обоснована диверсификация направлений декарбонизации, источников получения энергии, производимых продуктов как способ достижения целей декарбонизации;

3) предложена систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса в рамках планирования деятельности по снижению выбросов ПГ, включающая четыре направления (совершенствование операционной деятельности, переход на низкоуглеродные источники энергии, работа с попутными компонентами и отходами производства, организационно-экономические методы (корпоративный уровень)) с уточнением роли группы опций УХУ для снижения выбросов традиционных нефтегазовых компаний и возможностей участия последних в технологической цепочке;

4) впервые представлено технико-экономическое обобщение накопленных в мире теоретических знаний и практического опыта в области улавливания и хранения углерода на основе трех групп признаков (базовые, технологические, организационно-экономические); выявлен перечень факторов формирования затрат на УХУ по этапам технологической цепочки с уточнением условий экономической жизнеспособности проектов;

5) обосновано выделение технологических цепочек улавливания и хранения углерода в особый объект управления межотраслевого характера, определены основы их формирования и функционирования в отраслях-адаптерах технологий в рамках конструкций УХУ, понятие которых впервые введено в данном исследовании; обоснованы направления трансформации таких конструкций в процессе развития новых технологий, совершенствования бизнес-моделей и институциональных условий;

б) впервые в одном исследовании обобщены предпосылки, проведена оценка условий и выявлены необходимые компоненты для будущего развития проектов улавливания и хранения углерода в промышленном секторе России;

7) исследованы и идентифицированы наиболее вероятные варианты конструкций УХУ и их элементов для внедрения в промышленном и энергетическом секторах России; впервые проведена оценка затрат на внедрение технологии улавливания на угольной электростанции, а также экономическая оценка функционирования полной технологической цепочки УХУ в нефтепромышленном регионе с использованием CO_2 для повышения нефтеотдачи пластов;

8) разработаны рекомендации по совершенствованию подходов к планированию деятельности по снижению выбросов ПГ, а также формированию климатической и экологической промышленной политики для активизации развития УХУ в России; впервые предложено разделение мер государственного регулирования на общие и специфические с оценкой их влияния на экономику проектов УХУ.

Положения, выносимые на защиту

1. По авторскому определению, декарбонизация промышленных систем представляет собой планомерное снижение выбросов парниковых газов на уровне рассматриваемой системы (промышленного объекта, компании, комплекса) посредством реализации мер, направленных на предотвращение и/или «избегание» выбросов, и должна реализовываться путем поиска, обоснования, оценки и внедрения конкретных доступных решений, нацеленных на снижение выбросов ПГ в атмосферу. При этом планирование деятельности по декарбонизации целесообразно основывать на распределении доступных мер с ориентацией на уточненные понятия направления декарбонизации (сфера или область, в рамках которой осуществляется деятельность по снижению выбросов ПГ), группы опций декарбонизации (совокупность опций с общей целью и принципами действия), опций декарбонизации (конкретные методы, реализация которых направлена на снижение выбросов ПГ) и технологии декарбонизации

(технологические решения, определяющие способ реализации опций декарбонизации). Данные четыре понятия связаны по иерархии.

2. Деятельность по декарбонизации промышленных компаний приводит к низкоуглеродной трансформации бизнеса, концептуальные основы которой на примере исследованных нефтегазовых компаний следующие: 1) компании делятся на три группы по типу стратегии: традиционные нефтегазовые, энергетические и «зеленые»; 2) в зависимости от выбранной стратегии компании определяют цели декарбонизации, которые обычно получают отражение в виде климатических целей и имеют разную степень декомпозиции по отличающимся признакам (срокам, сферам деятельности, а также в отношении того, где происходит образование и выброс ПГ – сферы охвата 1 и 2, реже – в отношении сферы охвата 3); 3) компании выделяют приоритетные направления декарбонизации: традиционные нефтегазовые – совершенствование операционной деятельности и работа с попутными компонентами и отходами производства; энергетические – переход на низкоуглеродные источники энергии; «зеленые» – применение организационно-экономических методов на корпоративном уровне; 4) компании в зависимости от выявленных типов стратегий реализуют диверсификацию направлений декарбонизации (традиционные нефтегазовые), источников получения энергии (энергетические), производимых продуктов («зеленые») как основной способ достижения целей декарбонизации.

3. Планирование деятельности по декарбонизации традиционных нефтегазовых компаний необходимо осуществлять с ориентацией на предложенную в работе систематизацию доступных опций, включающую четыре направления: 1) совершенствование операционной деятельности; 2) переход на низкоуглеродные источники энергии; 3) работа с попутными компонентами и отходами производства; 4) организационно-экономические методы (корпоративный уровень). В условиях невозможности полного «избегания» образования ПГ в производственной деятельности нефтегазовых и других промышленных компаний технологии УХУ должны рассматриваться как

обязательные составляющие планов по снижению выбросов ПГ, так как позволяют предотвращать попадание в атмосферу уже образовавшихся газов без радикальных изменений действующих процессов. Участие нефтегазовых компаний в проектах УХУ может осуществляться в рамках полного участия во всей технологической цепочке посредством создания консорциума либо в виде частичного участия с выделением этапов транспортировки и хранения в качестве независимого проекта.

4. Технико-экономическое обобщение теоретических знаний и практического опыта в области улавливания и хранения углерода можно представить на основе трех групп признаков: 1) базовые, определяющие сущность и основы реализации УХУ (тип проекта, объем мощностей, источник выбросов); 2) технологические, детализирующие конкретные способы, решения и технологии, применяемые на этапах улавливания, транспортировки и хранения; 3) организационно-экономические, уточняющие организационные модели, проектные и стоимостные характеристики таких проектов (стадия проекта, модель финансирования, стоимость адаптации УХУ и др.). Уровень затрат на УХУ по отраслям-адаптерам технологий позволяет условно разделить отрасли на «дорогие» и «дешевые» и определяется набором факторов, идентифицированных для каждого этапа технологической цепочки. Например, затраты на улавливание газа зависят от доступности (применимости) технологий, масштаба мощностей, характеристик газового потока на объекте, стоимости электроэнергии и могут снижаться за счет экономии на масштабе, эффектов обучения и накопления опыта; на этапах транспортировки и хранения затраты определяются удаленностью объектов, существующей инфраструктурой и могут снижаться за счет развития последней, планирования наиболее целесообразных технологических цепочек и др. Управление факторами формирования затрат, а также реализация мер государственного регулирования в условиях ограниченного набора возможных вариантов получения дохода являются ключевыми условиями экономической жизнеспособности проектов, что должно учитываться при их планировании.

5. Реализация технологических цепочек улавливания и хранения углерода возможна в рамках формирования уникальных межотраслевых комплексов, которые представляют собой особый объект управления, а их функционирование осуществляется в рамках конструкций УХУ, определяющими характеристиками которых являются источник CO_2 , особенности промышленных и энергетических процессов, уровень развития технологий, а также возможности по утилизации и захоронению углерода. Масштабирование УХУ подвержено трансформации, что выражается в переходе от конструкций первого поколения к конструкциям второго поколения со смещением от полной технологической цепочки к отделению улавливания от транспортировки и хранения газа, диверсификацией областей применения технологий улавливания, тенденцией к переходу от решений CO_2 -EOR (англ. enhanced oil recovery) к специализированным геологическим хранилищам и развитием «открытых» транспортных сетей.

6. Промышленный сектор, экономика и территория России в целом обладают рядом благоприятных предпосылок для развития УХУ, а именно: характеризуются существенными объемами выбросов ПГ, большими мощностями доступных для размещения CO_2 потенциальных хранилищ, доминирующей ролью ископаемых видов топлива в экономике, традиционным характером энергетических и промышленных мощностей, развитой нефтегазовой отраслью. Все это определяет потенциально благоприятные условия и высокую степень заинтересованности промышленных компаний и государства в снижении выбросов ПГ без существенного изменения базовых промышленных процессов и мощностей. При условии создания определенной институциональной среды на начальных этапах развития целесообразно улавливать углекислый газ на традиционных энергетических и нефтегазовых объектах и использовать его для повышения нефтеотдачи с последующим долгосрочным хранением под землей. При этом компоненты, определяющие долгосрочное развитие УХУ в России, можно определить в четыре группы – это 1) стоимость улавливания углекислого газа, 2) транспортная инфраструктура, 3) инфраструктура хранения, 4) государственное регулирование.

7. Необходимым и наиболее вероятным сценарием при развитии технологических цепочек улавливания и хранения углерода в промышленном и энергетическом секторах России является ориентация на конструкции УХУ первого поколения и их элементы с реализацией технологий улавливания углекислого газа на угольных электростанциях, а также формированием полных технологических цепочек в экономически развитых нефтепромышленных регионах с улавливанием углекислого газа на нескольких источниках выбросов вблизи нефтегазовых месторождений, пригодных для CO₂-EOR. При этом улавливание углекислого газа связано с высокими затратами (порядка 16 775 руб. за 1 т CO₂ для рассмотренной в работе угольной электростанции), а проекты УХУ с использованием CO₂ для повышения нефтеотдачи не являются экономически эффективными, что требует развития соответствующих мер государственного регулирования.

8. Для реализации первых проектов улавливания и хранения углерода в России необходимо поступательное развитие общих обязательных мер регулирующего характера (налог на выбросы ПГ) и специфических мер направленного действия стимулирующего характера («контракты на разницу», налоговая льгота «45Q»). Впервые в работе доказано, что экономическую жизнеспособность УХУ могут обеспечить специфические меры, направленные на снижение затрат и поддержку доходов, но их реализация требует существенных расходов со стороны государства. Например, применение механизма «контракты на разницу» только для одной угольной электростанции будет обходиться государству в 7,9 млрд руб. в год, а необходимый объем субсидирования всех угольных электростанций в России в случае оснащения их установками улавливания может составить порядка 583 млрд руб. в год. В рамках совершенствования подходов к планированию деятельности по снижению выбросов ПГ целесообразно разграничить развитие государственной климатической и экологической промышленной политики на упомянутые два направления, где общие обязательные меры определяют минимальную ответственность по управлению выбросами ПГ, поддерживая общую позицию

по обеспечению вклада в решение климатических задач на уровне государства, а упомянутые специфические меры стимулируют развитие именно комплекса технологий УХУ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость исследования определяется развитием теоретико-методологических подходов к планированию деятельности по декарбонизации промышленных систем, а также обоснованием концептуальных и организационно-экономических основ реализации технологических цепочек улавливания и хранения углерода в промышленности.

Практическая значимость исследования состоит в возможности использования его результатов в стратегических документах экономического развития национальной экономики в части ее экологизации и обеспечения низкого уровня выбросов ПГ. Полученные результаты могут быть использованы при разработке мероприятий и программ в сфере реализации Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, выполнения целей Указа Президента РФ от 04.11.2020 № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» и др.

Разработанные рекомендации по совершенствованию подходов к планированию деятельности по снижению выбросов ПГ, а также формированию климатической и экологической промышленной политики могут быть использованы профильными органами государственной власти для совершенствования общих и разработки специфических мер, направленных на активизацию деятельности в области улавливания и хранения углерода в промышленном секторе России.

Результаты исследования в части систематизации доступных опций декарбонизации, технико-экономического обобщения знаний в области улавливания и хранения углерода, факторов формирования затрат, а также идентификации и трансформации конструкций УХУ могут быть использованы промышленными компаниями при развитии деятельности по декарбонизации, планировании проектов УХУ и участия в таких технологических цепочках.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Содержание диссертационного исследования соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономика природопользования и землеустройства):

9.19. Проблема борьбы с климатическими изменениями. Вопросы развития «зеленой» и низкоуглеродной экономики;

9.11. Экологическая политика. Стимулирование экологизации экономики и повышения эффективности природопользования методами экономической политики.

Апробация и реализация результатов диссертации

Основные положения и научные результаты исследования были апробированы на:

– XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы, тенденции и перспективы социально-экономического развития» (г. Сургут, Россия, 2025 г.);

– Международной научной конференции Хачатуровские чтения–2024 «Реализация концепции устойчивого развития в условиях суверенизации России» (г. Москва, Россия, 2024 г.);

– Международной научно-практической конференции «Молодежная экономическая наука» (г. Уфа, Россия, 2024 г.);

– XII Международной научно-практической конференции «Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения–2024» (г. Апатиты, Россия, 2024 г.);

– Международной ежегодной научной конференции Ломоносовские чтения–2024 «Человеческий и социальный капитал России: новые вызовы и возможности» (г. Москва, Россия, 2024 г.);

– Международной научной конференции «Новый путь декарбонизации экономики (KZGT-2023)» (г. Алматы, Республика Казахстан, 2023 г.);

– Международном форуме «Нефть и газ–2023» (г. Москва, Россия, 2023 г.);

- XVII Международной научно-практической конференции Российского общества экологической экономики «Глобальные вызовы и национальные экологические интересы: экономические и социальные аспекты» (г. Новосибирск, Россия, 2023 г.);
- Научном семинаре «Траектории достижения углеродной нейтральности (Pathways to Carbon Neutrality)», ЦЭНЭФ (г. Москва, Россия, 2022 г.);
- Международной научной конференции Хачатуровские чтения–2022 «Устойчивое развитие и национальные цели» (г. Москва, Россия, 2022 г.);
- XI Международной научно-практической конференции «Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения–2022» (г. Апатиты, Россия, 2022 г.);
- Ежегодном симпозиуме и международном научном форуме «Calotte Academy» (Финляндия – Швеция – Норвегия, 2022 г., 2023 г.);
- Международных конференциях «International Conference on Power and Energy Systems Engineering» (Япония, 2021 г., 2022 г.);
- III Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2020 г.);
- 14 Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, Россия, 2019 г.);
- XI Международной конференции «Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th conference of the Russian-German Raw Materials» (г. Потсдам, Германия; г. Санкт-Петербург, Россия, 2018 г.);
- Международной конференции «The Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-14)» (г. Мельбурн, Австралия, 2018 г.).

Отдельные положения диссертации подготовлены по результатам исследований, полученным в рамках НИР по теме FMEZ-2022-0035 «Разработка научных основ и обоснование эколого-экономически сбалансированного

ресурсосберегающего комплексного освоения природных ресурсов в Арктической зоне России», FMEZ-2023-0001 «Разработка научных основ устойчивого развития природоэксплуатирующих отраслей Арктической зоны хозяйствования РФ в условиях энергетической трансформации, глобальных экономических и климатических изменений», НМО «Научно-методическое обеспечение деятельности Минпромторга России в рамках реализации требований Парижского соглашения, направленных на регулирование выбросов парниковых газов промышленности», НИР «Научное обоснование выбора технологий и технических решений, обеспечивающих сокращение выбросов и увеличение поглощения парниковых газов промышленностью» (122020900221-7), НИР «Научное обоснование планирования и реализации проектов секвестрации диоксида углерода в реальном секторе экономики России» (123020600005-5), а также при выполнении Гранта РФФИ №18-010-00734\18 (2018-2020 гг., исполнитель проекта), Гранта РНФ №19-78-00108 (2019-2021 гг., руководитель проекта), Гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2692.2020.5 (2020-2021 гг., исполнитель проекта), Гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-4812.2021.2 (2021-2022 гг., руководитель проекта), Гранта РНФ № 18-18-00210 (2018-2020 гг., исполнитель проекта), Гранта РНФ № 22-78-10181 (2022-2025 гг., руководитель проекта).

Основные положения диссертационной работы использованы в деятельности Департамента стратегического развития и корпоративной политики Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, а также нашли практическое применение в деятельности промышленных компаний.

Ряд положений диссертационной работы использован в учебном процессе на кафедре экономики, организации и управления Санкт-Петербургского горного университета в 2018-2021 гг., на факультете географии и геоинформационных технологий НИУ «Высшая школа экономики» в 2023-2024 гг., а также в процессе подготовки электронного образовательного модуля «Улавливание, утилизация и

хранение CO₂ (Carbon Capture, Utilization & Storage)» Фонда инфраструктурных и образовательных программ (2022-2023 гг.).

Публикации автора по теме исследования

По теме диссертации опубликовано 33 научные работы общим объемом 35,55 п. л. (личный вклад автора – 20,7 п. л.), из них 18 – в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях из дополнительного списка, рекомендованных Ученым советом МГУ имени М. В. Ломоносова для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономика природопользования и землеустройства) (общий объем – 23,56 п. л., личный вклад автора – 14 п. л.); зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

Структура диссертации

Диссертация включает 318 страниц и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 262 источников. Содержит 23 таблицы и 31 рисунок.

Во введении обоснована актуальность и определена степень разработанности темы исследования, обозначены цель и задачи, определены объект и предмет исследования. Предложены методологическая основа и информационная база исследования, а также представлены результаты, имеющие научную новизну и достигнутые соискателем лично. Показаны результаты апробации теоретических и практических результатов и рекомендаций.

В главе 1 «Теория и практика низкоуглеродного развития и декарбонизации промышленных систем» обобщены теоретические подходы к устойчивому и низкоуглеродному развитию, уточнено понятие декарбонизации промышленных систем, предложены основы терминологической систематики для развития деятельности по декарбонизации, рассмотрены возможные варианты и существенные вопросы касательно различных направлений снижения выбросов ПГ в промышленности, представлены концептуальные основы низкоуглеродной трансформации промышленных компаний, обобщены подходы к стратегическому

развитию российских нефтегазовых компаний в условиях реализации вклада в решение климатических задач.

В главе 2 «Сущность, проблемы и перспективы развития технологий улавливания и хранения углекислого газа» предложена систематизация доступных опций декарбонизации промышленных компаний (на примере нефтегазовых) с определением роли и места УХУ, дана характеристика технологических цепочек УХУ, проведён анализ мирового опыта их реализации и обоснована роль в достижении углеродной нейтральности, представлен обзор международного опыта государственного регулирования УХУ в мире и обозначены первые шаги по данному направлению в России.

В главе 3 «Методологические основы формирования технологических цепочек УХУ» предложено технико-экономическое обобщение теоретических знаний и практического опыта по УХУ, проведён обзор и дано развитие подходов к оценке затрат на УХУ в части выявления и обоснования факторов их формирования, выявлены основные модели и обоснованы базовые организационные составляющие реализации различных форм УХУ.

В главе 4 «Конструкции УХУ и концептуальное видение реализации технологических цепочек в России» выполнена идентификация конструкции технологических цепочек УХУ, сформированы основные направления преобразований и проведена оценка применимости основных конструкций в России, выявлены необходимые стратегические компоненты и предпосылки для формирования и функционирования технологических цепочек улавливания и хранения углерода в России.

В главе 5 «Экономическое обоснование внедрения УХУ в промышленности и рекомендации по реализации проектов в России» представлены результаты оценки затрат на внедрение УХУ на угольной ТЭЦ и экономическое обоснование формирования межотраслевой цепочки с улавливанием газа на нескольких источниках и внедрением CO₂-EOR на нефтегазовом месторождении, разработаны предложения по обеспечению экономической жизнеспособности УХУ и выполнена их апробация, представлен комплекс рекомендаций

по развитию мер государственного регулирования, планированию и внедрению УХУ на объектах энергетики и промышленности России и идентификации комбинированной ценности УХУ.

В заключении представлены основные результаты научного исследования.

ГЛАВА 1. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ И ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ

1.1 Проблема декарбонизации промышленных систем в контексте устойчивого и низкоуглеродного развития: теоретический аспект

Проблема глобального изменения климата становится все более актуальной для мирового сообщества и требует принятия комплекса мер по ее решению. По мнению ряда ученых, основной причиной является парниковый эффект, на усиление которого влияют выбрасываемые и накапливаемые в атмосфере парниковые газы (ПГ), в том числе углекислый газ (CO₂). Парниковый эффект образуется как от природных источников, например, во время дыхания существ-аэробов, извержения вулканов, горения лесов, так и от техногенных, к которым относят, прежде всего, сжигание ископаемого топлива для производства энергии и ряд промышленных процессов.

Масса глобальных выбросов ПГ продолжает увеличиваться. Так, за последнее десятилетие темп роста составил порядка 1,3 % в год. По мнению некоторых ученых и экспертов, изменение климата может стать причиной ряда экзистенциальных проблем, что объясняет повышенное внимание к данному вопросу в глобальном масштабе.

Основным источником выбросов традиционно признается энергетический сектор. По данным “BP”, уровень мировой эмиссии CO₂, связанный с процессами получения энергии, в 2021 году составил порядка 34 млрд т (см. рисунок 1.1).

Глобальная эмиссия CO₂ еще больше увеличилась в 2022 году, и уровень выбросов в этом году превышает уровень, зафиксированный до пандемии COVID-19 в 2019 году⁹.

⁹ Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M. W.,Zaehle S., Zeng J., Zheng B. Global Carbon Budget 2022 // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14. – Is. 11. – P. 4811–4900. – DOI: 10.5194/essd-14-4811-2022.

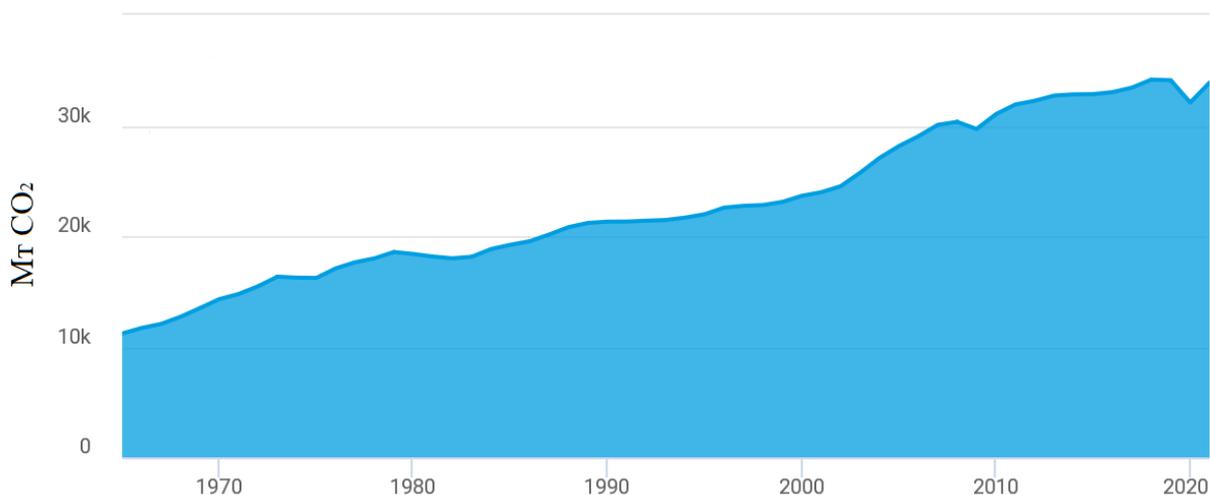


Рисунок 1.1 – Динамика изменения мировых энергетических выбросов CO₂, млн т
(по данным “BP”)

Источник: составлено автором по
BP Statistical Review of World Energy 2022: 71st edition / BP. – 2022. – 57 p. –
URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf?ysclid=lvwvzx4lyj399425678> (дата обращения: 01.06.2023).

Общепризнанным является тот факт, что глобальное изменение климата уже не является исключительно научной проблемой экологического характера. Она все больше становится делом внутренней и внешней политики, бизнеса, международных финансовых институтов и транснациональных корпораций¹⁰.

Данная проблема стала предпосылкой для разработки и принятия ряда соглашений, являющихся правовой основой международного взаимодействия по вопросам изменения климата, таких как Рамочная конвенция ООН об изменении климата (1992 г.), Киотский протокол (1997 г.), Парижское соглашение по климату (2015 г.), Климатический пакт Глазго (2021 г.). Россия является стороной всех перечисленных соглашений и стремится к активной позиции по вопросам снижения выбросов ПГ.

В свете развития правовой основы международного взаимодействия по вопросам изменения климата в последнее время в мире наблюдается

¹⁰ Сафонов Г. Декарбонизация мировой экономики и Россия // Нефтегазовая вертикаль. – 2020. – № 21-22. – С. 66-70.

ощутимый рост числа субъектов экономики различных уровней (от уровня компаний до уровня регионов и государств), которые приняли документы стратегического характера, определяющие приоритеты социально-экономического развития с низким уровнем выбросов ПГ. По состоянию на 2021 год, накануне конференции ООН по изменению климата в Глазго число таких стратегических документов в мире только на общенациональном уровне достигло 40. В это число входит и Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. (далее – Стратегия с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 г.)¹¹.

Следует отметить, что под парниковыми газами в соответствии с ФЗ № 296-ФЗ от 02.07.2021 «Об ограничении выбросов парниковых газов» понимаются «газообразные вещества природного или антропогенного происхождения, которые поглощают и переизлучают инфракрасное излучение». К парниковым газам относят диоксид углерода (углекислый газ, CO₂), метан, закись азота, гидрофторуглероды, перфторуглероды, гексафторид серы¹².

В сложившихся условиях мировая и отечественная промышленность сталкиваются с новыми вызовами. Мировое сообщество обеспокоено проблемой глобального потепления, что обуславливает существенное давление на энергетические и промышленные сектора, ответственные за существенную часть выбросов ПГ¹³ – порядка 32 % для электричества и тепла и 7 % для промышленных процессов по миру соответственно¹⁴. Обострение климатического вопроса еще сильнее сместило фокус развития крупных промышленных компаний в сторону устойчивого развития (sustainable development), а также движения к углеродной нейтральности (carbon neutrality) и декарбонизации деятельности. Последняя категория, ответственная за снижение выбросов ПГ, уже стала

¹¹ Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 г. № 3052-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 08.11.2021 г.

¹² Об ограничении выбросов парниковых газов: Федеральный закон Российской Федерации от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 05.07.2021 г.

¹³ 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.

¹⁴ World Greenhouse Gas Emissions in 2020 // World Resource Institute. – 2020. – URL: <https://files.wri.org/d8/s3fs-public/2023-10/ghg-emissions-2020.png> (дата обращения: 14.03.2023).

неотъемлемой частью широко известной в науке и реализуемой промышленными компаниями на практике концепции устойчивого развития. Результатом такого развития становится постепенная экологизация экономики, т.е. активное внедрение в экономику принципов рационального природопользования и минимизации воздействия на окружающую природную среду при осуществлении экономической деятельности, в том числе в части выбросов ПГ.

Осознание необходимости смещения фокуса в мировом масштабе к ответственному (разумному, устойчивому) потреблению, которое позволяет сохранить ресурсы для будущих поколений при их рациональном использовании и экономии, привело к появлению концепции устойчивого развития, основные положения которой были сформулированы в 70-х и 80-х годах прошлого века. В 1987 году Всемирная комиссия по окружающей среде и развитию выпустила отчет «Наше общее будущее» (известный как доклад Брундтланд), в котором на глобальном уровне впервые были закреплены и популяризированы фундаментальные идеи устойчивого развития. В докладе отмечено, что «правительства и многосторонние учреждения все больше сознают, что нельзя отделять вопросы экономического развития от вопросов окружающей среды»¹⁵.

Устойчивое развитие было определено как комплекс мер, направленных на удовлетворение текущих потребностей человечества без ущерба для способности будущих поколений удовлетворять свои¹⁶. При этом в документе закреплена идея того, что «устойчивое и долговременное развитие представляет собой не неизменное состояние гармонии, а скорее процесс изменений, в котором масштабы эксплуатации ресурсов, направление капиталовложений, ориентация технического развития и институциональные изменения согласуются с нынешними и будущими потребностями»¹⁷. Следует отметить, что в упомянутом выше докладе

¹⁵ Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, Nairobi, 8 to 19 June 1987. – New York: United Nations, 1987. – 300 p. – URL: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf> (дата обращения: 06.03.2022).

¹⁶ Там же.

¹⁷ Там же.

уже обсуждается «тепличный эффект», который «является прямым следствием растущего использования ресурсов»¹⁸.

На II Международной конференции ООН по окружающей среде «Концепция устойчивого развития» (1992) была официально утверждена Рио-де-Жанейрская декларация по окружающей среде и развитию, определившая ключевые направления действий и международного сотрудничества в сфере охраны окружающей среды¹⁹. Именно эти положения стали основой формирования принципиально нового направления, учитывающего экологические требования по сохранению природы и улучшению условий жизнедеятельности человека в качестве основополагающих.

Тезисно концепцию устойчивого развития можно сформулировать, зафиксировав три основных положения:

1) социально-экономическое развитие на всех уровнях с учётом экологических ограничений;

2) создание механизмов эффективного перераспределения ресурсов для равного обеспечения потребностей всех государств и социально-экономических систем;

3) ответственность перед будущими поколениями, которая заключается в том, чтобы оставить им достаточно невозобновляемых ресурсов, а также среду обитания, пригодную для жизни и развития.

Концепция устойчивого развития основывается на принципе «Тройного критерия», предполагающего баланс между экономическими, социальными и экологическими факторами²⁰. На протяжении длительного времени экологическому фактору зачастую не уделяли должного внимания, поэтому в большей степени предпосылками к появлению, активному развитию и внедрению в практику положений устойчивого развития во многом стали именно экологические основания.

¹⁸ Там же.

¹⁹ Рио-де-Жанейрская декларация по окружающей среде и развитию. Принята Конференцией ООН по окружающей среде и развитию, Рио-де-Жанейро, 3–14 июня 1992 года // Организация Объединённых Наций. – URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/decl_environment (дата обращения: 16.03.2023).

²⁰ Triple bottom line: A review of the literature // The triple bottom line. Does it all add up? / C. Adams, G. Frost, W. Webber. – London, 2004. – Ch. 2. – P. 20-25.

Концепция устойчивого развития за последние полвека активно эволюционировала. Укрупнённо эксперты выделяют три основных этапа ее развития:

- 1) первый этап – начало 70-х гг. – начало 90-х гг. XX века;
- 2) второй этап – начало 90-х гг. XX века – конец 2000-х гг.;
- 3) третий этап – конец 2000-х гг. – по настоящее время²¹.

Основополагающими документами стратегического характера для каждого этапа и их смены выступали решения, принятые на глобальном уровне в рамках конференций ООН. Такие решения и соответствующие им документы стали своеобразными маркерами в развитии концепции устойчивого развития²² и смежных областей для всего глобального мира.

В рамках третьего из выше обозначенных этапов развития рассматриваемая концепция стала комплексной социо-экономико-экологической категорией как в теории, так и на практике. Развитие концепции устойчивого развития породило распространение новых моделей экономики, основанных на принципах и подходах, закреплённых в базовых положениях концепции. Среди них «зелёная» экономика (green economy), а также циркулярная экономика (circular economy), низкоуглеродная экономика (low-carbon economy) и др. К концу 2000-х в глобальном масштабе появилось осознание того, что без формирования соответствующей модели экономики переход к устойчивому развитию невозможен. «Зелёная экономика» стала выводиться учёными в основу устойчивого развития, а появился данный термин еще в 1989 году²³. Данный факт был закреплён и в ряде основополагающих документов ООН.

Проблема снижения выбросов ПГ стала активно «набирать обороты» в конце 1990-х – начале 2000-х годов, когда началось полномасштабное развитие климатической политики ООН. Принятие в 1997 году Киотского протокола как документа, который наложил конкретные обязательства на национальные экономики по сокращению выбросов ПГ, стало некой предпосылкой для

²¹ Бобылев С. Н. Экономика устойчивого развития: учебник. – М.: Кнорус, 2021. – 672 с.

²² Там же.

²³ Pearce D. Blueprint for a Green Economy / D. Pearce, A. Markandya, E. B. Barbier. – London: Earthscan, 1989. – 192 p.

«встраивания» декарбонизации в концепцию устойчивого развития. Именно с этого момента условно можно зафиксировать развитие совместных представлений о декарбонизации и устойчивом развитии. В 2005 году ООН ввиду озабоченности ухудшением состояния окружающей среды, глобальным изменением климата и возрастающим экономическим неравенством предложила концепцию ведения деятельности «ESG» – Environmental, Social, Governance («природа, общество, управление»), – направленную на разработку стратегии ведения бизнеса с учетом решения экологических, социальных и управленческих проблем.

В 2015 году более 190 стран, включая Россию, приняли Парижское соглашение по климату, направленное на снижение выбросов ПГ и удержание прироста средней температуры Земли на уровне 1,5-2°С к концу XXI века. Одним из ключевых требований упомянутого выше соглашения стала разработка и реализация стратегий долгосрочного развития с низким уровнем выбросов ПГ на национальных уровнях для снижения рисков климатических изменений для населения и экономики²⁴. Можно определить, что главной целью данного документа, по сути, стало определение вектора на обеспечение низкоуглеродного развития социально-экономических систем различных уровней. Переход к низкоуглеродному развитию в документе обозначен в качестве основного способа достижения поставленных климатических целей, и этому должна способствовать переориентация финансовых потоков в пользу отраслей и технологий, отличающихся низким уровнем выбросов ПГ и/или способствующих их снижению.

На сегодня термин «низкоуглеродный» употребляется в разных контекстах: низкоуглеродное развитие, низкоуглеродная экономика, стратегии низкоуглеродного развития и т.д. В целом, такой термин применяется в значении «с низким уровнем выбросов ПГ», что соответствует английскому выражению

²⁴ Порфирьев Б. Н., Широков А. А. Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов: сценарии и реалии для России // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92. – № 5. – С. 415–423. – DOI: 10.31857/S086958732205005X.

«low carbon»²⁵.

В конце 2000-х годов правительственные учреждения, в частности Министерство международного развития Великобритании (англ. The Department for International Development, DFID), начали активно использовать термин «низкоуглеродное развитие», чтобы объединить все вопросы, обсужденные выше, под одной концепцией. В общем виде под низкоуглеродным развитием предполагалось использование меньшего количества углерода для обеспечения экономического роста посредством различных направлений и мер, в частности²⁶:

1) использование меньшего количества энергии, повышение энергоэффективности, переход к источникам энергии с низким или нулевым содержанием углерода;

2) охрана, рациональное использование и воспроизводство природных ресурсов, аккумулирующих углерод (таких как леса и земля);

3) разработка, внедрение и масштабирование технологий и бизнес-моделей с низким или нулевым уровнем выбросов углерода;

4) политика и стимулы, препятствующие использованию углеродоемких методов и моделей поведения.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) (англ. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) упоминает термин «низкоуглеродное развитие» в своём Пятом оценочном докладе (англ. The IPCC Fifth Assessment Report, AR5) (2014), но в документе точное определение не представлено. В последнее десятилетие данный термин стал активно использоваться правительствами по всему миру, а также вошел в академический оборот²⁷. Сегодня в источниках встречаются разные трактовки понятия «низкоуглеродное развитие» (см. таблицу 1.1). Большая часть обсуждений в академической литературе и политических документах сводится к интеграции

²⁵ Юлкин М. А. Глобальная декарбонизация и ее влияние на экономику России // АНО «Центр экологических инвестиций». – 2023. – URL: http://downloads.igce.ru/news/Yulkin_M_A_ext_abstract_IGCE_06022019.pdf (дата обращения: 16.03.2023).

²⁶ Eliminating World Poverty: Building our Common Future // Department for International Development. – 2009. – 150 p. – URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7b831a40f0b645ba3c4ce7/7656.pdf> (дата обращения: 22.03.2023).

²⁷ Urban F., Nordensvard J. Low carbon development: Key issues. – London: Routledge, 2013. – 352 p.

стратегий снижения выбросов CO₂ в текущую траекторию экономического развития²⁸. Основные общие характеристики данной концепции, встречающиеся в большинстве источников, – это снижение выбросов ПГ, использование низкоуглеродной энергии и обеспечение экономического роста.

Одно из первых упоминаний и обоснований понятия «низкоуглеродная экономика» было зафиксировано в документе²⁹, подготовленном Министерством торговли и промышленности Великобритании (англ. Department of Trade and Industry, DTI) в 2003 году. В последние десятилетия это понятие привлекает все больше внимания, особенно после публикации Четвёртого оценочного доклада МГЭИК (англ. The IPCC Fourth Assessment Report, AR4) (2007) и обзора Стерна по экономике изменения климата (англ. The Stern Review on the Economics of Climate Change), выпущенного в 2006 году. Общепринятое определение, как и по другим концепциям и терминам, отсутствует, но чаще всего такой тип экономики связывают с минимизацией и низким уровнем выбросов ПГ³⁰. Примеры трактовок данной концепции представлены в таблице 1.1.

Формирование низкоуглеродной модели экономики характеризуется комплексом мер, принимаемых на разных уровнях. Процесс перехода к низкоуглеродной экономике часто определяют термином «декарбонизация»³¹.

²⁸ Wimbadi R. W., Djalante R. From decarbonization to low carbon development and transition: A systematic literature review of the conceptualization of moving toward net-zero carbon dioxide emission (1995–2019) // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 256: 120307. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120307.

²⁹ Energy White Paper: Our Energy Future-Creating a Low Carbon Economy // Department for transport. – 2003. – 144 p. – URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7c1f5940f0b645ba3c6d4f/5761.pdf> (дата обращения: 22.03.2023).

³⁰ Бобылев С. Н. Экономика устойчивого развития: учебник. – М.: Кнорус, 2021. – 672 с.

³¹ Там же.

Таблица 1.1 – Ключевые концепции и понятия в области устойчивого развития, низкоуглеродного развития и декарбонизации

Понятие	Определение	Источник
Устойчивое развитие (Sustainable development)	развитие устойчивого долговременного характера, отвечающее потребностям нынешнего поколения и не лишаящее будущие поколения возможности удовлетворять свои потребности	Доклад Брундтланд (1987) ³²
«Зелёная» экономика (Green economy)	экономика, являющаяся экономическим базисом устойчивого развития, она повышает благосостояние / качество жизни населения в пределах экологических ограничений (ёмкости) нашей планеты	Бобылев (2021) ³³
Низкоуглеродное развитие (Low-carbon development)	использование меньшего количества углерода для обеспечения экономического роста	DFID (2009) ³⁴
	интеграция стратегий снижения выбросов CO ₂ в текущую траекторию экономического развития с акцентом на переходе от производства и потребления, основанных на использовании ископаемого топлива, к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ)	Wimbadi (2020) ³⁵ Mulugetta and Urban (2010) ³⁶
Низкоуглеродная экономика (Low carbon economy)	экономика, основанная на идее получения большего экономического эффекта за счет меньшего потребления природных ресурсов и меньшего загрязнения окружающей среды	UK DTI (2003) ³⁷
	новая экономическая, технологическая и социальная система производства и потребления, направленная на экономию энергии и сокращение выбросов ПГ (по сравнению с традиционной экономической системой) при сохранении импульса к экономическому и социальному развитию	China's Pathway Towards a Low Carbon Economy (2009) ³⁸
	разновидность (форма) низкоуглеродного развития	Jia (2012) ³⁹
	экономика, для которой характерны минимальные объемы выбросов ПГ в биосферу, в частности CO ₂ , образующегося при сжигании угля, нефти и газа	Ding, Dai, and Zhao, (2008) ⁴⁰

³² Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, Nairobi, 8 to 19 June 1987. – New York: United Nations, 1987. – 300 p. – URL: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf> (дата обращения: 06.03.2022).

³³ Бобылев С. Н. Экономика устойчивого развития: учебник. – М.: Кнорус, 2021. – 672 с.

³⁴ Eliminating World Poverty: Building our Common Future // Department for International Development. – 2009. – 150 p. – URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7b831a40f0b645ba3c4ce7/7656.pdf> (дата обращения: 22.03.2023).

³⁵ Wimbadi R.W., Djalante R. From decarbonization to low carbon development and transition: A systematic literature review of the conceptualization of moving toward net-zero carbon dioxide emission (1995–2019) // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 256: 120307. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120307.

³⁶ Mulugetta Y., Urban F. Deliberating on low carbon development // Energy Policy. – 2010. – Vol. 38. – Is. 12. – P. 7546-7549. – DOI: 10.1016/j.enpol.2010.05.049.

³⁷ Energy White Paper: Our Energy Future-Creating a Low Carbon Economy // Department for transport. – 2003. – 144 p. – URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7c1f5940f0b645ba3c6d4f/5761.pdf> (дата обращения: 22.03.2023).

³⁸ China's Pathway Towards a Low Carbon Economy. CCICED Policy Research Report // China Council for International Cooperation on Environment and Development. – 2009. – 140 p. – URL: http://www.cciced.net/ccicedPhoneEN/Events/AGMeeting/2009_3973/meetingplace_3974/201609/P020160922381047979521.pdf (дата обращения: 05.03.2022).

³⁹ Jia J., Fan Y., Guo X. The low carbon development (LCD) levels' evaluation of the world's 47 countries (areas) by combining the FAHP with the TOPSIS method // Expert Systems with Applications. – 2012. – Vol. 7. – Is. 7. – P. 6628-6640. – DOI: 10.1016/j.eswa.2011.12.039.

⁴⁰ Ding D., Dai D., Zhao M. Development of a low-carbon economy in China // International Journal of Sustainable Development and World Ecology. – 2008. – Vol. 15. – P. 331-336. – DOI: 10.3843/SusDev.15.4:7a.

Продолжение таблицы 1.1

Понятие	Определение	Источник
Энергетический переход (Energy transition)	переход от существующей экономики, основанной преимущественно на углеводородах, к экономике, все больше опирающейся на новые и возобновляемые источники энергии; это должно соответствовать потребностям и возможностям отдельных стран, быть социально справедливым, экономически и технически жизнеспособным и экологически устойчивым	Report of the United Nations Conference (1981) ⁴¹
	непрерывный процесс, требующий долгосрочных энергетических стратегий и планирования с учетом специфики страны, направленных на применение соответствующих энергетических технологий для достижения нулевого уровня выбросов	United Nations Development Programme (2023) ⁴²
Углеродная нейтральность (Carbon neutrality)	состояние, достигаемое, когда неослабевающие выбросы ПГ (unabated GHG emissions) в границах субъекта компенсируются или уравниваются сокращениями выбросов, установленными в соответствии с признанными углеродными стандартами, на равную величину за пределами границ, для достижения нулевого статуса в течение определенного периода времени	Natural Capital Partners (2020) ⁴³
	такой способ производства, при котором суммарные выбросы углекислого газа в процессе производства нейтральны, т.е. равны нулю; не означает, что предприятия будут иметь нулевые выбросы углерода, а означает, что эти выбросы компенсируются, т.е. уравниваются	Becker (2020) ⁴⁴
«Чистый ноль» (Net zero)	состояние, при котором поступление ПГ в атмосферу уравнивается их удалением из атмосферы; его достижение означает сокращение выбросов ПГ и/или обеспечение того, чтобы любые продолжающиеся выбросы были сбалансированы поглощениями	University of Oxford (2023) ⁴⁵
Декарбонизация (Decarbonization)	процесс снижения углеродоемкости первичной энергии	Ausubel (1995) ⁴⁶
	процесс, в ходе которого страны или организации стремятся к созданию низкоуглеродной экономики или когда отдельные лица стремятся сократить потребление углерода	AR5 Synthesis Report: Climate Change (2014) (IPCC) ⁴⁷

Источник: составлено автором.

⁴¹ Report of the United Nations Conference on New and Renewable Sources of Energy, Nairobi, 10 to 21 August 1981. – New York: United Nations, 1981. – 126 p. – URL: <https://digitallibrary.un.org/record/25034?ln=en> (дата обращения: 30.03.2023).

⁴² Energy transition. United Nations Development Programme // Sustainable Energy Hub. – 2023. – URL: <https://www.undp.org/energy/our-work-areas/energy-transition> (дата обращения: 30.03.2023).

⁴³ The CarbonNeutral Protocol. The global standard for carbon neutral programmes // Natural Capital Partners. – 2020. – 75 p. – URL: https://www.carbonneutral.com/pdfs/The_CarbonNeutral_Protocol_Jan_2020.pdf (дата обращения: 30.03.2023)

⁴⁴ Becker S., Bouzdine-Chameeva T., Jaegler A. The carbon neutrality principle: A case study in the French spirits sector // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 274. – P. 122739. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122739.

⁴⁵ What is net zero? / University of Oxford. – 2023. – URL: <https://netzeroclimate.org/> (дата обращения: 04.04.2023).

⁴⁶ Ausubel J. H. Technical progress and climatic change // Energy Policy. – 1995. – Vol. 23. – Is. 4-5. – P. 411-416. – DOI: 10.1016/0301-4215(95)90166-5.

⁴⁷ Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC. – 2014. – 151 p. – URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf (дата обращения: 04.04.2023).

Следует также отметить, что в 2015 году Генеральная ассамблея ООН сформулировала 17 целей устойчивого развития (ЦУР ООН) (англ. Sustainable Development Goals, SDG), в том числе ЦУР 7 «Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех» и ЦУР 13 «Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями»⁴⁸. На данном этапе возникла необходимость обеспечения связки в решении климатической проблемы с достижением других провозглашённых ЦУР ООН, а также корректной расстановки приоритетов в рамках климатических вопросов и ЦУР⁴⁹.

Все ЦУР ООН имеют подзадачи, а также количественные измеримые показатели их достижения⁵⁰. Важным моментом в комбинации вышеупомянутых ЦУР 7 и ЦУР 13 является фактическая декларация о необходимости перехода на ВИЭ в мировом масштабе. Это приводит нас к такому понятию, как «энергетический переход», которое имеет ключевое значение для развития энергетики и промышленности, а также всего мира.

Официально термин «энергетический переход» был зафиксирован в итоговых документах конференции ООН по новым и возобновляемым источникам энергии в 1981 году (англ. Report of the United Nations Conference on New and Renewable Sources of Energy). В широком смысле этот термин стал применяться к процессу существенной трансформации энергетической системы и всей энергетической отрасли – как на уровне отдельного региона и страны, так и на глобальном уровне. Некоторые определения представлены в таблице 1.1.

МГЭИК не дает определения термину «энергетический переход» в глоссарии Шестого оценочного доклада «Изменение климата 2023» (англ. The

⁴⁸ Цели в области устойчивого развития // ООН: официальный сайт. – 2023. –

URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (дата обращения: 16.03.2023).

⁴⁹ Порфирьев Б. Н., Широков А. А. Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов: сценарии и реалии для России // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92. – № 5. – С. 415–423. – DOI: 10.31857/S086958732205005X.

⁵⁰ Работа Статистической комиссии, связанная с деятельностью по осуществлению Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года: резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей 6 июля 2017 года, A/RES/71/313 // Организация Объединенных Наций. – URL: <https://undocs.org/ru/A/RES/71/313> (дата обращения: 28.03.2023).

IPCC Sixth Assessment Report Climate Change 2023, AR6)⁵¹, но определяет его как процесс перехода от одного состояния или условия к другому за определённый период времени. Можно также определить, что энергетический переход – это «изменение структуры первичного энергопотребления и постепенный переход от существующей схемы энергоснабжения к новому состоянию энергетической системы»⁵². Подробно процесс изменения энергетического баланса и смещения фокуса с одних источников энергии на другие рассматривал в своих работах Вацлав Смил (Vaclav Smil)^{53,54}.

В целом, переход с растительного биотоплива (дрова, древесный уголь) на каменный уголь называют первым энергетическим переходом (XIX в.). Следующие два – это переход с каменного угля на использование нефти (XX в.) и далее с нефти на природный газ (конец XX в.). То, что наблюдается сейчас, называют четвёртым энергетическим переходом – это переход от традиционных видов ископаемого топлива к использованию ВИЭ. Именно такая трактовка широко распространена в настоящее время. Фактически это говорит о том, что человечество в рамках четвёртого энергетического перехода должно отказаться от традиционных ископаемых источников энергии, таких как уголь, газ и нефтепродукты. С учетом того, что они обеспечивают около 82 % мировой первичной энергии (2021)⁵⁵, такой отказ влечет за собой перестройку и изменение всей энергетической и части промышленных систем. Эксперты отмечают, что для достижения нулевого уровня выбросов ПГ к 2050 году 60 % мирового

⁵¹ Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC. – 2023. – P. 35-115. – DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

⁵² Сергеева З. В. Четвертый энергетический переход и европейский энергетический кризис: уроки для ЕАЭС // Евразийская интеграция: экономика, право, политика. – 2023. – Т. 17. – № 2. – С. 153–168. – DOI: 10.22394/2073-2929-2023-02-153-168.

⁵³ Smil V. Examining energy transitions: A dozen insights based on performance // Energy Research & Social Science. – 2016. – Vol. 22. – P. 194-197. – DOI: 10.1016/j.erss.2016.08.017.

⁵⁴ Smil V. Energy Transitions: History, Requirements, Prospects / V. Smil. – Praeger. ABC-CLIO, 2010. – 192 p. – URL: publisher.abc-clio.com/9780313381782 (дата обращения: 29.03.2023).

⁵⁵ BP Statistical Review of World Energy 2022: 71st edition // BP. – 2022. – 57 p. – URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf?ysclid=lvwvzx4lyj399425678> (дата обращения: 01.06.2023).

энергоснабжения должно приходиться на экологически чистую энергию⁵⁶, что на сегодня является практически нереализуемой задачей.

Обратимся также к понятиям углеродной нейтральности и декарбонизации как ключевым в рамках решения климатических вопросов.

Существуют различные определения и трактовки сущности концепции углеродной нейтральности (carbon neutrality) и нулевых выбросов (net-zero emission, net-zero).

В общем виде под углеродной нейтральностью подразумевается система достижения баланса между антропогенными выбросами ПГ из различных источников и удалением этого ПГ из атмосферы поглотителями (естественными или искусственными). Таким образом система «уравновешивается в ноль» по выбросам, и это получило название «чистого нуля». Под «чистым нулем» понимается состояние, при котором поступление ПГ в атмосферу уравновешивается их удалением из атмосферы⁵⁷. Следует отметить, что в данном случае выбросы ПГ присутствуют, они не равны нулю, а равны объёмам поглощения ПГ из атмосферы. Некоторые исследователи под «чистым нулем» понимают нейтральность между выбросами CO₂, связанными с энергетикой, и удалением CO₂ из атмосферы⁵⁸.

В Парижском соглашении по климату подчёркивается необходимость достижения «чистого нуля». Это требует от государств «достичь баланса между антропогенными выбросами из источников и абсорбцией поглотителями ПГ во второй половине этого века»⁵⁹. Можно отметить, что большая часть исследователей и экспертов не разделяют понятия углеродной нейтральности и «чистого нуля» (см. таблицу 1.1).

Вместе с тем, встречается и такая позиция, что «чистый ноль» предполагает достижение баланса только за счет естественных поглотителей, в то время как нейтральность допускает и искусственные. Согласно более распространённой,

⁵⁶ Building an Energy Future that Is Clean, Affordable & Reliable // World Resource Institute. – 2023. – URL: <https://www.wri.org/energy> (дата обращения: 01.04.2023).

⁵⁷ What is net zero? // University of Oxford. – 2023. – URL: <https://netzeroclimate.org/> (дата обращения: 04.04.2023).

⁵⁸ Oshiro K., Masui T., Kainuma M. Transformation of Japan's energy system to attain net-zero emission by 2050 // Carbon Management. – 2018. – Vol. 9. – Is. 5. – P. 493–501. – DOI: 10.1080/17583004.2017.1396842.

⁵⁹ What is net zero? // University of Oxford. – 2023. – URL: <https://netzeroclimate.org/> (дата обращения: 04.04.2023).

чем предыдущая, позиции разница между «чистым нулем» и углеродной нейтральностью заключается в том, что чистый ноль отсылается ко всем ПГ, а нейтральность фокусируется именно на CO₂.

В рамках данной работы под углеродной нейтральностью подразумевается система достижения «чистого нуля», то есть баланса между антропогенными выбросами ПГ из различных источников и удалением этих ПГ из атмосферы поглотителями (естественными или искусственными).

Для достижения такого баланса выделяют различные меры, среди которых можно выделить три группы, представленные на рисунке 1.2. Представленные группы мер работают непосредственно с выбросами ПГ (группы 1 и 3) или с концентрацией CO₂ в атмосфере (группа 2). Так, группа 1 – это меры по предотвращению попадания уже образовавшихся в результате энергетических и промышленных процессов выбросов ПГ в атмосферу, а группа 3 – это меры, нацеленные на сокращение образования ПГ, т.е. на «отказ» от образования определённой массы выбросов («избегание» выбросов) за счет совершенствования действующих процессов и внедрения новых. Группа 2 представляет меры, нацеленные на прямое удаление CO₂ из атмосферы. Отдельная группа мер, не представленная на рисунке 1.2, – это меры компенсационного характера. Основными механизмами реализации таких мер выступают собственные природные проекты (сохранение и восстановление текущих лесов, посадка новых лесов, развитие морской фауны и др.) или операции на рынке углеродных единиц. Меры компенсационного характера находятся вне фокуса данной работы.

В конечном счёте, целью всех этих мер является достижение общей углеродной нейтральности, что приводит к желаемому «нулю». Можно привести следующий пример на уровне промышленной компании. Чтобы компенсировать свою эмиссию ПГ, оставшуюся уже после того, как применены доступные меры, компания может самостоятельно заниматься лесовосстановлением или финансировать другие низкоуглеродные проекты по эквивалентной «экономии углерода».

Группа 1. Меры по предотвращению выбросов ПГ в атмосферу	Группа 2. Меры по "удалению" ПГ из атмосферы	Группа 3. Меры по "избеганию" выбросов ПГ в атмосферу
<ul style="list-style-type: none"> • Цель: предотвратить попадание уже образовавшихся выбросов ПГ в атмосферу, уменьшить которые другими способами сложно / не представляется возможным • Примеры: Комплекс технологий улавливания, хранения и использования углерода (УХУ) 	<ul style="list-style-type: none"> • Цель: удалить углерод напрямую из атмосферы с целью снижения концентрации в ней углекислого газа • Примеры: Технологии прямого улавливания CO₂ из атмосферы – DAC (англ. Direct air capturing). Поглощение CO₂ из атмосферы естественным путём 	<ul style="list-style-type: none"> • Цель: снизить образование углекислого газа при различных процессах за счёт изменения этих процессов • Примеры: Повышение энергоэффективности. Использование ВИЭ

Рисунок 1.2 – Группы мер декарбонизации и достижения углеродной нейтральности

Источник: составлено автором.

Гипотетически достижение углеродной нейтральности возможно в том случае, если в глобальном масштабе на уровне различных субъектов экономики принимаются меры по удалению из атмосферы такого количества CO₂, которое они в совокупности в атмосферу выбрасывают. Все это описывается простым с виду, но сложным для реализации равенством (см. формулу 1.1).

$$\text{Выброс CO}_2 = \text{Удаление CO}_2 \text{ (англ. CO}_2 \text{ emitted} = \text{CO}_2 \text{ removed)} \quad (1.1)$$

При достижении углеродной нейтральности ключевая роль отводится сокращению выбросов ПГ, то есть процессам декарбонизации. Чем меньше ПГ выбрасывается – тем меньше нужно поглощать из атмосферы для достижения желаемого баланса.

Первое упоминание декарбонизации в контексте климатической проблемы в научной литературе связывают со статьей, автором которой является Ausubel

(1995)⁶⁰. Ученый называет ее процессом снижения углеродоемкости первичной энергии. Более поздние определения можно встретить в отчетах МГЭИК, где сказано, что декарбонизация — это процесс, направленный на низкоуглеродную экономику, при котором страны или организации сокращают потребление углеродной энергии⁶¹.

Декарбонизация в общем виде представляет собой комплекс мер по сокращению выбросов ПГ в атмосферу и именно в данном значении будет рассматриваться в контексте данной работы. Как правило, речь идет о сокращении выбросов CO₂, связанных с энергетикой, промышленностью и транспортом⁶².

В свою очередь, в рамках данной работы вводится понятие «декарбонизации промышленных систем», которая представляет собой планомерное сокращение выбросов ПГ на уровне рассматриваемой системы (промышленного объекта, компании, комплекса) посредством реализации мер, направленных на предотвращение и/или «избегание» выбросов ПГ, подразумевающей выстраивание системы управления декарбонизационной деятельностью и внедрение конкретных доступных решений, направленных на снижение выбросов ПГ⁶³.

В научной литературе представлено мнение о том, что низкоуглеродное развитие следует рассматривать больше как концептуальное видение движения к нулевым выбросам, а декарбонизацию — как подход к их достижению⁶⁴. В целом, данное утверждение соотносится с позицией, принятой в настоящей работе, где декарбонизация рассматривается как комплекс конкретных видов

⁶⁰ Ausubel J. H. Technical progress and climatic change // *Energy Policy*. – 1995. – Vol. 23. – Is. 4-5. – P. 411-416. – DOI: 10.1016/0301-4215(95)90166-5.

⁶¹ Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / IPCC. – 2014. – 151 p. – URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf (дата обращения: 04.04.2023).

⁶² Wimbadi R. W., Djalante R. From decarbonization to low carbon development and transition: A systematic literature review of the conceptualization of moving toward net-zero carbon dioxide emission (1995–2019) // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 256: 120307. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120307.

⁶³ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // *Инновации и инвестиции*. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

⁶⁴ Wimbadi R. W., Djalante R. From decarbonization to low carbon development and transition: A systematic literature review of the conceptualization of moving toward net-zero carbon dioxide emission (1995–2019) // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 256: 120307. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120307

деятельности на уровне промышленной системы, направленный на сокращение выбросов ПГ.

Декарбонизация – это сложный, комплексный процесс, реализация которого требует совместных скоординированных усилий на уровне отдельных стран, национальных экономик, отраслей и комплексов, промышленных компаний и отдельных субъектов.

Существует множество взглядов на то, что такое декарбонизация. Если рассматривать этот процесс в общем, то к основным укрупнённым направлениям декарбонизации промышленных систем можно отнести следующие⁶⁵:

- 1) переход на низкоуглеродные источники энергии (использование ВИЭ, низкоуглеродного топлива и сырья, электрификация производственных объектов);
- 2) совершенствование операционной деятельности (в том числе повышение энергоэффективности);
- 3) реализация водородных инициатив и проектов;
- 4) применение различных методов на корпоративном уровне (оптимизация портфеля активов и взаимоотношений с поставщиками и подрядчиками и др.);
- 5) комплекс технологий улавливания, хранения и использования углерода (далее – улавливание и хранение углерода, УХУ; англ. – carbon capture and storage (CCS), carbon capture, utilization and storage (CCUS)) и др.

Выделяют и другие направления декарбонизации, характерные для отдельных секторов и отраслей в силу специфики деятельности, в том числе в части технологического процесса. Например, в рамках организации деятельности по декарбонизации нефтегазовых компаний можно выделить такое направление, как работа с попутными компонентами и отходами производства. К этому направлению можно отнести утилизацию попутного нефтяного газа (ПНГ), обращение с промышленными отходами и углекислым газом.

При этом, по мнению экспертов, наибольший потенциал по снижению выбросов ПГ имеют такие направления, как повышение энергоэффективности

⁶⁵ Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России // Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. – 2021. – 158 с. – URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Decarbonization_of_oil_and_gas_RU_22032021.pdf (дата обращения: 05.04.2023).

и максимально возможный переход на «безуглеродные» энергоносители (в том числе ВИЭ, «зеленый» водород и пр.)⁶⁶. Но есть и ряд специфичных рекомендаций для отдельных стран и случаев в части сокращения и компенсации выбросов ПГ, таких как увеличение поглотительной способности лесов и других экосистем, развитие технологий улавливания и хранения углерода и ряд других. Приведённые примеры таких рекомендаций актуальны для условий России^{67,68}.

Так, сегодня под устойчивым развитием понимается целостная комплексная концепция достижения мирового благополучия, и важная роль в этой системе отводится низкоуглеродному развитию и декарбонизации на всех уровнях. Особая роль в обеспечении вклада в достижение ЦУР ООН и теперь уже поставленных на различных уровнях целей по снижению выбросов ПГ (целей по декарбонизации) принадлежит крупнейшим компаниям ресурсоёмких отраслей экономики, которые обладают наибольшей степенью ответственности за использование человеческих и природных ресурсов планеты⁶⁹. В этой связи, для достижения таких целей в глобальном масштабе устойчивому развитию и декарбонизации именно промышленных систем в мировом масштабе отводится ведущее место. По мнению экспертов, сегодня именно декарбонизация экономики и энергетики выступает в качестве одного из ключевых направлений и механизмов реализации климатической политики⁷⁰. Вместе с тем, необходимо понимать, что декарбонизация – это конкретные виды деятельности, которые осуществляются на уровне хозяйствующих субъектов. Обратимся к методическим и организационно-управленческим аспектам декарбонизации промышленных систем.

⁶⁶ Сафонов Г. Декарбонизация мировой экономики и Россия // Нефтегазовая вертикаль. – 2020. – № 21-22. – С. 66-70.

⁶⁷ Ветрова М. А., Пахомова Н. В., Рихтер К. К. Стратегии развития российской энергетики в условиях климатических вызовов и геополитической нестабильности // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2023. – Т. 39, № 4. – С. 439-469. – DOI 10.21638/spbu05.2023.401.

⁶⁸ Кудрявцева О. В., Ситкина К. С., Барабошкина А. В. Индикаторы перехода России к низкоуглеродному развитию // География и природные ресурсы. – 2023. – Т. 44. – № 3. – С. 144-155. – DOI 10.15372/GIPR20230315.

⁶⁹ SDG Compass – A Guide for Business Action to Advance the Sustainable Development Goals. – 2022. – URL: <https://sdgcompass.org/> (дата обращения: 29.03.2022).

⁷⁰ Порфирьев Б. Н. Декарбонизация versus адаптация экономики к климатическим изменениям в стратегии устойчивого развития // Проблемы прогнозирования. – 2022. – №4. – С. 45-54. – DOI: 10.47711/0868-6351-193-45-54.

1.2 Декарбонизация промышленных систем: подходы к управлению выбросами ПГ и основы терминологической систематики

Согласно данным Института мировых ресурсов (англ. World Resources Institute, WRI), на долю энергетики уже приходится около 73 % выбросов ПГ в мировом масштабе, а к 2030 году спрос на энергию вырастет почти на 10 %⁷¹. Как было отмечено выше, в 2015 году 195 стран, в том числе Россия, стали сторонами Парижского соглашения по климату⁷². Эксперты называют это событие поворотным моментом в климатическом вопросе. Поставленная цель – ограничение роста температуры Земли в пределах 1,5°C; однако, по заявлениям экспертов, в текущих реалиях уровень потепления может достигнуть 3-5°C к концу столетия⁷³. Целевой показатель ограничения роста температуры, в свою очередь, определяет величину доступного глобального углеродного бюджета – это будущий максимальный объем совокупных глобальных антропогенных выбросов ПГ. В 2022 году оставшийся углеродный бюджет для 50 %-ной вероятности ограничения глобального потепления до 1,5°C был определен на уровне 380 млрд т CO₂-экв., что означает, что при текущем уровне выбросов бюджет будет исчерпан примерно через 9 лет⁷⁴. В этой связи считается, что в ближайшем будущем по всему миру должны быть предприняты серьёзные шаги по сокращению выбросов ПГ.

В рамках решения обозначенных выше проблем одни ученые и эксперты предлагают «остановить» добычу полезных ископаемых, которые в дальнейшем используются для получения энергии, а эти процессы, как известно, связаны с существенными выбросами ПГ, и совершить полный переход на ВИЭ.

⁷¹ Building an Energy Future that Is Clean, Affordable & Reliable // World Resource Institute. – 2023. – URL: <https://www.wri.org/energy> (дата обращения: 01.04.2023).

⁷² Парижское соглашение к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата от 12 декабря 2015 г., TIAS № 16-1104 // Организация Объединенных Наций. – URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf (дата обращения: 04.04.2022).

⁷³ Robiou du Pont Y., Meinshausen M. Warming assessment of the bottom-up Paris Agreement emissions pledges // Nature Communications. – 2018. – Vol. 9 (1). – P. 4810. – DOI: 10.1038/s41467-018-07223-9.

⁷⁴ Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M. W., Zaehle S., Zeng J., Zheng B. Global Carbon Budget 2022 // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14. – Is. 11. – P. 4811–4900. – DOI: 10.5194/essd-14-4811-2022.

Но, по мнению большинства экспертов, в настоящее время это не осуществимо на практике. Масштаб задачи огромен, и в ближайшем будущем совершить полный отказ от использования традиционных источников энергии не представляется возможным. В этой связи все больше внимания привлекают такие решения, которые позволяют двигаться к углеродной нейтральности постепенно, без радикальных изменений в промышленных и энергетических системах и процессах.

Для реализации стратегий по снижению выбросов ПГ (стратегий декарбонизации) на уровне компаний первоочередной задачей является проведение учёта выбросов ПГ. Для управления каким-либо параметром необходимы количественная оценка его текущего состояния, а также актуальные сведения и их динамика. Это определяет критическую важность ведения ежегодной отчетности о выбросах ПГ на уровне компаний для решения климатических задач в глобальном масштабе⁷⁵.

Необходимо отметить, что согласно Приказу Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» «количественное определение объемов выбросов ПГ осуществляется в целом по организациям либо для одного или нескольких ее структурных подразделений, объединенных в единую производственную цепочку. Во всех случаях границы количественного определения и критерии их выбора должны быть точно и однозначно определены»⁷⁶.

Под учетом выбросов ПГ подразумевают процесс, в результате которого компании определяют количество своих выбросов ПГ для понимания и оценки воздействия, которое они оказывают на климат, и постановки целей

⁷⁵ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

⁷⁶ Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (дата обращения: 01.03.2023).

по ограничению эмиссии⁷⁷. Компании сталкиваются с достаточно серьёзным давлением по данному вопросу на международном и национальном уровнях. Помимо нормативного и политического давления, компании также могут столкнуться с давлением со стороны инвесторов, общества и других стейкхолдеров.

На сегодняшний день существует два типа углеродной отчетности: добровольная и обязательная. Добровольная отчетность, как следует из определения, подготавливается на усмотрение самой компании, в то время как обязательная регулируется соответствующими органами. Можно выделить три основных подхода, используемых в мировой практике к применению обязательной углеродной отчетности (см. таблицу 1.2)⁷⁸.

Таблица 1.2 – Подходы к применению обязательной углеродной отчетности

Название подхода	Сущность	Примеры
Отраслевой	Отчётность применяется к определенным секторам с потенциально высокими объемами выбросов ПГ.	США, производство электроэнергии, химическая промышленность
Пороговый	Отчётность применяется к компаниям, у которых объемы выбросов ПГ, потребление ископаемого топлива или объем производства превышают определенный порог; не зависит от сектора.	Канада, все предприятия с объемами выбросов ПГ более 50 тыс. т CO ₂ -экв. в год
Корпоративный	Отчётность применяется к определенным типам компаний, выделенным по различным критериям (количество сотрудников, организационно-правовая форма и пр.).	Франция, компании с 500 сотрудниками и более. Великобритания, публичные компании

Источник: составлено автором с использованием

Borie S., Decq J. Review of voluntary and regulatory carbon reporting by companies around the world // Carbon 4. – 2023. – 10 p. – URL: <https://www.carbone4.com/files/wp-content/uploads/2016/09/CARBONE4-carbon-reporting-by-companies-around-the-world-EN.pdf> (дата обращения: 01.03.2023).

⁷⁷ Peterdy K. Carbon Accounting. Creating an inventory for, and calculation of, an organization's scope 1, 2, and 3 greenhouse gas emissions // Corporate Finance Institute. – 2023. – URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/esg/carbon-accounting/> (дата обращения: 01.03.2023).

⁷⁸ Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

В России начинает внедряться пороговый подход к обязательной углеродной отчетности. В 2021 году Правительство РФ утвердило вышеупомянутую Стратегию с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 г., согласно которой первостепенную важность приобретает «создание стимулов и условий для переориентации потоков капитала на финансирование устойчивого экологического, социального и экономического развития страны»⁷⁹. В том же году вышел Федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов», в соответствии с которым юридические лица и индивидуальные предприниматели, масса выбросов которых составляет 150 тыс. т CO₂-экв. в год и более, обязаны впервые предоставить отчеты о выбросах в срок до 1 июля 2023 года. За непредоставление отчётности предусмотрены административные штрафы, а за превышение квоты выбросов – плата в рамках эксперимента по их сокращению. С 2025 года закон также начнет распространяться на организации с уровнем выбросов 50 тыс. т CO₂-экв. в год и более. Для содействия практике углеродной отчётности с 1 марта 2023 года в России вступила в силу новая методика по определению количества выбросов, производимых отдельными компаниями⁸⁰.

Помимо этого, различные международные организации разрабатывают руководства по учету выбросов ПГ с целью стандартизации применяемых на практике подходов⁸¹. Можно выделить стандарты Протокола по парниковым газам (англ. Greenhouse Gas Protocol, GHG Protocol), рекомендации Глобальной инициативы по отчетности (англ. Global Reporting Initiative, GRI), стандарты Международной организации по стандартизации (ISO), отраслевые рекомендации по отчетности, например руководство Американского института нефти (англ. The American Petroleum Institute, API) по расчету выбросов ПГ для нефтегазовой

⁷⁹ Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 г. № 3052-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 08.11.2021 г.

⁸⁰ Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (дата обращения: 01.03.2023).

⁸¹ Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310

промышленности, и др. Общий анализ международных и отечественного подходов к учету выбросов ПГ приводит к выводу о том, что в международной практике на сегодня подходы являются более проработанными и стандартизированными, а также направлены на учет более широкого перечня источников выбросов ПГ⁸².

Мировым стандартом по углеродной отчетности признаны стандарты Протокола по парниковым газам (GHG Protocol), далее – Протокол. Практически все крупные промышленные компании ориентируются именно на него. Согласно данному Протоколу, выбросы ПГ в самом общем виде делятся на три сферы охвата – сфера охвата 1, 2 и 3 (англ. Scope 1, 2, 3), по которым, в свою очередь, осуществляется учёт CO₂-экв. выбросов. Характеристика сфер охвата представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Характеристика сфер охвата учёта эмиссии ПГ

Сфера	Характеристика
Сфера охвата 1 – прямая эмиссия (Scope 1)	Выбросы ПГ, которые образуются из источников, находящихся в непосредственном владении или управлении компании. Это эмиссия от сжигания топлива в котлах, печах, на транспорте и прочем, а также выбросы ПГ от химического производства и других технологических процессов, управлением которыми занимается непосредственно компания. То есть это прямые выбросы, образующиеся в результате деятельности компании.
Сфера охвата 2 – непрямая энергетическая эмиссия (Scope 2)	Выбросы ПГ, связанные с потреблением энергии из источников, которые не находятся в собственности компании. Например, использование электричества от сторонней электростанции, тепловой энергии от котельной и т.д. То есть это не прямые выбросы, которые находятся за пределами непосредственного контроля компании и зависят от углеродоемкости генерации энергии поставщиком.
Сфера охвата 3 – прочая непрямая эмиссия (Scope 3)	Выбросы ПГ, которые происходят от источников, находящихся вне компании, но непосредственно связаны с её деятельностью, включая использование продуктов, которые производит данная компания. То есть это не прямые выбросы, происходящие в других секторах, но связанные с деятельностью компании.

Источник: The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard // World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. – 2004. – 112 p. – URL: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard> (дата обращения: 05.04.2023).

⁸² Шевелева Н. А. Направления и методы декарбонизации нефтегазового сектора // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2023. – Т. 2. – № 311. – С. 25-31. – DOI: 10.33285/2411-7013-2023-2(311)-25-31.

Как видно из таблицы 1.3, сферы охвата 1 и 2 относятся к процессам внутри компании, которые можно напрямую контролировать за счёт совершенствования технологических процессов, модернизации оборудования, изменения бизнес-процессов, пересмотра инвестиционной политики в сторону большего сокращения выбросов ПГ и т.п. Сфера 3 связана с выбросами ПГ, происходящими от процессов вне компании, и многие эксперты называют данную сферу самой проблемной. В случае нефтегазовых компаний наибольшая эмиссия приходится как раз на сферу охвата 3 (эмиссия от использования продуктов компании)⁸³.

Согласно Протоколу, обязательному учёту подлежат выбросы только по сферам охвата 1 и 2⁸⁴. Это связано с тем, что на процессы, сопряжённые с выбросами ПГ по этим двум сферам, компания может влиять напрямую, совершенствуя внутренние технологические и бизнес-процессы. Сфера охвата 3 относится к процессам, которые полностью проходят вне сферы влияния компании и связаны с ней косвенно. В этой связи данная сфера является «факультативной» с точки зрения отчётности. По сфере охвата 3 был выпущен отдельный документ, который приводит основные подходы к организации учёта такой эмиссии, – Стандарт отчётности о выбросах парниковых газов по цепочке поставок (англ. The Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard)⁸⁵. Вместе с тем, компании могут разрабатывать свои внутренние стандарты учета таких выбросов. Учёт по данной сфере охвата представляет собой некую попытку определения углеродного следа по всей цепочке создания стоимости продукции. Касательно этого вопроса, следует отметить, что, во-первых, отчётность компаний по сфере охвата 3 является необязательной, а, во-вторых, компании фактически сами выбирают, какие непрямые выбросы учитывать. В этой связи исследование такого вопроса на данном этапе развития

⁸³ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

⁸⁴ The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard // World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. – 2004. – 112 p. – URL: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard> (дата обращения: 05.04.2023).

⁸⁵ The Greenhouse Gas Protocol. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard // World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. – 148 p. – URL: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf (дата обращения: 05.04.2023).

методов и принципов учета выбросов ПГ затруднено, а по большей части аспектов невозможно⁸⁶.

На рисунке 1.3 представлены основные виды выбросов ПГ промышленных компаний с разделением непрямых выбросов на нисходящий и восходящий потоки. К восходящему потоку относится вся эмиссия ПГ, которая включена в товары и услуги, приобретённые компанией до того, как произведён продукт или оказана услуга (за исключением энергетических ресурсов от сторонних поставщиков, которые входят в сферу охвата 2). К нисходящему потоку относятся выбросы, связанные с проданными товарами или оказанными услугами, – эта эмиссия возникает, когда продукт или услуга «покидают» компанию.

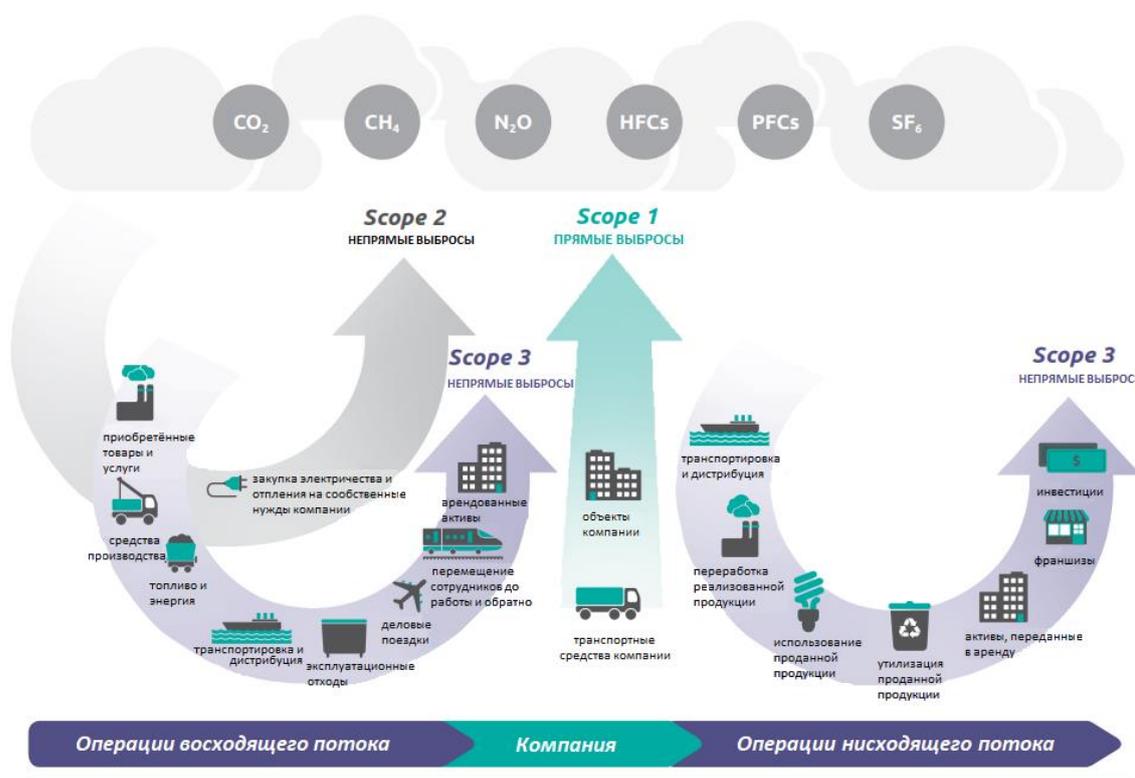


Рисунок 1.3 – Обзор сфер охвата и выбросов по цепочке создания стоимости КОМПАНИИ

Источник: The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard // World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. – 2004. – 112 p. – URL: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard> (дата обращения: 05.04.2023).

⁸⁶ Данилин К. П., Череповицына А. А., Белошицкий А. В. Об отчетности нефтегазовых компаний о выбросах парниковых газов по сфере охвата 3 // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 5. – С. 139-144. – DOI: 10.24887/0028-2448-2023-5-139-144.

С точки зрения учета и управления выбросами ПГ, наиболее понятной и управляемой на уровне промышленной компании является сфера охвата 1 (прямые выбросы). Учет и управление выбросами ПГ, которые происходят вне прямого контроля компании (сферы охвата 2 и 3), вызывают достаточно много вопросов как в методическом, так и в практическом плане. Все это требует понимания особенностей использования конечного продукта и применения общепринятой методологии отчетности. Однако реальность такова, что применяемые методологии публичной углеродной отчетности продолжают различаться, и сферы охвата, за которые компании готовы брать ответственность и которыми они готовы управлять, разные^{87,88}.

Если обратиться к тому, что подразумевается под стратегиями декарбонизации, обычно выделяют три основных направления, а именно:

- 1) повышение энергосбережения и энергоэффективности;
- 2) повышение операционной эффективности бизнеса на различных этапах производственной цепочки;
- 3) замещение ископаемого топлива ВИЭ и другими низкоуглеродными источниками энергии.

Данные направления в большинстве своем согласуются с теми, которые определяются такими организациями и органами государственной власти, как МГЭИК, Министерство энергетики США (англ. United States Department of Energy, DOE), Европейская комиссия (European Commission) (см. рисунок 1.4).

⁸⁷ Kenner D., Heede R. White knights, or horsemen of the apocalypse? Prospects for Big Oil to align emissions with a 1.5°C pathway // Energy Research & Social Science. – 2021. – Vol. 79: 102049. – DOI: 10.1016/j.erss.2021.102049.

⁸⁸ Green J., Hadden J., Hale T., Mahdavi P. Transition, hedge, or resist? Understanding political and economic behavior toward decarbonization in the oil and gas industry // Review of International Political Economy. – 2022. – Vol. 29 (6). – P. 2036-2063. – DOI: 10.1080/09692290.2021.1946708.



Рисунок 1.4 – Основные направления декарбонизационной деятельности, определяемые различными организациями

Источник: Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

Стоит отметить, что, например, МГЭИК выделяет общепризнанные направления, связанные с повышением энергоэффективности и электрификацией⁸⁹. Вместе с тем, отмечается, что сокращение использования традиционных ископаемых видов топлива должно развиваться синхронно с увеличением использования альтернативных видов для сбалансированного и устойчивого развития энергетических и промышленных систем по всему миру.

Министерство энергетики США⁹⁰, помимо энергоэффективности, также выделяет электрификацию, но применительно к промышленности.

⁸⁹ Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC. – 2022. – 2029 p. – URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/> (дата обращения: 15.04.2023).

⁹⁰ DOE Industrial Decarbonization Roadmap // U.S. Department of Energy. – 2023. – URL: [https://www.energy.gov/eere/industrial-decarbonization-roadmap#:~:text=The%20crosscutting%20decarbonization%20pillars%20are,%2C%20and%20storage%20\(CCUS\)](https://www.energy.gov/eere/industrial-decarbonization-roadmap#:~:text=The%20crosscutting%20decarbonization%20pillars%20are,%2C%20and%20storage%20(CCUS)) (дата обращения: 01.03.2023).

Низкоуглеродные источники энергии, а также топливо и сырье – также в фокусе декарбонизационной деятельности, согласно представленным в открытом доступе материалам. Кроме того, Министерство энергетики США выделяет в качестве одного из основных направлений декарбонизации технологии УХУ, что можно объяснить, прежде всего, тем, что США являются лидером по развитию технологий и проектов, направленных на улавливание и использование техногенного углекислого газа.

Европейская комиссия выделяет два основных направления декарбонизации – энергоэффективность и электрификацию энергетики, где последняя рассматривается как направление именно в контексте перехода на ВИЭ.

Все это представляет собой общие направления для осуществления конкретных действий, связанных с декарбонизационной деятельностью. Так, применительно к промышленным компаниям, работа в рамках выбранных направлений декарбонизации осуществляется через поиск, оценку, обоснование и реализацию конкретных возможных решений, направленных на снижение выбросов ПГ. Такие конкретные решения в научной литературе, материалах профильных аналитических агентств и организаций обычно называют «методы декарбонизации», «опции декарбонизации», «технологии декарбонизации». Однако проведенный в рамках работы анализ литературы позволяет сделать вывод о том, что употребление данных понятий в различных контекстах зачастую носит интуитивный характер. Так, конкретные технологические решения на промышленных производствах ставятся на один уровень с решениями стратегического характера и целыми декарбонизационными стратегиями. С научной точки зрения это является предпосылкой для разработки подхода к упорядочиванию данных категорий⁹¹.

Проведённое исследование позволяет сделать вывод о том, что применительно к декарбонизационной деятельности такие понятия, как «опция декарбонизации» и «метод декарбонизации» можно признать комплементарными,

⁹¹ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

в то время как понятия «технологии» и «техники» – это понятия более низкого уровня. Они, в общем случае, представляют собой конкретные технологии и технические решения, определяющие способ реализации «опций декарбонизации».

Вышеизложенное позволяет определить следующие основы терминологической систематики иерархического характера применительно к деятельности по декарбонизации промышленных систем (см. таблицу 1.4)⁹².

Таблица 1.4 – Декарбонизация промышленных систем: основы терминологической систематики

Категория	Сущность	Соотношение с другими категориями
Направление декарбонизации	Сфера или область, в рамках которой осуществляется деятельность по декарбонизации; основано на наборе принципов декарбонизации и движении к общей цели; определяет конкретное направление деятельности по декарбонизации и его специализацию.	Является основой общего вектора развития промышленной системы по вопросам декарбонизации; определяет основные цели и задачи. Состоит из группы опций и конкретных опций декарбонизации. Может охватывать несколько групп опций.
Группа опций декарбонизации	Совокупность опций, удовлетворяющая специальным условиям; имеет общую цель и принципы действия; направлена на решение конкретной задачи в рамках декарбонизационных процессов.	Является основой реализации действий в рамках направления декарбонизации. Состоит из конкретных опций декарбонизации.
Опции декарбонизации	Конкретные приёмы и инструменты (в совокупности – методы), доступные для внедрения в рамках группы опций декарбонизации для решения частных задач.	Являются основой групп опций декарбонизации. Комплементарны с понятием «методы декарбонизации». Состоят из набора конкретных технологий.
Технологии декарбонизации	Совокупность конкретных технико-технологических решений и техник, определяющих способ реализации опций декарбонизации.	Являются основой опций декарбонизации. Комплементарны с понятием «техники декарбонизации». Состоят из набора конкретных решений и техник.

Источник: составлено автором.

⁹² Там же.

Таким образом, в рамках работы определено, что направление декарбонизации представляет собой общий вектор решения задач декарбонизационной деятельности. Примером направления может служить совершенствование операционной деятельности на уровне компании. Группы опций направлены на решение конкретных задач декарбонизации. Например, в рамках совершенствования операционной деятельности на уровне компании можно выделить такую группу опций, как повышение энергоэффективности. В рамках повышения энергоэффективности уже выделяются конкретные опции и технологии декарбонизации, которые позволяют этого повышения достигать.

В целом, можно резюмировать, что направления и группы опций декарбонизации определяют общие цели и задачи по декарбонизации, а конкретные опции и технологии представляют собой средства для их достижения⁹³.

1.3 Направления и существенные вопросы декарбонизации мировой и российской промышленности

В исследованиях и материалах практико-ориентированного характера по теме предлагаются различные подходы к разделению основных вариантов декарбонизации по направлениям. Например, Международное энергетическое агентство (МЭА) (англ. International Energy Agency, IEA) предлагает ориентироваться на следующие направления^{94,95}, развитие которых может внести существенный вклад в снижение выбросов ПГ:

⁹³ Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310

⁹⁴ Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector // International Energy Agency. – 2021. – 222 p. – URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf (дата обращения: 01.03.2023).

⁹⁵ Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310

1) энергоэффективность – внедрение эффективных (рациональных) с точки зрения использования энергетических ресурсов решений в промышленном секторе, а также для зданий, транспортных средств, индивидуальных домохозяйств и т.д.;

2) изменение потребительского поведения – внедрение решений, направленных на сокращение использования энергии на индивидуальном уровне, например замена поездок на автомобиле поездками на общественном транспорте, велосипеде, самокате, отказ от дальних перелётов, экономия потребления энергии в домах и т.д.;

3) электрификация – замена традиционных источников энергии на электрическую энергию там, где ранее доминировало ископаемое топливо (электромобили, электропечи для производства стали и т.д.);

4) ВИЭ – использование технологий получения возобновляемой энергии, таких как солнечная и ветровая, которые, по заявлениям МЭА, являются ключевыми при снижении выбросов ПГ в энергетике;

5) водород – использование водородного топлива на судах и в самолётах, а также применение водорода в тяжелой промышленности, такой как сталелитейная и химическая;

6) биоэнергетика – использование топлива с низким уровнем выбросов ПГ для самолетов, судов и других видов транспорта, а также замена природного газа биометаном для отопления и электроснабжения объектов;

7) комплекс технологий УХУ – предотвращение выбросов существующих промышленных и энергетических объектов, имеющих ограниченный потенциал декарбонизации иными способами, а также удаление части CO₂ напрямую из атмосферы (англ. direct air capturing, DAC).

Направления, определяемые в ряде источников как необходимые для декарбонизации именно промышленного сектора, зачастую являются схожими с рассмотренными выше⁹⁶ – это 1) изменение поведения потребителей и контроль

⁹⁶ Башмаков И. А. Декарбонизация глобальной и российской промышленности и низкоуглеродное регулирование / Семинар ИМЭМО РАН и ЦЭНЭФ-XXI «Декарбонизация глобальной и российской промышленности и низкоуглеродное регулирование». – 2022. – URL: <https://cenef->

за уровнем потребления; 2) снижение материалоёмкости и рост использования вторичных ресурсов; 3) повышение энергоэффективности; 4) электрификация во всех отраслях; 5) использование низкоуглеродной электроэнергии; 6) использование возобновляемой тепловой энергии, биомассы и водорода; 7) применение технологии УХУ.

Направления декарбонизации более специфического характера, адаптированные под нужды конкретных отраслей, также рассмотрены в ряде источников. Так, например, основные направления снижения выбросов ПГ в нефтегазовом комплексе представлены в отчете группы Сколково «Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России». В проведенном аналитическом исследовании предлагается выделять следующие направления декарбонизации нефтегазовых компаний⁹⁷:

- 1) операционные методы, в том числе повышение энергоэффективности;
- 2) эффективная монетизация метана и ПНГ;
- 3) переход на низкоуглеродные источники энергоснабжения производственных процессов;
- 4) корпоративные методы декарбонизации;
- 5) методы глубокой декарбонизации – технологии УХУ и использование водорода в качестве топлива.

В сложившейся ситуации важно понимать, какие направления снижения выбросов ПГ являются наиболее реалистичными и целесообразными для конкретных секторов и ситуаций. Любое направление декарбонизации имеет свои особенности, возможности и существенные ограничения, и данные вопросы следует рассматривать системно, оценивая направления декарбонизации как обособленно, так и применительно к конкретным секторам и объектам, а также в сравнении с другими возможными вариантами снижения выбросов ПГ. В глобальном масштабе прогнозные оценки касательно места и роли отдельных

xxi.ru/uploads/1_I_Bashmakov_Dekarbonizacziya_globalnoj_i_rossijskoj_promyshlennosti_887003ef32.pdf

(дата обращения: 01.03.2023).

⁹⁷ Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России // Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. – 2021. – 158 с. – URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Decarbonization_of_oil_and_gas_RU_22032021.pdf (дата обращения: 05.04.2023).

направлений декарбонизации в общем объеме снижения выбросов ПГ зачастую разрабатываются в рамках различных сценариев.

Так, МЭА в настоящее время рассматривает два основных сценария развития мировой энергетики, связанных с динамикой выбросов углекислого газа⁹⁸. «Stated Policies Scenario» (STEPS) представляет собой прогноз, основанный на последних политических установках в области энергетики, климата и промышленного развития. «Announced Pledges Scenario» (APS) предполагает, что все заявленные национальные цели в области энергетики и климата будут достигнуты разными странами в полном объеме в установленные сроки. В отчете также отмечается, что для достижения целей сценария «Net Zero Emissions by 2050» (NZE) («Чистый ноль к 2050 году»), ограничивающего глобальное потепление до 1,5°C, требуется значительный дополнительный прогресс во многих областях. Наряду с основными сценариями МЭА также рассматривает некоторые ключевые факторы неопределенности, которые могут существенно повлиять на будущие тенденции и результаты. Основные из них – структурные изменения в экономике Китая и темпы развития солнечной энергетики⁹⁹. По заявлениям МЭА, основные направления, необходимые для того, чтобы обеспечить нисходящий тренд динамики выбросов ПГ до 2030 года, широко известны в науке и практике и в большинстве случаев могут быть эффективными с точки зрения затрат. Увеличение мощностей ВИЭ в 3 раза, темпов повышения энергоэффективности в 2 раза (до 4 % в год), ускорение электрификации и сокращение выбросов метана при использовании ископаемого топлива – в совокупности могут обеспечить более 80 % сокращения выбросов, необходимых к 2030 году¹⁰⁰. В 2019 году МЭА отмечало, что достижение цели Парижского соглашения по климату может быть достигнуто: на 37 % – за счет повышения

⁹⁸ World Energy Outlook 2023. Executive Summary // IEA. – 2023. – 353 p. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (дата обращения: 01.06.2024).

⁹⁹ Там же.

¹⁰⁰ Там же.

энергоэффективности, на 32 % – за счет широкомасштабного внедрения ВИЭ, на 31 % – за счет всех остальных факторов¹⁰¹.

Что касается России, то в Стратегии с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 г. также обозначены и сценарии, и основные направления снижения выбросов ПГ. Так, в документе отмечается, что в рамках целевого (интенсивного) сценария «применяются технологии, снижающие углеродный след существующей угольной генерации; происходит активная цифровизация и электрификация отраслей экономики; в металлургии и химической промышленности внедряются водородные технологии; развиваются парогазовая генерация, атомные электростанции, гидроэлектростанции и возобновляемые источники энергии; максимально используется потенциал снижения эмиссии парниковых газов в угольной энергетике, в том числе за счет полного перехода на наилучшие доступные технологии, поддержки инновационных и климатически эффективных технологий сжигания угля, повсеместного замещения низкоэффективных котельных объектами когенерации, широкого стимулирования развития и применения технологий улавливания, использования и захоронения парниковых газов»¹⁰². Однако данные формулировки носят общий характер и не подкреплены конкретными оценками и планами. Особая роль отводится энергосбережению и повышению энергетической эффективности, которая «будет способствовать сокращению выбросов парниковых газов опережающими темпами по сравнению с инерционным сценарием и тем самым будет являться одним из приоритетных механизмов перехода к низкоуглеродному развитию»¹⁰³. В документе отмечается, что «для улучшения показателей снижения энергоёмкости и углеродоемкости экономики Российской Федерации требуется усиление мер воздействия государственной политики в сфере энергосбережения и повышения энергетической эффективности в секторах экономики с наибольшим объемом потребления энергии» – это производство и распределение электрической

¹⁰¹ World Energy Outlook 2019 // IEA. – 2019. – 807 p. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/98909c1b-aabc-4797-9926-35307b418cdb/WEO2019-free.pdf> (дата обращения: 01.06.2024).

¹⁰² Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 г. № 3052-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 08.11.2021 г.

¹⁰³ Там же.

и тепловой энергии, промышленность и жилищно-коммунальное хозяйство. Как в мире, так и в России отмечается ведущая первичная роль мер и решений в области энергоэффективности при стремлении к сдерживанию выбросов CO₂ в атмосферу.

На текущем этапе развития энергоёмкость российской экономики высока, что объясняется климатическими условиями, большой территорией страны, а также особенностями специализации экономики и «советским наследием»¹⁰⁴. Российские ученые и эксперты подчёркивают, что вопросы энергоэффективности и энергоёмкости российской экономики в контексте климатической проблемы имеют принципиальное значение¹⁰⁵; повышение энергоэффективности, а также переход с угля на газ в электро- и теплоэнергетике – «самые доступные каналы декарбонизации»¹⁰⁶.

Вместе с тем, существует и такое мнение, что, несмотря на то что достаточно продолжительное время энергоэффективность была единственным фактором, снижающим промышленные выбросы, на сегодня большая часть ее потенциала уже исчерпана¹⁰⁷. Ограниченный потенциал энергоэффективности предопределяет в ближайшем будущем необходимость ориентации и на другие направления, такие как УХУ, переход на другие виды топлива и сырья, биомассу и водород. Низкоуглеродная электрификация может быть использована, в первую очередь, на производствах с низкой углеродоемкостью, а опции УХУ станут основными вариантами снижения выбросов в тех отраслях, где потенциал применения иных опций декарбонизации ограничен, а свести образование выбросов до нуля не представляется возможным¹⁰⁸.

¹⁰⁴ Макаров И. А. Сокращение выбросов парниковых газов и энергоэффективность Российской экономики // Бюллетень «На пути к устойчивому развитию России». – 2014. – № 68. – С. 19-26.

¹⁰⁵ Колпаков А. Ю. Энергоэффективность: роль в сдерживании выбросов углекислого газа и определяющие факторы // Проблемы прогнозирования. – 2020. – № 6. – С. 141-153. – DOI: 10.47711/0868-6351-183-141-153.

¹⁰⁶ Калмацкий М. Россия продолжает последовательно идти к углеродной нейтральности // Российская газета. – 2023. – URL: <https://rg.ru/2023/10/16/umnozhenie-na-nol.html> (дата обращения: 05.06.2024).

¹⁰⁷ Башмаков И. А. Декарбонизация глобальной и российской промышленности и низкоуглеродное регулирование / Семинар ИМЭМО РАН и ЦЭНЭФ-XXI «Декарбонизация глобальной и российской промышленности и низкоуглеродное регулирование». – 2022. – URL: https://cenef-xxi.ru/uploads/1_I_Bashmakov_Dekarbonizacziya_globalnoj_i_rossijskoj_promyshlennosti_887003ef32.pdf (дата обращения: 01.03.2023).

¹⁰⁸ Там же.

В масштабном исследовании, проведенном Центром энергоэффективности – XXI век (ЦЭНЭФ-XXI), представлены следующие базовые выводы касательно достижения углеродной нейтральности в энергетике и промышленности России¹⁰⁹. В энергетике основная роль отводится увеличению доли ВИЭ, а также повышению энергоэффективности, ускоренной электрификации, производству водорода на основе электролиза. Развитие переменных ВИЭ (ветряные и солнечные электростанции) может существенно повысить долю первых в генерации электроэнергии в России – до 20 % в 2050 г. В сценарии углеродной нейтральности также фигурируют технологии УХУ с их применением в части газовых и угольных электростанций.

Что касается промышленности, то в исследовании отмечается, что ее интенсивная модернизация приведет к тому, что к 2050 г. средние по России удельные расходы энергии на производство отдельных видов продукции выйдут на уровень нынешних показателей, предусмотренных принципами наилучших доступных технологий (НДТ), по мере приближения к которым и далее вклад повышения энергоэффективности в решение проблемы снижения выбросов ПГ будет заметно снижаться. Эксперты отмечают, что переход промышленности к углеродной нейтральности также требует применения технологий УХУ, и оно может считаться целесообразным тогда, когда цена на углерод превысит стоимость его захвата и захоронения¹¹⁰.

Возвращаясь к концепции НДТ как одному из базовых подходов в решении экологических задач в промышленном секторе России, следует отметить, что НДТ трактуются как совокупность различного рода решений, практическое применение которых позволяет промышленным предприятиям добиваться высокой ресурсной и экологической эффективности, а также обеспечивать сокращение выбросов ПГ. В России НДТ представляют собой основу эколого-технологического регулирования, и все промышленные предприятия, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду, обязаны доказывать

¹⁰⁹Башмаков И. А., Башмаков В. И., Борисов К. Б., Дзедзичек М. Г., Лунин А. А., Мышак А. Д. Россия на траектории углеродной нейтральности / Центр энергоэффективности – XXI век (ЦЭНЭФ-XXI). – 2022. – 133 с. – URL: [Россия на траектории углеродной нейтральности \(skolkovo.ru\)](https://skolkovo.ru) (дата обращения: 05.06.2024).

¹¹⁰ Там же.

соответствие требованиям НДТ и получать особые комплексные экологические разрешения. Отраслевые требования НДТ систематизированы в документах национальной системы стандартизации – информационно-технических справочниках по наилучшим доступным технологиям (ИТС НДТ)^{111,112}. ИТС НДТ официально утверждаются Росстандартом и размещаются в открытом доступе. В решении задач по снижению выбросов ПГ в России НДТ отводится особая роль.

С 2022 г. в спектр требований (отраслевых численных показателей) включаются так называемые индикативные удельные показатели выбросов ПГ. Разработка таких индикативных показателей осуществляется в соответствии с национальным планом, и, например, в 2024-2025 гг. в нефтегазовой отрасли показатели будут установлены для ИТС 28 «Добыча нефти», ИТС 29 «Добыча природного газа», а также ИТС 30 «Переработка нефти» и ИТС 50 «Переработка природного и попутного газа».

Показатели устанавливаются в результате отраслевого бенчмаркинга (сопоставительного анализа). В ходе бенчмаркинга, в соответствии с международными методиками и на основании данных о материально-энергетическом балансе производства, для каждого из предприятий рассчитываются удельные выбросы ПГ (для большинства отраслей – по сфере охвата 1). Для отрасли в целом определяются два уровня индикативных показателей: верхний – ограничительный и нижний – стимулирующий. Ограничительный показатель «отсекает» производственные площадки с наибольшей углеродоемкостью (в интервале 85-100 % от отраслевого максимума). Стимулирующий показатель устанавливается на уровне значений углеродоемкости, которые на 40 % выше отраслевого минимума¹¹³.

¹¹¹ Скобелев Д. О., Волосатова А. А., Гусева Т. В., Панова С. В. Применение концепции наилучших доступных технологий в различных системах зеленого финансирования: международный опыт и перспективы использования в государствах-членах Евразийского экономического союза // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 33.

¹¹² Зеленые проекты // Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики». – 2022. – 156 с. – URL: https://eipc.center/wp-content/themes/fgau/publics/eipc_green_case_31.pdf (дата обращения: 10.06.2024).

¹¹³ Доброхотова М. В., Скобелев Д. О. Организационно-экономический механизм регулирования углеродоемкости в промышленности // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/26ECVN123.pdf> (дата обращения: 10.06.2024).

В случае превышения верхнего ограничительного уровня, как предполагается, предприятия будут обязаны вносить в бюджеты различных уровней климатические платежи (или налоги). При достижении показателей, значения которых ниже стимулирующего уровня, предприятие может претендовать как на меры господдержки, так и на льготные кредиты в рамках таксономии зелёных проектов. Таким образом, индикативные показатели выбросов ПГ формируют своеобразную «систему координат» для принятия управленческих решений.

В целом, существенное снижение выбросов ПГ в промышленности сложно достижимо. Для этого «требуется сместить акцент с постепенных улучшений на трансформационные изменения»¹¹⁴. В общем виде, затраты на снижение выбросов ПГ в промышленности оценивают в достаточно широком диапазоне – 50–150 долл./т CO₂-экв., со значительными колебаниями внутри и за его пределами¹¹⁵. Оценки касательно суммарных затрат на существенное снижение выбросов ПГ в России также значительно разнятся. Так, результаты работы ЦЭНЭФ-XXI показывают, что до 2050 г. Россия может снизить выбросы ПГ на 65 % и это обойдётся экономике примерно в 245 трлн руб. «ВТБ Капитал» снижение выбросов на 50 % к 2050 г. оценивает в 86,6 трлн руб. и наименее затратными направлениями признает такие, как утилизация мусора, снижение выбросов метана, декарбонизация электроэнергетики и проекты в сфере лесного хозяйства¹¹⁶. В целом, в упомянутых и иных источниках самой крупной статьёй затрат по декарбонизируемым секторам обычно признается энергетический сектор, а лесное хозяйство является самым значительным с точки зрения потенциального объема поглощения направлением снижения выбросов ПГ.

¹¹⁴ Башмаков И. А. Декарбонизация глобальной и российской промышленности и низкоуглеродное регулирование / Семинар ИМЭМО РАН и ЦЭНЭФ-XXI «Декарбонизация глобальной и российской промышленности и низкоуглеродное регулирование». – 2022. – URL: https://cenef-xxi.ru/uploads/1_I_Bashmakov_Dekarbonizacziya_globalnoj_i_rossijskoj_promyshlennosti_887003ef32.pdf (дата обращения: 01.03.2023).

¹¹⁵ Там же.

¹¹⁶ Сценарии декарбонизации в России // Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. – 2022. – 19 с. – URL: https://esg-library.mgimo.ru/upload/iblock/3bf/9ax3bsixbuwn690oeobjb4fk3yjox477d/SKOLKOVO_EneC_RU_Decarbonisation_Scenarios_in_Russia.pdf?ysclid=m0ze3z4vze76090848&utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (дата обращения: 10.06.2024).

В официальных материалах по теме, в частности в Стратегии низкоуглеродного развития и позиции России к 26-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата в Глазго¹¹⁷, выпущенных в октябре 2021 г., в рамках целевого (интенсивного) сценария, предполагающего достижение углеродной нейтральности к 2060 г., уровень инвестиций до 2050 г. при достижении поставленных целей оценивался в 89 трлн руб. При этом в сценарии также были рассмотрены вклад различных мер в изменение объемов выбросов ПГ и результат их реализации в различных отраслях при росте поглощающей способности экосистем более чем в два раза (см. рисунок 1.5).

Следует отметить, что данный документ более конкретизирован по сравнению с вышедшей Стратегией с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 г., так как последняя не содержит подобных числовых оценок. В таблице 1.5 более подробно представлены рассматриваемые меры, сектора-источники выбросов и конкретные мероприятия, а также объем инвестиций по каждому направлению. Также автором на основе представленных в документе данных рассчитана усреднённая стоимость сокращения 1 т выбросов (СО₂-экв.) по каждому представленному направлению. Так, самыми «дешевыми» мерами (до 10-15 тыс. руб. за 1 т выбросов) могут оказаться вся группа мер, связанных с проектами в области сохранения и повышения поглощающей способности лесов (что коррелирует с оценками, представленными и в других источниках), а также реализация соответствующих проектов в сфере ЖКХ, снижение фугитивных выбросов. Стоимость сокращения 1 т выбросов при реализации проектов декарбонизации в сфере различного транспорта, газотранспортной и газопроводной систем можно оценить как среднюю на уровне 25-35 тыс. руб. В сумму порядка 70-80 тыс. руб. может обойтись сокращение 1 т выбросов в различных отраслях промышленности, электроэнергетике и сельском хозяйстве.

¹¹⁷ Проект Стратегии низкоуглеродного развития и позиция России к 26-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата в Глазго // Министерство экономики развития Российской Федерации. – 2021. – 22 с.

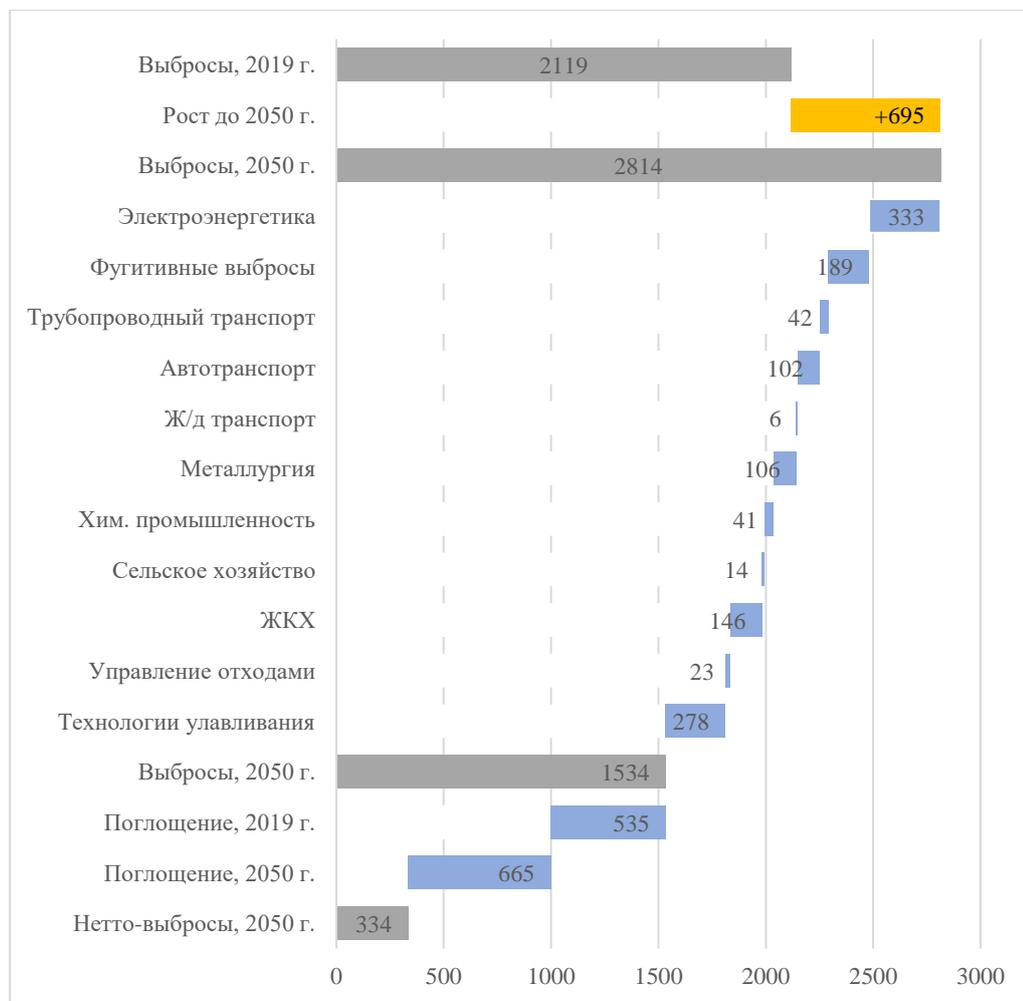


Рисунок 1.5 – Вклад различных мер и секторов в снижение выбросов ПГ, млн т CO₂-экв.

Источник: Проект Стратегии низкоуглеродного развития и позиция России к 26-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата в Глазго / Министерство экономики развития Российской Федерации. – 2021. – 22 с.

Самыми «дорогими» мерами из текущего перечня являются реализация проектов в области управления отходами, а также внедрение технологий УХУ. Вместе с тем, следует отметить, что последние, несмотря на высокую стоимость их реализации, рассматриваются как обязательные составляющие декарбонизации энергетики и промышленности во всех сценариях (мировых и национальных), так как именно эта группа мер «работает» с уже образовавшимися выбросами, тогда как снижение образования выбросов до нуля в данных секторах невозможно.

Таблица 1.5 – Вклад различных мер и секторов в снижение выбросов ПГ с усредненной оценкой стоимости сокращения 1 т выбросов

Мера	Инвестиции, трлн руб.		Эффект к 2050 г., млн т CO ₂ -экв.	Усреднённая стоимость сокращения 1 т выбросов (CO ₂ -экв.), тыс. руб.
	2022-2030	2031-2050		
Все меры, в т.ч.	6,2	82,6	-1945	45,66
Электроэнергетика: замена угольной генерации, рост выработки за счет низкоуглеродной генерации	3,0	23,3	-333	78,98
Фугитивные выбросы: снижение утечек топлива на 88 %	0,3	2,1	-189	12,70
Внедрение технологий улавливания углекислого газа	-	35,0	-278	125,90
Промышленность: НДТ с низкими показателями выбросов; металлургия и химическая промышленность; низкоуглеродное производство с применением водорода	1,3	9,8	-147	75,51
ЖКХ: классы энергоэффективности А, А+ для новых зданий, повышение эффективности систем тепло-холодоснабжения	0,1	1,1	-146	8,22
Транспорт: электрификация газотранспортной системы, ж/д транспорта, легкового, общественного и грузового автотранспорта, развитие зарядной инфраструктуры	0,3	2,5	-108	25,93
Газопроводная система: перевод газопроводных систем на электротурбины	0,2	1,2	-42	33,33
Управление отходами: отдельный сбор и использование отходов, внедрение системы утилизации отработавшего пром. оборудования	0,5	3,5	-23	173,91
Сельское хозяйство: оптимизация системы удобрений, точное земледелие	0,1	0,9	-14	71,43
Поглощение: меры по борьбе с лесными пожарами, интенсификация лесовосстановления, уточнение оценок	0,4	3,2	-665	5,41

Источники: Проект Стратегии низкоуглеродного развития и позиция России к 26-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата в Глазго // Министерство экономики развития Российской Федерации. – 2021. – 22 с. и расчеты автора.

1.4 Стратегические аспекты декарбонизации промышленных компаний

1.4.1 Стратегии декарбонизации и низкоуглеродная трансформация промышленных компаний (на примере нефтегазовых)

Развитие крупных промышленных систем (промышленных комплексов, компаний и пр.) в условиях быстро меняющейся и нестабильной внешней среды, ухудшения макроэкономической ситуации, обострившейся экологической и климатической повестки становится все более сложным процессом. Промышленные и социально-экономические системы по всему миру подвержены влиянию ряда глобальных вызовов, предъявляющих определённые требования к их поступательному развитию. В современной трактовке глобальные вызовы представляют собой совокупность социально-природных проблем, имеющих планетарный характер, от решения которых зависят экономический и социальный прогресс и сохранение цивилизации и для решения которых необходимы усилия всего человечества¹¹⁸. При этом система, формирующая такие вызовы, усложняется¹¹⁹. Текущая ситуация некоторыми авторами определяется как политико-экономическая турбулентность, которая в целом негативно влияет на эффективность управления в экономике¹²⁰.

Наряду с политико-экономической турбулентностью, повышенным вниманием к социальным и экологическим аспектам деятельности, усложнением технологической составляющей ведения бизнеса, обостряются проблемы низкоуглеродного развития и декарбонизации¹²¹. Повышенная степень неопределенности и нестабильности внешнего окружения усложняет

¹¹⁸ Жукоцкая А. В., Черненко С. В. Глобальные вызовы современности и духовный выбор // Вестник МГПУ. Серия «Философские науки». – 2023. – № 2 (46). – С. 23-31. – DOI: 10.25688/2078-9238.2023.46.2.2.

¹¹⁹ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

¹²⁰ Гурьянова Д. А., Плотников В. А. Эффективность управления в условиях политико-экономической турбулентности // Вестник РГГУ. Серия Экономика. Управление. Право. – 2024 – №2. – С. 70-84. – DOI: 10.28995/2073-6304-2024-2-70-84.

¹²¹ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

реагирование промышленных и социально-экономических систем на совокупность подобных обстоятельств. В труднопрогнозируемом окружении всегда есть большое количество возможных вариантов развития будущего¹²².

На рисунке 1.6 представлена декомпозиция факторов, формирующих глобальные вызовы, влияющие на деятельность промышленных компаний по всему миру, а также набор возможных вариантов реагирования компаний, которые, в конечном счете, существенно влияют на их стратегическое поведение.

Деятельность промышленных компаний все более тесно связана с социальными и экологическими аспектами по всей цепочке создания стоимости, а роль технологий возрастает на всех стадиях. Тенденции развития глобальных отраслей и отраслевых комплексов характеризуются слабой предсказуемостью. В таких усложняющихся условиях важными вариантами реагирования промышленных компаний на возникающие проблемы становятся диверсификация деятельности, разработка и реализация конкретных инициатив и мероприятий в сфере устойчивого и низкоуглеродного развития, декарбонизации, а также повышение открытости бизнеса и еще более выраженный учет интересов стейкхолдеров.

При этом формы взаимодействий усложняются, появляются новые межотраслевые отношения, цепочки и связи, которые должны осваиваться. Все это меняет подходы к организации и ведению бизнеса на уровне промышленных систем; возникают предпосылки для изменения существующих бизнес-моделей, стратегий, организационно-управленческих и технологических основ ведения бизнеса, а позиция компаний по климатическим вопросам становится одной из основополагающих. Прежде всего, это характерно для компаний, деятельность которых связана с существенными выбросами ПГ¹²³.

¹²² Cherepovitsyn A. E., Ilinova A. A. Methods and Tools of Scenario Planning in Areas of Natural Resources Management // European Research Studies Journal. – 2018. – Vol. 11. – No. 1. – P. 434-445.

¹²³ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.



Изменение ландшафта функционирования промышленных компаний – вызовы, требующие реагирования



Активная внешняя и внутренняя социальная политика
 Соблюдение экологических требований
 Активная позиция по решению климатических задач
 Диверсификация деятельности
 Следование принципам устойчивого и низкоуглеродного развития
 Учет интересов стейкхолдеров
 Предъявление высоких требований к квалификации сотрудников
 Цифровизация технологических и управленческих процессов
 Повышение открытости бизнеса
 Выстраивание новых межотраслевых связей и форм взаимодействия

Рисунок 1.6 – Ключевые глобальные вызовы и варианты реагирования промышленных компаний

Источник: адаптировано автором на основе: Carayannis E. G., Iinova A., Cherepovitsyn A. The Future of Energy and the Case of the Arctic Offshore: The Role of Strategic Management // Journal of Marine Science

and Engineering. – 2021. – Vol. 9 (2). – P. 134. – DOI: 10.3390/jmse9020134;
Ильинова А. А., Соловьева В. М. Стратегическое планирование и прогнозирование: изменение сущности и роли в условиях нестабильности энергетического сектора // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2021. – Т. 24. – № 2 (72). – С. 56-68. – DOI: 10.37614/2220-802X.2.2021.72.005

Деятельность по декарбонизации промышленных компаний пронизывает все уровни управления предприятием – от корпоративного до уровня отдельных стратегических единиц бизнеса и конкретных производственных объектов и технологических процессов. Следовательно, все уровни управления предприятием, формирования стратегий и стратегических планов развития затронуты процессами, ориентированными на снижение выбросов ПГ. Масштабы таких процессов различны – от изменения общего портфеля бизнеса на корпоративном уровне до конкретного технологического решения на производстве¹²⁴.

Сегодня большинство крупных промышленных компаний следуют определённой политике устойчивого развития (sustainable policy) для управления своей ответственностью в данной области, что выражается через реализацию различных инициатив и проектов, нацеленных на достижение ЦУР и теперь уже – снижение выбросов ПГ. О реализации своей ответственности в сфере устойчивого развития промышленные компании заявляют в своих нефинансовых отчетах. Наиболее распространенной формой публикации нефинансовых отчетов являются отчеты по устойчивому развитию (Sustainability Reports), требования к которым сформированы GRI¹²⁵. В результате институциональных изменений во многих странах на уровне компаний наблюдается существенный прогресс в развитии практик нефинансовой отчетности, в том числе и в России. Как было отмечено выше, особая роль в обеспечении вклада в достижение ЦУР и решение климатических задач принадлежит крупным промышленным компаниям ресурсных отраслей экономики, в том числе нефтегазовым.

¹²⁴ Там же.

¹²⁵ The global leader for impact reporting // GRI. – 2023. – URL: <https://www.globalreporting.org/> (дата обращения: 30.03.2023).

Нефтегазовые компании называют ключевыми игроками в обеспечении устойчивой энергетики в глобальном масштабе, а также вкладом в достижение иных ЦУР ООН, а именно: ЦУР 7 «Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надёжным, устойчивым и современным источникам энергии для всех» и ЦУР 13 «Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями». Тезисно результаты проведенного автором исследования по анализу вклада российских нефтегазовых компаний в достижение ЦУР 7 и ЦУР 13 будут представлены ниже.

Наряду с управлением ответственностью в сфере устойчивого развития, промышленные компании начинают внедрять в практику управление ответственностью в области климатических задач. Компании испытывают достаточно серьёзное давление со стороны регулирующих органов, инвесторов, общества и потребителей, направленное на необходимость принятия мер по снижению выбросов ПГ. Во многом озабоченность промышленных компаний экологической составляющей бизнеса связана именно с требованиями инвесторов. Например, принятие стратегий по нулевым выбросам ПГ к 2050 году крупными нефтегазовыми компаниями в большинстве случаев стало следствием требований группы крупнейших инвестиционных компаний с суммарной стоимостью активов под управлением более 68 трлн долл., объединённых в единую инициативу под названием Climate Action 100+¹²⁶. Так, в 2020 году к крупнейшим компаниям, ответственным за существенные объёмы выбросов ПГ, был выдвинут ряд требований, в том числе по принятию стратегий углеродной нейтральности к 2050 году. Инвестиционное давление на компании, ярко выраженная озабоченность общества экологическими проблемами, а также взятые обязательства по сокращению выбросов ПГ отдельными странами побудили большинство промышленных компаний работать над изменением и адаптацией своих стратегий согласно требованиям. Следует отметить, что пандемия COVID-19 только подчеркнула критичность проблемы, усилила давление на энергетику

¹²⁶ Investor signatories // Climate Action 100+. – 2023. – URL: <https://www.climateaction100.org/whos-involved/investors/page/2/#> (дата обращения: 01.04.2023).

и промышленность по всему миру и, как ожидалось, должна была увеличить скорость энергетического перехода, но такой вывод пока сделать нельзя. У многих промышленных компаний на стратегическом уровне уже формализованы стратегии и отчеты, посвящённые вопросам снижения выбросов ПГ, движения к углеродной нейтральности, декарбонизации деятельности, низкоуглеродного развития, энергетического перехода и т.д. Например, зарубежные нефтегазовые компании, наряду с Годовыми отчётами (Annual Reports), Отчётами об устойчивом развитии (Sustainability Reports), выпускают также специализированные отчеты по климату: например, Отчет об энергетическом переходе (Energy Transition Report), План энергетического перехода (Energy transition plan), Устойчивость к климатическим рискам (Climate Risk Resilience), Климатический отчет (Climate Report) и др. Специальные отчеты предоставляют, как правило, расширенную информацию о деятельности компаний в этой области, ее работе по конкретным направлениям. Так, например, компания «ExxonMobil» (США) выпускает отчет по продвижению климатических решений (Advancing Climate Solutions)¹²⁷, в котором подчёркивает свои обязательства по сокращению выбросов в поддержку будущего с нулевым уровнем выбросов ПГ. Кроме того, ряд компаний заполняет и размещает на своих официальных сайтах Анкету по изменению климата инициативы CDP (Carbon Disclosure Project) (CDP Climate Change Questionnaire), которая является распространённым инструментом классификации эмитентов ПГ¹²⁸.

Российские нефтегазовые компании в меньшей степени выпускают специализированные отчеты по климату, раскрывая некоторую информацию по выбросам ПГ и смежным вопросам в Отчетах об устойчивом развитии, Экологических отчетах и Справочниках ESG-данных. Так, например, компании ПАО «ЛУКОЙЛ» и ПАО «НОВАТЭК» выпускают последний, ПАО «Сургутнефтегаз» – Экологический отчёт, а остальные крупные российские

¹²⁷ Advancing Climate Solutions. 2022 Progress Report // ExxonMobil. – 2022. – 53 p. – URL: <https://drive.google.com/file/d/1P4OdWf7TRPyw9n3SZacZWGxEoV4jQCal/view> (дата обращения: 01.04.2023).

¹²⁸ Cherepovitsyna A., Sheveleva N., Riadinskaia A., Danilin K. Decarbonization Measures: A Real Effect or Just a Declaration? An Assessment of Oil and Gas Companies' Progress towards Carbon Neutrality // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 3575. – DOI: 10.3390/en16083575.

нефтегазовые компании – Отчеты об устойчивом развитии. Проведенные автором исследования показали¹²⁹, что из 18 компаний России по рейтингу РАЭКС, подотрасль которых соответствует категориям «Добыча нефти и газа», «Разведка и добыча газа», «Интегрированная нефтегазовая компания», только 6 компаний (ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «НК «Роснефть», ПАО «НОВАТЭК», ПАО «Газпром», ПАО «Татнефть», ПАО «Сургутнефтегаз») размещают на официальных Интернет-ресурсах сведения о выбросах ПГ, а 5 нефтегазовых компаний (перечисленные выше, за исключением ПАО «Сургутнефтегаз») установили цели по сокращению выбросов ПГ к целевому году.

Возникает потребность в построении целой системы управления устойчивым развитием. Как отмечалось, в эту систему уже активно встраиваются климатические вопросы и практики декарбонизации. Промышленные предприятия активно пересматривают свое поведение как на стратегическом, так и на операционном уровне¹³⁰. При этом возникает потребность в новых формах взаимодействия и реализации различных проектов; планируемые и реализуемые инициативы компаний обладают новизной и становятся более сложными, комплексными.

Вместе с тем, крупные промышленные компании самостоятельно выбирают, как реагировать на текущие условия, как поддерживать различные виды устойчивости, быть резильентными, соответствовать климатическим вызовам. Во многом это определяется отраслевой и страновой принадлежностью компаний, проводимой на территориях присутствия государственной политикой, имеющимися в распоряжении активами, особенностями технологической цепочки и возможностями бизнеса, формой собственности (государственная/частная), степенью вертикальной интеграции, доступом к ресурсам, цепочкой создания стоимости и др. Рассмотрим основные характеристики стратегического поведения

¹²⁹ Sheveleva N. A., Cherepovitsyna A. A., Danilin K. P. Assessing the Decarbonization Progress of Russian Oil and Gas Companies // *Studies on Russian Economic Development*. – 2024. – Vol. 35. – No. 3. – P. 406–414. – DOI: 10.1134/S1075700724030146.

¹³⁰ Бобылев С. Н. Экологические конфликты в зеркале «цивилизации максимизации» / С. Н. Бобылев, С. В. Соловьева, И. Ю. Ховавко // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Гуманитарные науки*. – 2021. – Т. 14, № 7. – С. 956-965. – DOI 10.17516/1997-1370-0775.

компаний на примере компаний нефтегазового комплекса, а также основы их низкоуглеродной трансформации в эпоху декарбонизации.

Согласно теории стратегического менеджмента, стратегии компаний формируются с учетом факторов внешней среды, а также внутреннего потенциала (возможностей). В основе любой стратегии лежат конкурентные преимущества, источники которых могут быть сформированы в соответствии с двумя основными подходами: рыночным (англ. *competitive positioning*) и ресурсным (англ. *resource based view*)¹³¹. Очевидно, что стратегии декарбонизации нефтегазовых компаний формируются под воздействием факторов внешней среды (макро- и микроокружение бизнеса). Макроокружение нефтегазовых компаний было обсуждено ранее – это ряд глобальных вызовов, влияющих на стратегическое развитие промышленных компаний по всему миру и требующих соответствующего реагирования. Микроокружение нефтегазового бизнеса уже может отличаться от компании к компании, так как представляет собой непосредственно ближайшее окружение: поставщиков, потребителей, конкурентов, местные сообщества – и ту среду, в которой она непосредственно функционирует. Формирование стратегии также определяется потенциалом и особенностями внутренней среды конкретной компании: портфелем и состоянием активов, производственными мощностями, инфраструктурой, кадровым потенциалом, финансовыми и технологическими возможностями и рядом других составляющих¹³².

В научной литературе встречаются различные варианты разделения компаний на группы в зависимости от их стратегического поведения¹³³. Так, в статье¹³⁴ авторы провели анализ ключевых тенденций, связанных

¹³¹ Iinova A., Dmitrieva D., Kraslawski A. Influence of COVID-19 pandemic on fertilizer companies: The role of competitive advantages // *Resources Policy*. – 2021. – Vol. 71. – P. 102019. – DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102019.

¹³² Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // *Инновации и инвестиции*. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

¹³³ Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // *Вестник Пермского университета. Серия «Экономика»*. – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

¹³⁴ Shojaeddini E., Naimoli S., Ladislaw S., Bazilian M. Oil and gas company strategies regarding the energy transition // *Progress in Energy*. – 2019. – Vol. 1. – DOI: 10.1088/2516-1083/ab2503.

с инвестиционной деятельностью нефтяных компаний, и выделили четыре варианта стратегий декарбонизации.

В исследовании¹³⁵ представлены результаты анализа деятельности девяти крупнейших нефтегазовых компаний по переходу на низкоуглеродные технологии. Проведенный авторами анализ низкоуглеродных практик нефтегазовых компаний позволил сделать следующие основные выводы¹³⁶:

1) активное развитие газового сегмента бизнеса является первым шагом для перехода нефтегазовых компаний к низкоуглеродным;

2) увеличение инвестиций в ВИЭ является действием нефтегазовых компаний «на перспективу» и одновременно «ключом» к превращению нефтегазовых компаний в интегрированные энергетические компании;

3) нефтегазовые компании должны иметь опыт в развитии геотермальной энергетики как одного из наиболее перспективных направлений возобновляемой энергетики.

Наиболее признанным в мировом масштабе является исследование консалтинговой компании “McKinsey Global Institute”¹³⁷, которое представляет разделение общих стратегий нефтегазовых компаний на три «архетипа» в зависимости от их стратегического ответа на глобальные вызовы, связанные с декарбонизацией. В исследовании выделены следующие архетипы¹³⁸:

1) «Специалист по ресурсам» (англ. Resource specialist);

2) «Интегрированный энергетический игрок» (англ. Integrated energy player);

3) «Чистые низкоуглеродные компании» (англ. Low-carbon pure play).

Результаты анализа вариантов стратегического поведения, представленных в различных источниках, синтезированы на рисунке 1.7. Можно сделать вывод,

¹³⁵ Lu H., Guo L., Zhang Y. Oil and gas companies' low-carbon emission transition to integrated energy companies // Science of The Total Environment. – 2019. – Vol. 686. – P. 1202-1209. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.014.

¹³⁶ Там же.

¹³⁷ The big choices for oil and gas in navigating the energy transition // McKinsey&Company. – 2021. – URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-big-choices-for-oil-and-gas-in-navigating-the-energy-transition> (дата обращения: 01.03.2023).

¹³⁸ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

что, в целом, варианты, выделяемые различными авторами, схожи между собой по содержанию с некоторыми исключениями и уточнениями¹³⁹.

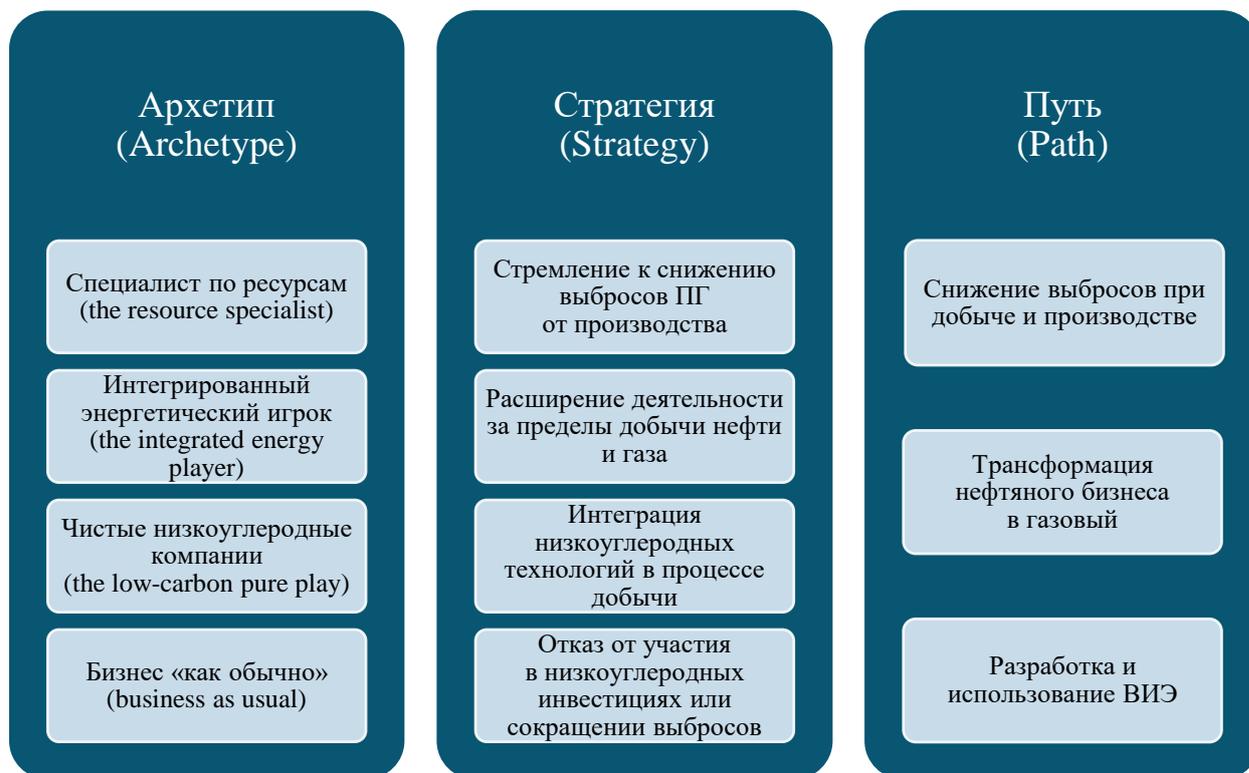


Рисунок 1.7 – Варианты стратегического поведения нефтегазовых компаний: стратегии декарбонизации

Источник: Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

Варианты стратегического поведения нефтегазовых компаний в эпоху декарбонизации были также детально проработаны в исследованиях автора. Было определено и обосновано выделение трех видов стратегических ответов нефтегазовых компаний на климатическую повестку, схожее с разделением, представленным в исследовании “McKinsey Global Institute”¹⁴⁰: 1) традиционные нефтегазовые компании; 2) энергетические компании; 3) «зеленые» компании.

¹³⁹ Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

¹⁴⁰ The big choices for oil and gas in navigating the energy transition // McKinsey&Company. – 2021. – URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-big-choices-for-oil-and-gas-in-navigating-the-energy-transition> (дата обращения: 01.03.2023).

Была исследована деятельность по декарбонизации 13 зарубежных, а также 5 крупнейших российских компаний. Доказано, что такая деятельность приводит к низкоуглеродной трансформации бизнеса на стратегическом и операционном уровнях в условиях борьбы с климатическими изменениями, ключевые положения которой представлены ниже¹⁴¹:

1) все исследуемые компании в рамках своих стратегий ставят цели по сокращению выбросов ПГ (Emissions reduction) и/или достижению углеродной нейтральности (Carbon neutrality / Net zero). Также компании обычно детализируют поставленные цели в абсолютном и/или относительном выражении, но делают это по-разному. Некоторые компании выделяют одну общую основную цель (например, американская компания “Chevron”), некоторые устанавливают цели в разрезе отдельных сфер охвата (например, транснациональная нефтегазовая компания “BP”). 2050 год является целевым для большинства компаний, но некоторые производители планируют достичь углеродной нейтральности раньше (например, американская компания “Occidental”)¹⁴²;

2) все исследуемые компании берут на себя достаточно амбициозные климатические обязательства. При этом было выявлено, что:

- все традиционные нефтегазовые компании ориентируются на сокращение выбросов ПГ и лишь некоторые – на достижение углеродной нейтральности;
- все энергетические компании ставят в рамках своих стратегий обе цели – и сокращение выбросов ПГ, и достижение углеродной нейтральности;
- «зеленые» компании ориентируются на углеродную нейтральность;

3) почти все исследуемые компании в качестве ключевого целевого показателя ориентируются на углеродоемкость (carbon intensity). Количественное значение показателя в общем виде представляет собой отношение выбросов ПГ конкретной компании к одной из ключевых метрик¹⁴³. Чаще всего нефтегазовые

¹⁴¹ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

¹⁴² Cherepovitsyna A., Sheveleva N., Riadinskaia A., Danilin K. Decarbonization Measures: A Real Effect or Just a Declaration? An Assessment of Oil and Gas Companies' Progress towards Carbon Neutrality // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 3575. – DOI: 10.3390/en16083575.

¹⁴³ ISO 14067:2018. Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification.

компании используют в качестве таковой количество выпущенного продукта, измеряемого в энергетических единицах;

4) то, насколько подробно установлены климатические цели компаний, позволяет в определенной степени сделать вывод о границах ее климатической ответственности (например, с ориентацией на классификацию выбросов по сферам охвата 1, 2, 3). Компании обычно детализируют поставленные цели в отношении сфер охвата 1 и 2, реже – в отношении сферы охвата 3; последнее может быть расценено как признание расширенной ответственности на уровне компании за выбросы ПГ;

5) большинство компаний заявляют, что в фокусе их стратегии декарбонизации лежит диверсификация. Главные отличия заключаются в уровне, а также объекте диверсификации. В зависимости от того, что компания выбирает своим ключевым продуктом и что планирует или уже диверсифицирует, выделено 3 вида диверсификации – на уровне направлений и опций декарбонизации, на уровне источников получения энергии, на продуктовом уровне;

б) для традиционных нефтегазовых компаний характерна диверсификация направлений, групп опций и опций декарбонизации с ориентацией на развитие и расширение проектов в области разведки и добычи углеводородов, совершенствование операционной деятельности и повышение энергоэффективности. Энергетические компании в основу стратегии закладывают диверсификацию источников получения энергии без ранжирования по приоритетам видов исходного сырья (углеводороды, водород, низкоуглеродное топливо, ВИЭ), но с ориентацией на постепенное снижение доли первых и увеличение доли последних в общем портфеле. «Зеленые» компании ориентируются на полный отказ от ископаемых источников энергии и переходят на новые низкоуглеродные продукты. В основе стратегии компаний лежит диверсификация портфеля продуктов (биотопливо, ВИЭ, возобновляемые химические вещества, «зелёный» транспорт и др.)¹⁴⁴;

¹⁴⁴ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – №. 8. – С. 378-382.

7) совершенствование операционной деятельности может стать основой укрепления позиций традиционных нефтегазовых компаний; развитие газовых сегментов бизнеса может стать первым шагом в переходе нефтегазовых компаний к энергетическим;

8) развитие ВИЭ является наиболее сложным маршрутом, который будет осваиваться «зелеными» компаниями в ближайшей перспективе, энергетическими компаниями – в средне- и долгосрочной перспективах, традиционными нефтегазовыми компаниями – точно. Но именно этот маршрут признается основой низкоуглеродного преобразования нефтегазовых компаний. Роль ВИЭ в декарбонизации российских и зарубежных нефтегазовых компаний отдельно исследована в статье автора¹⁴⁵;

9) приоритетными направлениями декарбонизации для традиционных нефтегазовых компаний выступают совершенствование операционной деятельности и работа с попутными компонентами и отходами производства (в том числе повышение энергоэффективности, утилизация ПНГ, проекты УХУ), для энергетических компаний – переход на низкоуглеродные источники энергии, для «зеленых» компаний – применение способов корпоративного управления. Реализация приоритетных направлений декарбонизации осуществляется через портфель проектов декарбонизации, являющихся основой стратегии декарбонизации.

Примерами традиционных нефтегазовых компаний являются крупнейшие российские компании – ПАО «НК «Роснефть», ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Газпром нефть», а также американская компания “Occidental”. К энергетическим можно отнести ряд европейских и американских компаний, таких как “BP”, “Chevron”, “Repsol”, “Shell”, “Equinor” и др. Среди проанализированных компаний выявлена только одна «зеленая» – “Neste”.

Кроме того, в рамках проведенных исследований была выполнена оценка прогресса крупнейших зарубежных компаний-лидеров по движению к углеродной

¹⁴⁵ Romasheva N., Cherepovitsyna A. Renewable Energy Sources in Decarbonization: The Case of Foreign and Russian Oil and Gas Companies // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – P. 7416. – DOI: 10.3390/su15097416.

нейтральности с использованием авторского подхода¹⁴⁶. Оценка основывалась на сопоставлении среднегодовых ожидаемых и фактических темпов сокращения удельных показателей выбросов ПГ. Исследование показало, что только три компании из десяти идут к намеченным целям по углеродной нейтральности, превышая ожидаемые среднегодовые темпы; пять компаний показывают более медленное движение к целям относительно ожидаемого темпа; две компании демонстрируют нулевую или отрицательную динамику в данном вопросе.

Вместе с тем, следует отметить, что декарбонизация и низкоуглеродная трансформация нефтегазовых компаний будет очень длительным процессом, затронет развитие значительного количества промышленных секторов по всему миру, повлечет за собой изменение всей энергетической системы, а также столкнется с множеством проблем. Для достижения общих поставленных целей необходима открытость и сотрудничество нефтегазовых и других промышленных компаний по всему миру. Кроме того, реализация стратегий декарбонизации нуждается в серьезных технологических инновациях, государственной поддержке на всех уровнях, участии местных сообществ в решении таких задач и вовлеченности общества¹⁴⁷. В процессе реализации стратегий снижения выбросов ПГ также необходима соответствующая система мониторинга и оценки прогресса по достижению поставленных целей, так как именно фактические действия и фактический прогресс обеспечивают достижение поставленных в рамках стратегий декарбонизации целей.

Крупнейшие российские нефтегазовые компании придерживаются традиционной стратегии, и они будут в фокусе дальнейшей работы.

¹⁴⁶ Cherepovitsyna A., Sheveleva N., Riadinskaia A., Danilin K. Decarbonization Measures: A Real Effect or Just a Declaration? An Assessment of Oil and Gas Companies' Progress towards Carbon Neutrality // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – P. 3575. – DOI: 10.3390/en16083575.

¹⁴⁷ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // *Инновации и инвестиции*. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

1.4.2 Стратегическое развитие российских нефтегазовых компаний в условиях декарбонизации: вклад в ЦУР ООН, цели по снижению выбросов ПГ и фактический прогресс

Стратегическое развитие нефтегазовых компаний, в том числе российских, уже неразрывно связывают с решением климатических задач и декарбонизацией. Будущее нефтегазового сектора, так или иначе, будет связано с низкоуглеродной трансформацией, развитием ВИЭ и внедрением «зеленых» технологий¹⁴⁸.

Как было обсуждено ранее, крупные нефтегазовые компании уже задекларировали свои амбициозные цели по снижению выбросов ПГ и/или достижению углеродной нейтральности. Компании стремятся поддерживать цели Парижского соглашения по климату и следовать международным инициативам в данной сфере, таким как упомянутая ранее CDP, Целевая группа по раскрытию финансовой информации, связанной с климатом (англ. Task Force on Climate-related Financial Disclosures, TCFD), Нефтегазовая климатическая инициатива (англ. The Oil and Gas Climate Initiative, OGCI)¹⁴⁹, Инициатива Всемирного банка «Нулевое регулярное сжигание ПНГ» (англ. World Bank's Initiative Zero Routine Flaring by 2030, ZRF)¹⁵⁰ и др.

Что касается нефтегазовой отрасли, в проводимой политике декарбонизации и реализации вклада в достижение ЦУР ООН ключевую роль играет Нефтегазовая климатическая инициатива. Компании, следующие этой инициативе, стараются проводить определённую политику в области устойчивого развития и декарбонизации, что отражается в реализации различных инициатив и проектов по данным направлениям. Все это характерно и для деятельности российских нефтегазовых компаний.

¹⁴⁸ Maksimova E. V., Morozov V. V. Modern challenges for the oil and gas sector and adaptation to them // Problems of Economics and Management of the Oil and Gas Complex. – 2021. – Vol. 6. – P. 5-9.

¹⁴⁹ Oil and Gas Climate Initiative (OGCI). – 2023. – URL: <https://www.ogci.com/> (дата обращения: 02.04.2023).

¹⁵⁰ Zero Routine Flaring by 2030 // The World Bank. – 2023. – URL: <https://www.worldbank.org/en/programs/zero-routine-flaring-by-2030> (дата обращения: 02.04.2023).

Являясь одним из крупнейших мировых эмитентов ПГ, на долю которого в 2022 г. приходилось около 4 % глобальных выбросов ПГ^{151,152}, Россия, как отмечалось, намерена занять активную позицию в глобальной климатической повестке. Принятые основополагающие документы в данной области, в частности Стратегия с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 г., способствуют распространению практик декарбонизации в нефтегазовом и других промышленных секторах. Российские компании уже пересматривают свое стратегическое поведение, в том числе в части управления своей ответственностью за выбросы ПГ как важнейшей составляющей общей климатической ответственности компании. Россия также заявляет об активной интеграции ЦУР ООН во внутреннюю политику¹⁵³. Национальные проекты РФ прямо или косвенно затрагивают 107 из 169 задач в области устойчивого развития¹⁵⁴.

В рамках выполненных работ автором были проведены следующие исследования:

1) выполнен анализ вклада российских нефтегазовых компаний в достижение ЦУР ООН, а именно: ЦУР 7 «Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех» и ЦУР 13 «Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями»¹⁵⁵;

2) проведен анализ климатических целей российских нефтегазовых компаний на предмет их соответствия критериям методики SMART, адаптированной к решению такого рода задач.

¹⁵¹ Охрана окружающей среды в России: статистический сборник / редкол.: И. В. Васильев. – М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2022. – 115 с. –

URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ochrana_okruj_sredi_2022.pdf (дата обращения: 27.03.2023).

¹⁵² Greenhouse gas emissions // Our World in Data. – 2020. – URL: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions> (дата обращения: 05.04.2023).

¹⁵³ Об утверждении целей и основных направлений устойчивого (в том числе зеленого) развития РФ: Распоряжение Правительства РФ от 14.07.2021 г. № 1912-п // Собрание законодательства Российской Федерации. – 26.07.2021 г.

¹⁵⁴ Добровольный национальный обзор хода осуществления Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года // Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – 2020. – 238 с. – URL: <https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/analitika/DNO.pdf> (дата обращения: 10.04.2023).

¹⁵⁵ Titova N., Cherepovitsyna A., Guseva T. Meeting the UN's Sustainable Development Goals in the Decarbonization Agenda: A Case of Russian Oil and Gas Companies // Resources. – 2023. – Vol. 12 (10). – P. 121. – DOI: 10.3390/resources12100121.

1.4.2.1 Анализ вклада российских нефтегазовых компаний в достижение ЦУР 7 и ЦУР 13

Для анализа вклада российских нефтегазовых компаний в достижение ЦУР 7 и ЦУР 13 была проанализирована деятельность крупнейших российских компаний, которые опубликовали отчеты об устойчивом развитии за 2021 год. В результате в выборку вошли следующие компании: ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпром», ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «НОВАТЭК», ПАО «Татнефть». Оценка вклада российских нефтегазовых компаний в достижение ЦУР 7 и ЦУР 13 была выполнена с учетом входящих в данные ЦУР задачи и с ориентиром на те показатели, которые соответствуют методологии ООН по оценке вклада в достижение задач в рамках ЦУР и непосредственно раскрываются компаниями в рамках их деятельности.

Исследование показало, что стратегические цели российских нефтегазовых компаний, сформулированные в рамках ЦУР 7 и ЦУР 13, в целом, соответствуют тем задачам, которые поставлены в рамках данных целей (в частности, задачам 7.1, 7.2, 7.3 и 13.2). Однако анализ каждой конкретной компании из выборки показал, что российские нефтегазовые компании не формулируют стратегические цели в отношении своего вклада в достижение ЦУР по задаче 7.1, связанной с расширением доступа к энергии. Это объясняется тем, что данная задача не столь актуальна для России, поскольку энергия доступна, а цены на газ и электричество умеренны. Однако фокус на других задачах ЦУР 7 позволяет выделить компании, которые уделяют внимание энергоэффективности по задаче 7.3 (ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпром»), а также ВИЭ по задаче 7.2 (ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «НОВАТЭК»). Проведенный анализ вклада российских нефтегазовых компаний в достижение ЦУР 7 и ЦУР 13 свидетельствует об отсутствии значительного прогресса в достижении показателей, определенных методологией ООН. Это подтверждается тем, что доля ВИЭ в общем объеме энергопотребления российских нефтегазовых компаний ни по одной из исследуемых не достигла и 0,3 % за период с 2019 по 2021 гг. (см. рисунок 1.8),

а общий объем выбросов ПГ с 2017 по 2021 гг. не имеет устойчивой тенденции к снижению.

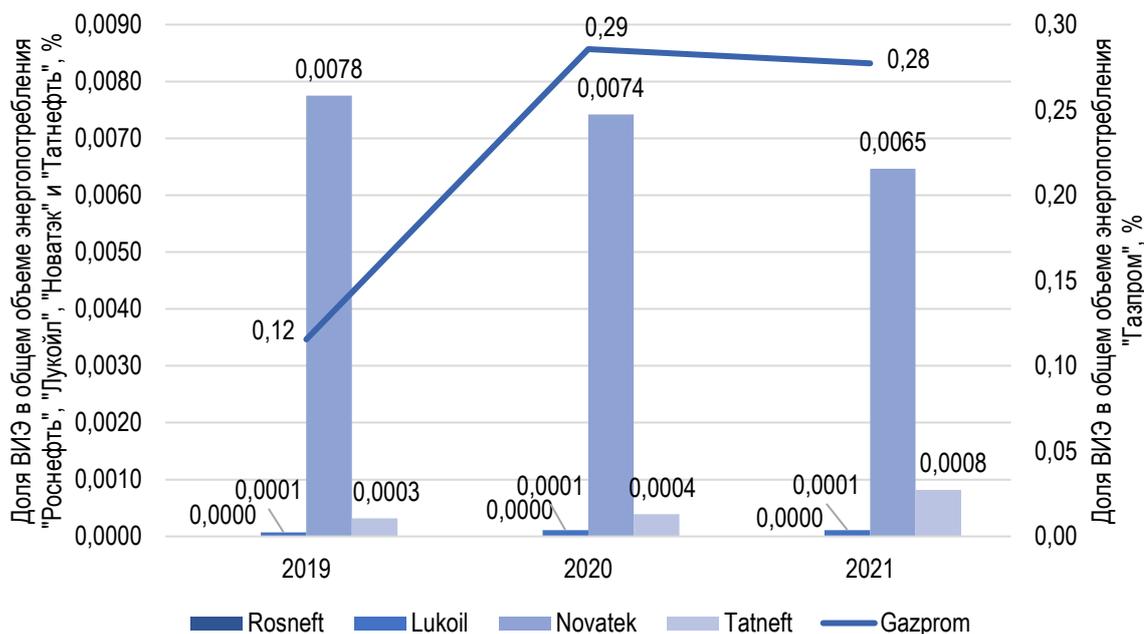


Рисунок 1.8 – Доля ВИЭ в общем объеме энергопотребления российских нефтегазовых компаний, %

Источник: составлено автором на основе отчетов компаний.

Данные о выбросах российских нефтегазовых компаний (в абсолютном выражении) представлены на рисунке 1.9, а целевые ориентиры по выбросам – в таблице 1.6.

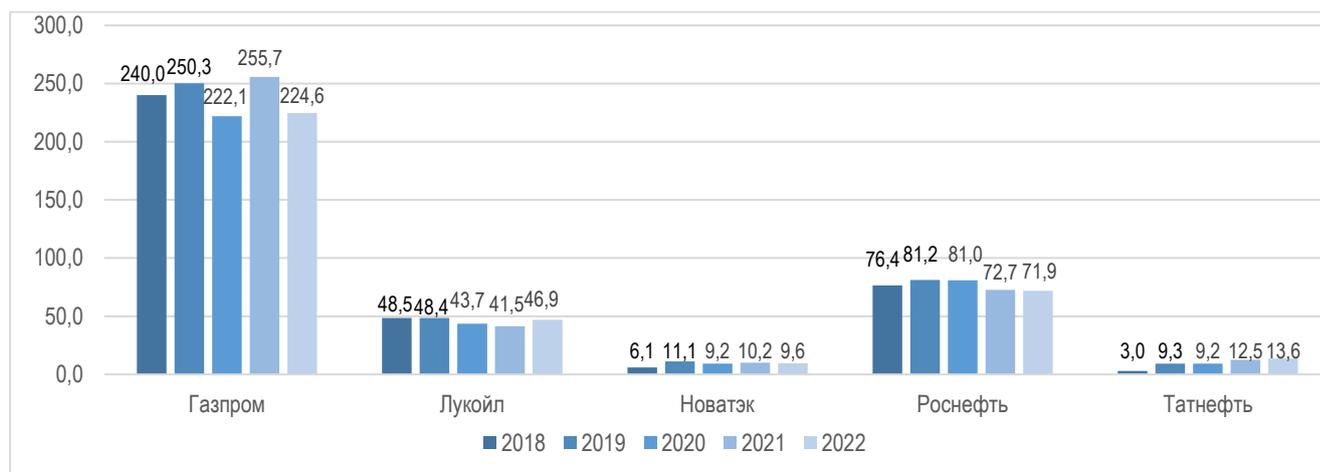


Рисунок 1.9 – Выбросы ПГ (области охвата 1 и 2) российских нефтегазовых компаний, млн т CO₂-экв.

Источник: составлено автором на основе отчетов компаний.

Таблица 1.6 – Цели по снижению выбросов ПГ (области охвата 1 и 2) российских нефтегазовых компаний, млн т CO₂-экв.

Компания	2022	Цель-2025	Цель-2030	Цель-2035
Газпром	224,63	-	-	-
ЛУКОЙЛ	46,887	-	40,7	-
НОВАТЭК	175,95	-	-	-
Роснефть	71,9	77,0	-	60,7
Татнефть	13,56	-	-	-

Источник: составлено автором на основе отчётов компаний.

Следует отметить, что цели по снижению абсолютных выбросов ПГ (области охвата 1 и 2) раскрывают только компании ПАО «НК «Роснефть» и ПАО «ЛУКОЙЛ» (см. таблицу 1.6). Компании ПАО «Газпром», ПАО «НОВАТЭК» и ПАО «Татнефть» не раскрывают целей по снижению абсолютных выбросов ПГ, а ориентируются в своей деятельности на другие показатели (в основном на удельные выбросы ПГ).

Тем не менее, проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что исследуемые российские компании стремятся занять достаточно активную позицию по обеспечению вклада в достижение ЦУР ООН. Компании используют сбалансированный подход к устойчивому развитию, основанный на концепции тройного критерия (англ. Triple Bottom Line)¹⁵⁶.

Практика компаний ориентирована на следующие направления:

- 1) качество жизни и благополучие (социальное измерение);
- 2) энергетическую безопасность (социальное и экономическое измерения);
- 3) экологическую устойчивость (экологическое и экономическое измерения).

В систему управления устойчивым развитием, как отмечалось, на всех уровнях встраивается деятельность по декарбонизации. Существенное значение в данном направлении играют разработанные компаниями стратегии декарбонизации¹⁵⁷, одной из важнейших составляющих которых являются

¹⁵⁶ Okeke A. Towards Sustainability in the Global Oil and Gas Industry: Identifying Where the Emphasis Lies // Environmental and Sustainability Indicators. – 2021. – Vol. 12. – P. 100145. – DOI: 10.1016/j.indic.2021.100145.

¹⁵⁷ Lee Ch.-Ch., Hussain J. Carbon neutral sustainability and green development during energy consumption // Innovation and Green Development. – 2022. – Vol. 1 (1). – P. 100002. – DOI: 10.1016/j.igd.2022.100002.

поставленные компанией цели в этой области. Именно последние определяют вектор развития нефтегазовой компании при низкоуглеродной трансформации¹⁵⁸.

1.4.2.2 Анализ климатических целей российских нефтегазовых компаний по адаптированной методике SMART

В рамках данного исследования перечень анализируемых компаний остался тот же – крупнейшие российские нефтегазовые компании, которые опубликовали отчет об устойчивом развитии за 2021 год. Было выявлено, что практически все исследуемые российские компании формируют стратегии по климату и ставят долгосрочную амбициозную цель по достижению углеродной нейтральности к 2050 году (исключением является ПАО «Газпром»).

В науке и практике управления для анализа целей компании широко распространён SMART-анализ, основоположником которого является Г. Т. Доран¹⁵⁹. SMART – акроним, каждая буква критерия обозначает характеристику поставленной цели: S – ‘specific’, «конкретная»; M – ‘measurable’, «измеримая»; A – ‘achievable’, «достижимая»; R – ‘relevant’, «релевантная» и T – ‘time-bound’, «ограниченная во времени». В рамках исследования уточнены все критерии SMART применительно к анализу климатических целей. С учетом того, что достижимость цели сложно оценить только по ограниченной информации, представленной в отчетах об устойчивом развитии, предложено использовать следующий подход к оценке достижимости, под которой в рамках исследования подразумевается фактический прогресс по заявленным целям:

1) проведение анализа климатических целей российских нефтегазовых компаний с выявлением ключевых показателей, декларируемых компаниями по снижению выбросов ПГ;

¹⁵⁸ Nowiski N. A. Rising above the storm: Climate risk disclosure and its current and future relevance to the energy sector // Energy Law Journal. – 2018. – Vol. 39 (1). – P. 1-46.

¹⁵⁹ Doran G. T. There's a S.M.A.R.T. Way to Write Management's Goals and Objectives // Management Review. – 1981. – Vol. 70. – P. 35-36.

2) определение перечня показателей и сбор данных по показателям в динамике по компаниям;

3) оценка динамики по выявленным показателям исследуемых компаний;

4) установление связей между выявленными тенденциями по показателям и декларируемыми целями.

Проведенный анализ климатических целей по методике SMART, дополненной авторскими предложениями в части уточнения критериев и подхода к оценке достижимости целей, позволяет сделать следующие выводы.

Существует набор конкретных целевых показателей, на которые ориентируются российские нефтегазовые компании при постановке климатических целей в условиях декарбонизации. Это 1) выбросы ПГ (области охвата 1 и 2); 2) удельные выбросы ПГ; 3) выбросы метана; 4) уровень использования ПНГ. При этом чаще всего компании ориентируются на показатели выбросов ПГ в абсолютном и относительном выражении.

Для определения достижимости целей в рамках предложенного подхода по исследуемым компаниям была собрана база данных, отражающая динамику по всем четырем выявленным показателям. Согласно выявленной динамике, была проведена оценка фактического прогресса по показателям и, как следствие, целям, а также оценка соответствия выявленной динамики декларируемой цели.

Исследование позволило определить, что из четырнадцати поставленных крупнейшими российскими нефтегазовыми компаниями климатических целей девять в полной мере соответствуют критериям SMART. При этом треть обозначенных в поставленных целях показателей – как на среднесрочный, так и на долгосрочный периоды – уже достигнуты компаниями ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпром», ПАО «НОВАТЭК», ПАО «Татнефть». Остальные климатические цели имеют высокий или очень высокий потенциал достижения. Это говорит не только о том, что российские нефтегазовые компании ответственно берутся за реализацию широкого спектра целей, но также о том, что данные цели реалистичны, а следовательно, достижимы в обозримом будущем.

При этом наибольшее соответствие критериям SMART демонстрируют климатические цели российских нефтегазовых компаний по использованию ПНГ. Важно также отметить, что все компании, вошедшие в выборку, ставят цели по данному показателю, а полученные результаты позволяют определить высокий уровень достижения поставленных целей. Эти факты свидетельствуют о том, что в российских нефтегазовых компаниях уже накоплен существенный опыт в сфере технологических решений, позволяющих максимально эффективно использовать ПНГ. Как известно в науке и практике, такой результат, в частности, является следствием эффекта обучения и накопления опыта, которым подвержено развитие любой технологии. Кроме того, в данной области, когда бизнесу уже «понятны» технологические решения и они активно внедряются в производственную деятельность, возрастает эффективность управления ответственностью по данному направлению, которая выражается в постановке реалистичных целей и интегрируется в систему управления нефтегазовых компаний. Об этом свидетельствуют и результаты данного исследования, демонстрирующие самый высокий уровень соответствия климатических целей по ПНГ критериям SMART.

Результаты исследования по иным показателям, фиксирующие положительную динамику, дают основание полагать, что вектор стратегического управления декарбонизационной деятельностью российских нефтегазовых компаний уже сегодня направлен на осознанное целеполагание и перманентное совершенствование как технологических, так и организационно-управленческих аспектов в рамках своих климатических стратегий и ответственности.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

В свете обострившейся климатической проблемы с вопросами устойчивого развития неразрывно связаны вопросы становления «зеленой» экономики и ее производных, низкоуглеродного развития, углеродной нейтральности, декарбонизации. Низкоуглеродное развитие имеет целью достижение

поступательного экономического развития при одновременном снижении выбросов CO₂, углеродная нейтральность по своей сути преследует в качестве основной цели достижение баланса между антропогенными выбросами ПГ и поглощением этого ПГ из атмосферы. Для достижения такого баланса в работе выделено три группы мер, которые могут «работать» с выбросами ПГ или с концентрацией CO₂ в атмосфере. Группы мер, направленные непосредственно на сокращение выбросов ПГ, реализуются на уровне компании и составляют основу деятельности по декарбонизации, которая, в свою очередь, подразумевает выстраивание системы управления и внедрение конкретных доступных решений, направленных на снижение выбросов ПГ. Последние в научной литературе и практических материалах по теме обычно называют «технологии декарбонизации», «методы декарбонизации», «опции декарбонизации». Вместе с тем, употребление данных понятий в каждом конкретном случае зачастую носит интуитивный характер. В работе предложены основы терминологической систематики иерархического характера применительно к деятельности по декарбонизации промышленных систем, которые позволяют упорядочить данные категории. Так, в соответствии с предложенной систематикой направления и группы опций декарбонизации определяют общие цели и задачи по снижению выбросов ПГ, а конкретные опции и технологии представляют собой средства для их достижения.

В научных источниках, практических материалах, различных нормативных и правовых документах рассматриваются разные направления декарбонизации глобальной и российской энергетики и промышленности. На мировом уровне особая роль в снижении выбросов ПГ отводится внедрению ВИЭ, мерам энергоэффективности, ускорению электрификации и сокращению выбросов метана при использовании ископаемого топлива. В России признается, что вопросы энергоэффективности и энергоёмкости российской экономики в контексте климатической проблемы имеют принципиальное значение; вместе с тем, ограниченный потенциал энергоэффективности предопределяет в ближайшем будущем необходимость ориентации и на другие направления,

такие как УХУ, переход на другие виды топлива и сырья, биомассу и водород. Самыми «дешевыми» мерами снижения выбросов ПГ в России могут оказаться вся группа мер, связанных с проектами в области сохранения и повышения поглощающей способности лесов, а также реализация соответствующих проектов в сфере ЖКХ, снижение фугитивных выбросов, а самыми «дорогими» – реализации проектов в области управления отходами, а также внедрение технологий УХУ. Вместе с тем, последние рассматриваются как обязательные составляющие декарбонизации энергетики и промышленности во всех сценариях.

С учетом того, что особая роль в обеспечении вклада в достижение ЦУР ООН и теперь уже поставленных на различных уровнях целей по снижению выбросов ПГ принадлежит крупнейшим компаниям ресурсоёмких отраслей экономики, которые обладают наибольшей степенью ответственности за использование человеческих и природных ресурсов планеты, устойчивому развитию и декарбонизации именно промышленных систем в мировом масштабе отводится основополагающая роль. Деятельность по декарбонизации промышленных компаний пронизывает все уровни управления предприятием – от корпоративного до уровня отдельных стратегических единиц бизнеса и конкретных производственных объектов и технологических процессов. Следовательно, все уровни управления предприятием, формирования стратегий и стратегических планов развития затронуты процессами, ориентированными на снижение выбросов ПГ. Масштабы таких процессов различны – от изменения общего портфеля бизнеса на корпоративном уровне до конкретного технологического решения на производстве. Деятельность по декарбонизации на уровне компании приводит к низкоуглеродной трансформации бизнеса, определяющей общий вектор развития всей промышленной системы. Каждая конкретная компания работает над определением уровня ответственности по решению климатических задач, постановкой климатических целей, разработкой и реализацией стратегий и планов по декарбонизации и пр. Было определено, что все крупнейшие российские нефтегазовые компании придерживаются традиционной стратегии ведения бизнеса, а приоритетными

направлениями декарбонизации для них выступают совершенствование операционной деятельности и работа с попутными компонентами и отходами производства (в том числе повышение энергоэффективности, утилизация ПНГ, проекты УХУ).

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что крупнейшие российские нефтегазовые компании достигли определенных успехов в постановке и достижении климатических целей, но пока еще не демонстрируют существенного вклада в достижение ЦУР ООН. Так, из четырнадцати поставленных крупнейшими российскими нефтегазовыми компаниями климатических целей девять в полной мере соответствуют критериям SMART. При этом треть обозначенных в поставленных целях показателей уже достигнута компаниями, остальные климатические цели с ориентацией на конкретные показатели имеют высокий или очень высокий потенциал достижения. Российские нефтегазовые компании ответственно берутся за реализацию широкого спектра целей, а цели реалистичны и достижимы в обозримом будущем.

Проведенный анализ вклада российских нефтегазовых компаний в достижение ЦУР 7 и ЦУР 13 свидетельствует об отсутствии значительного прогресса в достижении показателей, определенных методологией ООН. Такой вывод, в большей степени, сделан с ориентацией на незначительную долю ВИЭ в общем объеме энергопотребления и объем выбросов ПГ в абсолютном выражении, который не имеет устойчивой тенденции к снижению. Однако в целом вектор стратегического управления декарбонизационной деятельностью российских нефтегазовых компаний уже сегодня направлен на осознанное целеполагание и перманентное совершенствование как технологических, так и организационно-управленческих аспектов в рамках своих климатических стратегий и ответственности.

При подготовке данной главы диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные

результаты, положения и выводы исследования (1-9), а также иные публикации (10-12):

1. Череповицына А. А., Титова Н. Ю., Гусева Т. В. SMART-анализ целей российских нефтегазовых компаний по снижению выбросов парниковых газов // Экономика промышленности. – 2025. – Т. 18. – № 1. – С. 90–110. – DOI: 10.17073/2072-1633-2025-1-1414.

2. Череповицына А. А. Снижение выбросов парниковых газов: от глобального контекста к стоимостной оценке улавливания углекислого газа в Арктике // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2025. – № 2. – С. 148–163. – DOI: 10.37614/2220-802X.2.2025.88.010.

3. Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – Т. 1. – №. 57. – С. 169-174.

4. Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

5. Sheveleva N., Cherepovitsyna A., Danilin K. Assessing the Decarbonization Progress of Russian Oil and Gas Companies // Studies on Russian Economic Development. – 2024. – Vol. 35. – No. 3. – P. 406-414. – DOI: 10.1134/S1075700724030146.

6. Cherepovitsyna A., Sheveleva N., Riadinskaia A., Danilin K. Decarbonization Measures: A Real Effect or Just a Declaration? An Assessment of Oil and Gas Companies Progress towards Carbon Neutrality // Energies. – 2023. – Vol. 16. – No. 8. – P. 3575. – 19 p. – DOI: 10.3390/en16083575.

7. 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. – DOI: 10.3390/en16083575.

8. Titova N., Cherepovitsyna A., Guseva T. Meeting the UN's Sustainable Development Goals in the Decarbonization Agenda: A Case of Russian Oil and Gas

Companies // Resources. – 2023. – Vol. 12. – No. 10: 121. – 23 p. – DOI: 10.3390/resources12100121.

9. Romasheva N., Cherepovitsyna A. Renewable Energy Sources in Decarbonization: The Case of Foreign and Russian Oil and Gas Companies // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – No. 9: 7416. – 26 p. – DOI: 10.3390/su15097416.

10. Данилин К. П., Череповицына А. А., Белошицкий А. В. Об отчетности нефтегазовых компаний о выбросах парниковых газов по сфере охвата 3 // Нефтяное хозяйство. – 2023. – Т. 5. – С. 139-144. – DOI: 10.24887/0028-2448-2023-5-139-144.

11. Череповицына А. А. Улавливание и использование углекислого газа: экономика проектов в условиях России // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия «Экономика». – 2025. – Т. 1. – № 51. – С. 40–48. – DOI: 10.17122/2541-8904-2025-1-51-40-48.

12. Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

ГЛАВА 2. СУЩНОСТЬ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ УЛАВЛИВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

2.1 Декарбонизационная деятельность промышленных компаний: систематизация опций, роль и место УХУ (на примере нефтегазовых)

Как отмечалось, решение климатических задач в глобальном масштабе напрямую связывают с деятельностью нефтегазовых компаний. Вместе с тем, можно увидеть существенно отличающиеся в различных источниках оценки по вкладу нефтегазовых компаний в глобальные выбросы ПГ. Так, согласно исследованию консалтинговой компании “McKinsey Global Institute”¹⁶⁰, если оценивать долю выбросов, произведённых нефтегазовыми компаниями в рамках сферы охвата 1 (Score 1), то в общей массе выбросов ПГ она составит порядка 8 %. Непрямые выбросы сферы охвата 2 (Score 2) увеличат это значение до 9 %. Однако при учете непрямых выбросов сферы охвата 3 (Score 3) вклад нефтегазовых компаний будет значительно существеннее – он составит порядка 42 % от общей массы выбросов ПГ по миру. Для вертикально интегрированных нефтяных компаний объем выбросов ПГ по сфере охвата 3 в среднем в 7 раз превышает выбросы по сферам охвата 1 и 2¹⁶¹, что достаточно очевидно, учитывая, что данная сфера включает в себя эмиссию от использования продукции компании. Именно выбросы по сфере охвата 3 провоцируют большую часть давления на нефтегазовый сектор. Несмотря на то что сфера охвата 3 является наиболее проблемной, для удовлетворения растущих требований различных заинтересованных сторон (потребителей, инвесторов, регуляторов) по

¹⁶⁰ Beck C. The future is now: How oil and gas companies can decarbonize / C. Beck, S. Rashidbeigi, O. Roelofsen, E. Speelman // McKinsey&Company – 2020. – URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-future-is-now-how-oil-and-gas-companies-can-decarbonize> (дата обращения: 01.03.2023).

¹⁶¹ Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России // Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. – 2021. – 158 с. – URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Decarbonization_of_oil_and_gas_RU_22032021.pdf (дата обращения: 05.04.2023).

снижению выбросов ПГ многие нефтегазовые компании работают не только со своими основными технологическими процессами и энергообеспечением (сферы охвата 1 и 2), но и занимаются снижением углеродоемкости по сфере охвата 3¹⁶².

Основная масса прямых выбросов ПГ в нефтегазовой отрасли происходит из-за серьезного объема использования ископаемых видов топлива на всех стадиях – от разведки и добычи (англ. upstream / exploration and production) до транспортировки и хранения (англ. midstream), а также переработки, распределения и продажи нефтепродуктов (англ. downstream). Существенные объёмы выбросов нефтегазовых компаний связывают с утечками метана и CO₂, со сжиганием ПНГ. Высокая доля выбросов метана (до 45 %) в совокупных выбросах ПГ отрасли является ее специфической особенностью¹⁶³, а в вопросах утилизации ПНГ нефтегазовые компании достигли значительных успехов¹⁶⁴.

Для снижения выбросов ПГ каждой компании необходимо понимать, с каким объёмом выбросов связана ее деятельность, определить, с какими сферами охвата она готова работать (сферы охвата 1, 2, 3), а также оценить перспективность различных направлений и опций декарбонизации. Все это, вместе с постановкой конкретной цели по снижению выбросов ПГ, к которой компания хочет прийти, является основой системы управления деятельностью по декарбонизации и выражается в разработанных и принятых на уровне компаний стратегиях декарбонизации, которым она будет следовать¹⁶⁵.

Для решения такой задачи в научных и научно-практических материалах по теме предлагаются различные подходы. Так, в исследовании¹⁶⁶ предлагается

¹⁶² Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310

¹⁶³ Там же.

¹⁶⁴ Рядинская А. П., Череповицына А. А. Утилизация попутного нефтяного газа в России: методы и перспективы производства продуктов газохимии // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2022. – № 2. – С. 19–34. – DOI:10.37614/2220-802X.2.2022.76.002.

¹⁶⁵ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378–382.

¹⁶⁶ Бергфельдт Т. Сокращение углеродного следа в горнодобывающей и металлургической отрасли: как разработать стратегию и дорожную карту декарбонизации / Т. Бергфельдт, С. Брок // Золото и технологии. – 2021. – № 2 (52). –

URL: <https://zolteh.ru/technology/equipment/sokrashchenie-uglerodnogo-sleda-v-gornodobyvayushchey-i-metallurgicheskoy-otrasli-kak-razrabotat-str/?ysclid=lnbth15cej251197811> (дата обращения: 04.03.2023).

методология разработки стратегии декарбонизации промышленной компании, которая состоит из следующих этапов:

1) определение возможностей, суть которого заключается в анализе объекта, в частности в определении границ, анализе технологического процесса и потенциально возможных направлений снижения выбросов ПГ;

2) оценка и обоснование стоимости, заключающиеся в укрупненной оценке потенциала сокращения выбросов ПГ, а также капитальных и эксплуатационных затрат по направлениям декарбонизации;

3) выбор возможностей, суть которого заключается в сопоставлении направлений декарбонизации с источниками выбросов ПГ с оценкой возможных препятствий и рисков;

4) применение концепции нормированной стоимости сохраненного углерода (англ. Levelized cost of carbon conserved, LCCC) с целью определения и приоритезации тех проектов, которые добавляют наибольшую ценность и должны быть реализованы в первую очередь;

5) анализ кривой стоимости мер снижения удельных выбросов ПГ с целью формирования представления о том, какие проекты окажут наибольшее влияние на сокращение выбросов ПГ при соответствующих затратах на реализацию;

6) оценка потенциальных проектов декарбонизации для включения в дорожную карту декарбонизации с детальной проработкой и представлением последней;

7) реализация проектов декарбонизации с высоким приоритетом.

Разработка и реализация стратегии декарбонизации – это комплексный многоступенчатый и уникальный для каждой компании процесс, который зависит от многих факторов, таких как структура активов компании, производственный цикл и технологии, инвестиционные портфели, действующее национальное регулирование и многие другие¹⁶⁷. Темпы принятия решений по декарбонизации и их характер зависят как от масштабов и сложности технологических систем

¹⁶⁷ Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России // Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. – 2021. – 158 с. – URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Decarbonization_of_oil_and_gas_RU_22032021.pdf (дата обращения: 05.04.2023).

производства¹⁶⁸, так и от организационных способностей компаний к трансформации, экономических и ряда других факторов.

Каждая конкретная компания работает над созданием своих уникальных «карт декарбонизации», в основе которых лежат конкретные решения (опции декарбонизации) организационно-управленческого и технологического характера, направленные на уменьшение выбросов ПГ, начиная с повышения энергоэффективности, нацеленного на сокращение образования CO₂ и его выброс, и заканчивая реализацией технологий УХУ для предотвращения попадания в атмосферу выбросов, избежать которые не представляется возможным. Для того чтобы составлять «карты декарбонизации», в целом, необходимо понимать, какой набор опций доступен каждой конкретной компании, а также оценить доступные опции для включения в «карты декарбонизации», что коррелируется с более детальным подходом – методологией, обсужденной выше.

Определение набора доступных опций, а также их систематизация представляет собой отдельную научную задачу. В данном разделе будет предпринята попытка систематизации опций декарбонизации применительно к нефтегазовым компаниям.

На основе анализа и синтеза имеющихся наработок, проведенного критического анализа представленных в литературе подходов к выделению направлений и группировке опций декарбонизации, предлагается авторский подход к систематизации доступных опций с ориентацией на четыре направления (см. таблицу 2.1): 1) совершенствование операционной деятельности нефтегазовых компаний; 2) переход на низкоуглеродные источники энергообеспечения производственной деятельности; 3) работа с попутными компонентами и отходами нефтегазового производства; 4) использование способов корпоративного управления¹⁶⁹.

¹⁶⁸ Ильинский А. А., Калинина О. В., Хасанов М. М., Афанасьев М. В., Сайтова А. А. Декарбонизация нефтегазового комплекса: приоритеты и организационные модели развития // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2022. – № 1. – С. 33–46. – DOI: 10.37614/2220-802X.1.2022.75.003.

¹⁶⁹ Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

Таблица 2.1 – Систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазовых компаний¹⁷⁰

Направление декарбонизации	Группа опций	Примеры опций
Совершенствование операционной деятельности	Повышение эффективности производства	Цифровизация технологических и управленческих процессов
		Оптимизация работы технологического оборудования
		Оптимизация процессов работы скважин
		Оптимизация логистических операций
		Внедрение новых подходов к управлению производством
	Повышение энергоэффективности	Модернизация и увеличение доли энергоэффективного оборудования
		Когенерация энергии и рекуперация отработанного тепла
	Сокращение летучих выбросов	Совершенствование системы обнаружения и предотвращения утечек
Повышение износостойкости оборудования и объектов инфраструктуры		
Переход на низкоуглеродные источники энергии	Электрификация оборудования и производственных объектов	Замена традиционных видов топлива на электроэнергию для обеспечения работы оборудования и производственных объектов
		Внедрение и масштабирование ВИЭ (в т.ч. технологий хранения энергии)
	Интеграция низкоуглеродных видов топлива	Снижение углеродоемкости используемых видов топлива
		Переход на более низкоуглеродное сырье
Работа с попутными компонентами и отходами производства	Утилизация ПНГ	Применение методов переработки ПНГ для производства продукции
		Сокращение сжигания ПНГ и использование для собственных нужд
	Улавливание, использование и захоронение CO ₂	Улавливание и захоронение CO ₂
		Улавливание и использование CO ₂
		Улавливание, использование и захоронение CO ₂
	Совершенствование обращения с отходами и шламами	Изменение методов утилизации промышленных отходов
Сокращение влияния отходов производства на окружающую среду		
Применение способов корпоративного управления	Оптимизация портфеля	Дивестиции
	Выстраивание взаимоотношений со стейкхолдерами	Формирование взаимоотношений с ответственными поставщиками и подрядчиками

¹⁷⁰ Сокращённая версия систематизации; более полная версия представлена в статье:

Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

Первое направление – «Совершенствование операционной деятельности» – представляет собой набор опций, направленных на уменьшение выбросов CO₂ за счет оптимизации различных процессов компании. Это цифровизация технологических и управленческих процессов, которая создаёт потенциальные возможности для получения различных эффектов, в том числе за счет снижения расходов на энергию и сырье, сокращения времени производственного цикла, улучшения точности и стабильности процессов, а также уменьшения потребности в трудовых ресурсах. Оптимизация работы технологического оборудования направлена, в большей степени, на повышение эффективности работы оборудования и уменьшение потребления энергии, а оптимизация логистических операций – на сокращение расходов на транспортировку, хранение и утилизацию продукции, что приводит к снижению потребления энергии и выбросов CO₂. Особую роль в данной группе опций занимает внедрение современных подходов к управлению производством, которое призвано сократить потребление энергии и сырья, улучшить качество продукции и оптимизировать производственные процессы компании. Повышение энергоэффективности реализуется через такие опции, как модернизация и увеличение доли энергоэффективного оборудования (замена устаревшего оборудования на более эффективное, внедрение системы мониторинга энергопотребления, повышение квалификации персонала по энергосбережению и пр.), а также когенерация энергии и рекуперация отработанного тепла. Кроме того, реализуются опции, направленные на предотвращение выбросов ПГ путем обнаружения и предотвращения утечек сырья и энергии, а также опция повышения износостойкости оборудования и объектов инфраструктуры. Реализация всех этих опций декарбонизации может потребовать значительных финансовых и временных затрат на их разработку, внедрение и поддержание, однако они могут быть достаточно результативными за счет существенного уменьшения расходов на энергию, сырье и ремонт оборудования, с одновременным сокращением выбросов углекислого газа и других вредных веществ. Реализация этой группы опций требует комплексного

подхода, включающего в себя как технические, так и организационные меры при активном участии персонала на всех уровнях¹⁷¹.

Вторая группа опций декарбонизации («Переход на низкоуглеродные источники энергии») является одной из наиболее эффективных для снижения выбросов ПГ в производственных процессах. Она включает в себя ряд приемов, направленных на замену традиционных видов топлива на более экологически чистые альтернативы, такие как электроэнергия, ВИЭ и низкоуглеродные виды сырья. Вместе с тем, реализация данных опций сопряжена с рядом особенностей. Например, замена традиционных видов топлива на электроэнергию требует обеспечения достаточного количества надёжных источников электроэнергии, которые, в свою очередь, должны быть устойчивыми и экологически чистыми. Внедрение и масштабирование ВИЭ требует развития новых мощностей и инфраструктуры, однако необходимо учитывать углеродный след, возникающий при производстве таких мощностей, а также факт того, что поставки энергии от ВИЭ могут быть неустойчивыми. Важно отметить, что рост доли ВИЭ должен быть также подкреплён развитием технологий хранения энергии, таких как батареи или системы хранения гидроэнергии. Использование биотоплива, газа и других низкоуглеродных видов топлива, а также низкоуглеродного сырья (например, биомассы) может потребовать существенной модификации действующих систем и замены оборудования на более современное. Переход на низкоуглеродные источники энергии представляет собой значимое направление декарбонизации промышленности в целом, но все это требует значительных изменений в производстве, что определяет необходимость доступа к новым технологиям, значительных инвестиций и организационных изменений¹⁷²¹⁷³. Разумное поступательное планирование и реализация перехода на низкоуглеродные источники энергии могут оказаться важными факторами,

¹⁷¹ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

¹⁷² Маликова О. И., Кирюшин П. А., Николаева А. В. Технологические детерминанты трансформации возобновляемой энергетики и государственной поддержки развития энергетической отрасли // Управленческие науки = Management Sciences in Russia. – 2021. – Т. 11(1). – С. 35-50. – DOI: 10.26794/2404-022X-2021-11-1-35-50.

¹⁷³ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

влияющими на устойчивость производственных систем в долгосрочной перспективе¹⁷⁴.

Третья группа опций декарбонизации («Работа с попутными компонентами и отходами производства») помогает минимизировать прямые выбросы CO₂ в атмосферу, уменьшить зависимость от ископаемых источников энергии, а также повысить эффективность использования ресурсов и уменьшить воздействие промышленности на окружающую среду. Так, переработка ПНГ для производства продукции является одним из наиболее перспективных методов декарбонизации. Вместо того чтобы сжигать ПНГ, его можно использовать в качестве сырья для производства более экологически чистой электроэнергии, топлива для транспорта, а также других продуктов. Это может быть осуществлено путём установки собственных энергетических источников на базе ПНГ, что позволит сократить выбросы углекислого газа в атмосферу и снизить затраты на энергию¹⁷⁵. Особое место в перечне опций декарбонизации занимают технологии УХУ – технологические цепочки секвестрации (улавливание и захоронение) и использования CO₂. Суть решения заключается в улавливании CO₂ из выбросов промышленных объектов, его транспортировке и захоронении в подземных резервуарах или его использовании. Вместо того чтобы просто захоронять CO₂, его можно использовать в качестве сырья для производства полезных продуктов, таких как удобрения, топливо, строительные материалы и др. Самым распространённым с учетом текущего уровня развития технологий вариантом использования CO₂ является его применение для повышения нефтеотдачи (CO₂-EOR) (англ. Enhanced oil recovery) с последующим хранением в истощённых нефтяных и газовых месторождениях. Следует отметить, что реализация полной технологической цепочки УХУ зачастую подразумевает участие и других компаний (помимо нефтегазовых), что требует построения особых форм реализации таких инициатив и выстраивания межотраслевого

¹⁷⁴ Kryukov V., Gorbacheva N., Suslov N. Renewable energy and prospects for decarbonising the Asian Russia // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 470. – P. 01037. – DOI: 10.1051/e3sconf/202347001037.

¹⁷⁵ Рядинская А. П., Череповицына А. А. Утилизация попутного нефтяного газа в России: методы и перспективы производства продуктов газохимии // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2022. – № 2. – С. 19–34. – DOI:10.37614/2220-802X.2.2022.76.002.

взаимодействия. В целом, работа с попутными компонентами и отходами производства – это комплекс мер, которые позволяют сократить количество выбрасываемых в атмосферу ПГ и снизить влияние нефтегазового производства на окружающую среду. Кроме того, использование этих методов может способствовать повышению эффективности производства и сокращению затрат на энергию и ресурсы. Однако необходимо тщательно оценивать эффективность и безопасность данных методов, чтобы избежать негативных последствий для окружающей среды и здоровья человека¹⁷⁶.

Группу опций декарбонизации, связанных с применением способов корпоративного управления, следует выделить отдельно. Опции данной группы направлены на изменения на уровне корпоративного управления, связаны с серьёзными стратегическими решениями и позволяют компаниям в случае их реализации не только сократить свой углеродный след, но и повлиять на свою конкурентоспособность и репутацию. Одной из опций, относящейся к данной группе, являются дивестиции, которые могут быть более радикальными (например, полный «выход» компании из нефтегазовой отрасли) и менее радикальными (например, продажа или перераспределение активов с высоким уровнем выбросов ПГ). Данный подход может позволить компаниям избежать потенциальных убытков, связанных с изменением рыночных условий и растущими экологическими требованиями, а также сформировать определённую «низкоуглеродную» репутацию. Вместе с тем, такие радикальные действия характерны только для тех компаний, которые готовы полностью изменить сферу деятельности и имеют для этого набор необходимых и достаточных условий. Обращаясь к типам стратегий нефтегазовых компаний, выделенных в главе 1 (раздел 1.4), можно отметить, что такие действия характерны для «зеленых» компаний, которые ориентируются на полный отказ от ископаемых источников энергии и переходят на новые низкоуглеродные продукты¹⁷⁷.

¹⁷⁶ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

¹⁷⁷ Там же.

Еще один корпоративный метод, который позволяет компаниям декарбонизировать свою деятельность, – это формирование взаимоотношений с ответственными поставщиками и подрядчиками. Крупные компании все чаще начинают «требовать» от своих поставщиков участия в программах и мероприятиях декарбонизации и снижения выбросов углекислого газа. Такой подход направлен, в большей степени, на формирование экологически ответственной цепи поставок и повышение качества продукции. В целом, использование методов корпоративного управления является эффективным способом для сокращения выбросов; вместе с тем, такие меры могут быть достаточно радикальными и полностью изменить сферу деятельности и бизнес-модель компании¹⁷⁸.

Согласно предложенному в главе 1 (раздел 1.1) разделению мер достижения углеродной нейтральности на группы, компании ориентируются не только на декарбонизацию, под которой в рамках настоящего исследования подразумевается комплекс мер по уменьшению выбросов ПГ в атмосферу, но и на другие направления низкоуглеродной деятельности, которые позволяют достичь «чистого нуля». В рамках исследования это выделено как отдельная группа мер – меры компенсационного характера (компенсационные меры, или компенсация выбросов). Такая группа мер с ориентацией на принятые в рамках данной работы положения не относится к деятельности по декарбонизации, а определяет основу компенсационной деятельности компании при движении к углеродной нейтральности. Компенсационная деятельность направлена, прежде всего, на то, чтобы восполнить остаточные выбросы, избежать или предотвратить которые в текущий момент времени невозможно или нецелесообразно. Чаще всего механизм работы таких мер основан на некоторой «плате» за эквивалентное количество выбросов ПГ, которые должны быть компенсированы иным проектом (в другом секторе, в другом месте). Примеры компенсационных мер представлены в таблице 2.2.

¹⁷⁸ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

Таблица 2.2 – Примеры компенсационных мер

Опции	Примеры реализаций опций
Инвестиции в технологии и активы возобновляемой энергетики	Сооружение ветропарка и ввод его в коммерческую эксплуатацию. Разработка технологий использования геотермальной энергии.
Инвестиции в разработку и производство энергоносителей с низкой углеродоемкостью	Производство биометана, биодизеля, устойчивого авиационного топлива.
Инвестиции в регенеративные проекты землепользования и лесовосстановления	Проекты по искусственному лесовосстановлению и предотвращению лесных пожаров. Проекты по внедрению углерод-аккумулирующих технологий для увеличения поглотительных способностей почвы.

Источник: Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

В теории и практике существует некое смешение понятий, приводящее к тому, что компенсационные меры также относят к мерам декарбонизации. Однако важно, что концепция углеродной нейтральности в качестве основной включает в себе идею остановить рост концентрации ПГ в атмосфере за счет уравнивания массы выбросов ПГ с массой их поглощения. Таким образом, в рамках данной концепции декарбонизация может рассматриваться как одно из главных направлений достижения углеродной нейтральности наравне с компенсацией выбросов, принципы работы которой иные¹⁷⁹.

Согласно доступным оценкам экспертов, особый интерес среди широко обсуждаемых в науке и используемых на практике мер вызывают решения по предотвращению попадания уже образовавшегося углекислого газа в атмосферу – улавливание и хранение углерода, известные как решения УХУ. Именно они часто оказываются важной составляющей наиболее реалистичного из всех имеющихся путей к снижению уровня выбросов ПГ. Признанным во всём мире является факт того, что использование УХУ в сочетании с другими опциями декарбонизации позволит достичь наиболее эффективной по стоимости

¹⁷⁹ Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

комбинации^{180,181}. Именно это в последние годы побудило рост активности в области УХУ по всему миру.

Следует отметить, что УХУ относятся к опциям декарбонизации, которые направлены на предотвращение попадания уже образовавшегося CO₂ в атмосферу и позволяют двигаться к углеродной нейтральности постепенно, без радикальных изменений в промышленных и энергетических процессах. Именно это укрепляет позиции данного направления в общей карте декарбонизации. Вместе с тем, комплекс технологий УХУ может «работать» с мощностями, использующими в качестве топлива ископаемое топливо или биомассу, или может захватывать CO₂ из воздуха. Первая группа решений направлена на предотвращение и, в конечном счете, уменьшение выбросов ПГ в атмосферу от промышленных источников, вторая группа – на снижение уже существующей в атмосфере концентрации CO₂ (решения DAC). Удаление углекислого газа напрямую из атмосферы в долгосрочной перспективе может сбалансировать остаточные выбросы секторов, где свести их «до нуля» не представляется возможным (например, тяжелая промышленность и дальний транспорт)¹⁸².

Особое место УХУ занимают в картах декарбонизации нефтегазовых компаний в связи с возможностью полезного использования CO₂ для повышения нефтеотдачи пластов (CO₂-EOR). На сегодняшний день порядка 2/3 проектов по миру реализуется через CO₂-EOR, определяя развитие данного направления в непосредственной связке с нефтегазовыми компаниями.

Несмотря на то что в России нет ни одного действующего коммерческого проекта, комплекс УХУ рассматривается как одно из направлений в рамках Стратегии с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 года. Ведущие российские эксперты также отмечают необходимость использования «имеющихся на внутреннем рынке беспроигрышных (с точки зрения инвестиций)

¹⁸⁰ Global Status of CCS 2021 // Global CCS Institute. – 2021. – 79 p. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf (дата обращения: 01.03.2023).

¹⁸¹ Pacala S., Socolow R. Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies // Science. – 2004. – Vol. 305 (5686). – P. 968-972. – DOI: 10.1126/science.1100103.

¹⁸² CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market // IEA. – 2023. – 121 p. – URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).

технологических и инновационных решений и наилучших доступных технологий (НДТ) по снижению эмиссий (включая улавливание и утилизацию ПГ) и поглощению углерода (прежде всего природными экосистемами, особенно лесными)»¹⁸³. Это подтверждает перспективность развития технологических цепочек УХУ в промышленном секторе России.

2.2 Сущность и типология технологических цепочек УХУ

УХУ – это укрупненное название набора технологий, которые обычно соединены в единую технологическую цепочку и направлены на улавливание CO₂ (чаще всего техногенного), его очистку и подготовку, транспортировку, использование и/или захоронение под землей. УХУ относят к ряду «зелёных» технологий, однако такие решения носят скорее комплементарный характер. Эксперты называют ее проверенной и безопасной технологией (англ. proven and safe technology)¹⁸⁴, которая направлена на предотвращение выбросов CO₂, а также ключевой технологией для декарбонизации секторов, в которых существует ограниченное количество других опций декарбонизации, таких как цементная, металлургическая и химическая промышленность¹⁸⁵.

В общем виде, когда речь идет об улавливании и последующем обращении с техногенным CO₂, комплекс УХУ включает в себя три последовательных технологических этапа:

1) улавливание углекислого газа на источнике выбросов – крупных энергетических или промышленных мощностях, например на сталелитейных,

¹⁸³ Порфирьев Б. Н., Широков А. А. Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов: сценарии и реалии для России // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92. – № 5. – С. 415–423. – DOI: 10.31857/S086958732205005X.

¹⁸⁴ Budinis S., Krevor S., Mac Dowell N., Brandon N., Hawkes A. 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.

¹⁸⁵ IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC. – 2005. – 442 p. – URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf (дата обращения: 06.04.2023).

химических и цементных заводах, на угольных электростанциях, нефте- и газоперерабатывающих комбинатах и др.;

2) компримирование и транспортировка газа одним из известных способов;

3) полезное использование газа (прямое или с преобразованием CO_2) и/или его закачка с целью долгосрочного хранения под землей на суше или на шельфе.

Уловленный CO_2 может использоваться или закачиваться под землю для перманентного хранения «на месте». Если этого не происходит, углекислый газ сжимается и транспортируется по трубопроводу, на кораблях, по железной дороге или в грузовиках-цистернах для использования в различных промышленных целях (например, для производства синтетического топлива, строительных материалов) или закачивается на расстоянии в глубокие геологические формации, такие как соленосные пласты, истощённые нефтяные и газовые резервуары или нетрадиционные ресурсы хранения (например, базальты, перидотиты) для постоянного хранения¹⁸⁶. Самым распространённым вариантом использования CO_2 , как отмечалось, на сегодня является его применение для повышения нефтеотдачи (CO_2 -EOR) с последующим хранением в истощённых нефтяных и газовых месторождениях.

Укрупнённая технологическая схема УХУ, разработанная Глобальным институтом CCS (англ. Global CCS Institute) и отражающая основные источники выбросов для улавливания углекислого газа, варианты его транспортировки и хранения представлена на рисунке 2.1.

Комплекс технологий УХУ позволяет предотвратить попадание уже образовавшихся выбросов CO_2 в атмосферу, обеспечивая тем самым некоторую дополнительную возможность для продолжения использования ископаемых видов топлива в условиях растущих требований по снижению выбросов ПГ.

¹⁸⁶ CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market // IEA. – 2023. – 121 p. – URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).

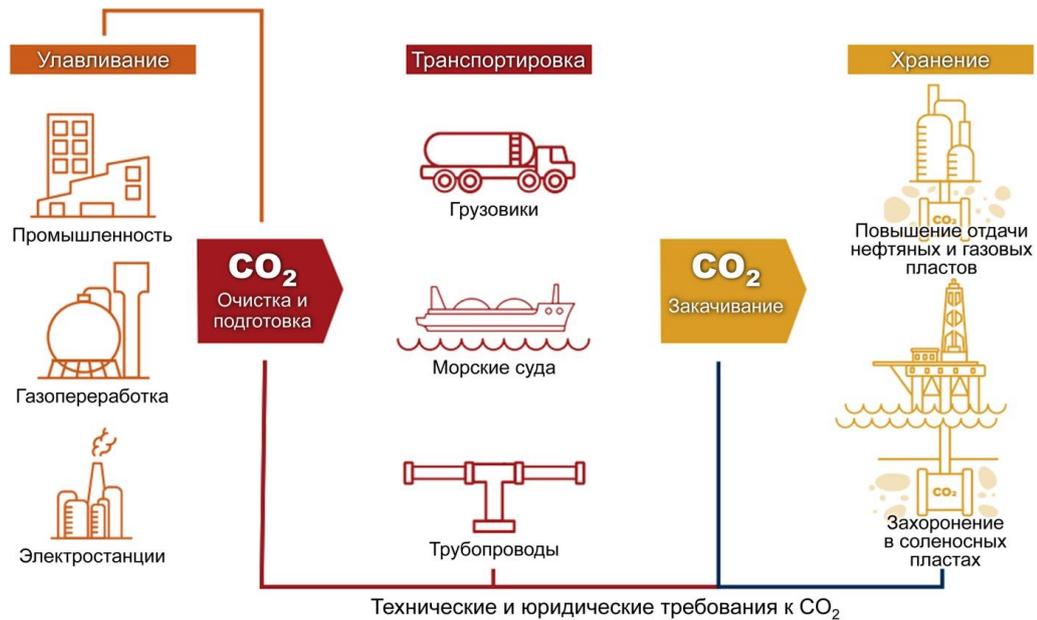


Рисунок 2.1 – Укрупнённая схема технологической цепочки улавливания и хранения углекислого газа

Источник: Budinis S., Krevor S., Mac Dowell N., Brandon N., Hawkes A. 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; переведено на русский язык автором.

Другими словами, улавливание и хранение углерода позволяет в некоторой степени «продлить жизнь» ископаемым видам топлива, как минимум, сделав процесс энергетического перехода, в случае если он произойдёт, более разумным и плавным. УХУ являются перспективными для внедрения на традиционных энергетических объектах, а также в промышленных отраслях, испытывающих большую потребность в энергии. Кроме того, по сравнению с другими решениями, например производством водорода, технологические цепочки УХУ считаются более реальными к внедрению и перспективными с коммерческой точки зрения, так как сохраняют действующие промышленные системы и в некоторых случаях позволяют получить определённую выгоду, например, за счет использования уловленного CO₂ на нефтегазовых месторождениях для операций CO₂-EOR.

Если говорить о достоинствах УХУ, определяющих перспективность развития данного направления, то можно отметить, что они способны решить сразу несколько потенциальных проблем, а именно:

1) снизить уровень выбросов ПГ на действующих промышленных и энергетических предприятиях путём предотвращения их попадания в атмосферу;

2) сократить уровень выбросов в энергоёмких отраслях промышленности, где «отказаться» от выбросов практически невозможно, а сократить иными способами – трудно (например, цементная промышленность, производство чугуна и стали, химическая промышленность)¹⁸⁷;

3) внести существенный вклад в продолжение эксплуатации действующих мощностей, позволяя избежать преждевременного вывода ценных активов¹⁸⁸;

4) снижать уровень концентрации CO₂ через прямое улавливание из атмосферы (DAC) или через проекты в области биоэнергетики (англ. Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS)¹⁸⁹, что в будущем позволит прийти к углеродно-отрицательным проектам;

5) обеспечить производство углеродно-нейтрального «голубого» водорода как альтернативы ископаемым видам топлива;

б) смягчить и сделать постепенным процесс энергетического перехода.

Потенциальные преимущества технологической цепочки УХУ для достижения климатических целей достаточно очевидны. Следует заметить, что их реализация по миру сопряжена с рядом существенных трудностей. Прежде всего, это связано с высокой стоимостью реализации таких решений, что будет более подробно обсуждено далее. К сложностям технологического характера можно отнести отсутствие зрелых масштабированных технологий улавливания CO₂, а дальнейшие этапы технологического процесса – полезное использование

¹⁸⁷ Углеродно-нейтральные энергоёмкие отрасли промышленности. Технологический обзор // UNECE. – 2023. – 24 p. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_RU_draft_1.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

¹⁸⁸ CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market // IEA. – 2023. – 121 p. – URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).

¹⁸⁹ Bioenergy and Carbon Capture and Storage // Global CCS Institute. – 2020. – 12 p. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/BIOENERGY-AND-CARBON-CAPTURE-AND-STORAGE_Perspective_New-Template.pdf (дата обращения: 18.03.2024).

или захоронение газа в подземных формациях – также остаются проблематичными и по ряду аспектов спорными.

Большинство действующих проектов, реализующих закачку CO₂ в подземные формации, используют его для повышения нефтеотдачи (CO₂-EOR); однако и здесь возникает ряд вопросов, а именно: безопасность таких решений, которая все еще изучается и является предметом обеспокоенности общественности в местах реализации таких инициатив^{190,191}, территориальная «привязка» технологических цепочек к нефтегазовым месторождениям, которая не всегда возможна, отсутствие «реального» спроса на CO₂ со стороны нефтегазовых компаний и пр. Проекты УХУ по своей сути могут быть лишь косвенно связаны с получением дохода, а в ряде случаев, когда предусмотрено только геологическое хранение, он отсутствует. Кроме того, законодательная база по долгосрочному хранению CO₂ под землей в большинстве стран только зарождается¹⁹². Проекты CO₂-EOR могут компенсировать хотя бы часть затрат на УХУ за счет дополнительной добычи нефти, но и они реализуются, согласно мировому опыту, лишь в странах с соответствующими мерами государственного регулирования. В условиях отсутствия в большей части стран и регионов должного регулирования затраты на улавливание и хранение углерода на сегодня не сопоставимы с потенциальными выгодами, что осложняет развитие таких проектов.

Структура технологической цепочки УХУ варьирует в зависимости от источника выбросов, способа улавливания, варианта транспортировки и того, на какие цели направляется уловленный CO₂. Различные комбинации звеньев технологической цепи лежат в основе проектов и формируют следующую типологию комплекса технологий УХУ:

- 1) улавливание и хранение углерода (англ. carbon capture and storage, CCS);

¹⁹⁰ Tsvetkov P., Cherepovitsyn A., Fedoseev S. Public perception of carbon capture and storage: A state-of-the-art overview // *Heliyon*. – 2019. – Vol. 5. – Is. 12. – P. e02845. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02845.

¹⁹¹ Череповицын А. Е., Ильинова А. А. Концептуальное представление технологий захоронения углекислого газа и их безопасность // *Российский экономический интернет-журнал*. – 2014. – № 4. – 16 с.

¹⁹² Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // *Экономическое возрождение России*. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181

2) улавливание и использование углерода (англ. carbon capture and utilization, CCU);

3) улавливание, использование и хранение углерода (англ. carbon capture, utilization and storage, CCUS).

В таблице 2.3 представлена общая характеристика и анализ обозначенных типов проектов УХУ с выделением сущности и цели реализации, а также определением характеристик по основным экономическим, технологическим и социальным аспектам.

Следует также внести уточнения в предложенное разделение технологических цепочек УХУ на типы с ориентацией на материалы МЭА¹⁹³. Так, улавливание и хранение углерода (CCS) также включает системы по прямому улавливанию углекислого газа из воздуха и на объектах биоэнергетики (DAC, BECCS) с его последующим хранением. Улавливание и использование углерода (CCU) также включает в себя помимо традиционных цепочек прямое улавливание CO₂ из воздуха и на объектах биоэнергетики при условии его полезного использования. Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS) включает в себя CCS, CCU, а также области применения, где CO₂ одновременно используется и хранится, например, при повышении нефтеотдачи пластов (CO₂-EOR) или при производстве строительных материалов – бетона, где часть или весь CO₂ хранится перманентно. Эксперты называют последнее негеологической секвестрацией – достаточно новое направление в науке и практике. В целом, такие дополнения не противоречат общей логике разделения УХУ на типы, представленные в работе.

¹⁹³ CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market // IEA. – 2023. – 121 p. – URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).

Таблица 2.3 – Характеристика различных типов технологических цепочек УХУ

Характеристика	Улавливание и хранение углерода (CCS)	Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS)	Улавливание и использование углерода (CCU)
Сущность технологической цепочки	Захват и захоронение CO ₂	Захват, захоронение и использование CO ₂	Захват и использование CO ₂
Цель реализации	Экологический эффект (снижение выбросов ПГ) Формирование «зеленой» репутации Апробация технологий, решений и установок Обеспечение доступа к технологическим решениям и информации Коммерческий эффект (в случае углеродного регулирования)	Коммерческий эффект (по возможности) Инновационно-технологическое развитие производств (в большей степени связанное с полезным использованием CO ₂) Экологический эффект (снижение выбросов ПГ) Формирование «зеленой» репутации Внедрение в деятельность основ циркулярной экономики, ресурсосбережения, низкоуглеродной экономики	
Ключевые участники	Государство Общество Бизнес	Бизнес Государство Общество	Бизнес Государство
Экономические аспекты	Не являются коммерческими, высокий уровень капитальных и эксплуатационных затрат, отсутствие дохода (исключение – реализация проекта в рамках углеродного регулирования).	Возможно получение коммерческого эффекта, однако величина капитальных и эксплуатационных затрат на текущем уровне развития технологий велика и может быть не сопоставима с доходами. Источники новых возможностей для бизнеса (развитие новых производств, диверсификация)	
Технологические аспекты	Технологическая цепочка широко апробирована; особое внимание – к захоронению и мониторингу хранилищ.	Технологическая цепочка – на стадии апробации и масштабирования, особое внимание – к технологиям использования CO ₂ , захоронению и мониторингу хранилищ.	Технологическая цепочка не апробирована в промышленных масштабах, особое внимание – к технологиям использования CO ₂ .
Социальные аспекты	Снижение выбросов ПГ в регионе, социальные инвестиции в развитие региона, создание новых рабочих мест, вклад в продолжение эксплуатации действующих мощностей и работы крупных промышленных предприятий и т.д.		

Источник: адаптировано автором на основе:

Pinova A., Romasheva N., Cherepovitsyn A. CC(U)S Initiatives: Public Effects and “Combined Value” Performance // Resources. – 2021. – Vol. 10 (6). – P. 61. – DOI: 10.3390/resources10060061;

Ромашева Н. В., Ильинова А. А., Евсеева О. О. Государство как ключевой

стейкхолдер в рамках перспектив реализации проектов CC(U)S в России // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). Серия: Социально-экономические науки. – 2020. – Т. 13. – № 5. – С. 209–223. – DOI: 10.17213/2075-2067-2020-5-209-223.

В общем случае проекты улавливания и хранения углерода (CCS) не являются коммерческими, но они могут реализовываться в рамках углеродного регулирования – например, служить вариантом снижения платы за выбросы ПГ. Примерами таких проектов являются проекты Sleipner и Snøhvit в Норвегии, которые уже более 20 лет функционируют на основе коммерческой логики в связи с тем, что в стране действует налог на углерод. Важная роль в таких проектах обычно отводится государству, в том числе в части создания системы регулирования, побуждающей компании к реализации таких проектов, а общество является важным стейкхолдером, поскольку вопрос хранения CO₂ в различных регионах вызывает неоднозначную реакцию с точки зрения безопасности^{194,195}. Проекты CCUS и CCU предполагают использование CO₂, а первый – также его хранение. Это обстоятельство практически полностью исключает роль общества в проектах CCU, с точки зрения его возможного противодействия таким инициативам. Ключевым участником в проектах данных типов является бизнес, так как утилизация CO₂ предполагает получение новых продуктов, развитие производств и бизнес-направлений¹⁹⁶.

¹⁹⁴ Ilinova A. A., Romasheva N. V., Stroykov G. A. Prospects and social effects of carbon dioxide sequestration and utilization projects // Journal of Mining Institute. – 2020. – Vol. 244. – P. 493–502. – DOI: 10.31897/PMI.2020.4.12.

¹⁹⁵ Череповицын А. Е., Ильинова А. А., Евсеева О. О. Управление стейкхолдерами проектов секвестрации углекислого газа в системе государство – бизнес – общество // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 731. – DOI: 10.31897/PMI.2019.6.731.

¹⁹⁶ Евсеева О. О., Ильинова А. А., Череповицын А. Е. Согласование интересов ключевых стейкхолдеров при реализации проектов секвестрации CO₂ // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2018. – Т. 4. – № 60. – С. 133-141. – DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.4.2018.60.133-141.

2.3 Реализация УХУ в промышленности: мировой опыт, проблемы управления и роль в достижении углеродной нейтральности

Мировые действующие мощности УХУ по состоянию на 2023 год составляют порядка 40-50 Мт CO₂ в год¹⁹⁷, а суммарная мощность проектов на разных этапах – ранние этапы разработки (англ. early development), активная разработка (англ. advanced development), строительство (in construction), эксплуатация (operational) – составляет около 360 Мт CO₂ в год, что на 50 % больше, чем в 2022 году¹⁹⁸. Начиная с 2020 года среднегодовой темп роста мощностей стабильно превышает этот показатель. Однако, согласно прогнозам различных международных агентств и организаций, достижение целей Парижского соглашения по климату требует наращивания суммарной мощности таких объектов до 10 Гт CO₂ в год к 2050 году¹⁹⁹. С учетом того что разрыв огромный (два порядка), возникает вопрос, возможно ли реализовать такой уровень масштабирования, учитывая текущую ситуацию?

Основываясь на оценке МГЭИК о требованиях к улавливанию CO₂ для удержания прироста температуры²⁰⁰, Глобальный институт CCS сделал вывод, что к 2050 году общемировой объем улавливания техногенного CO₂ должен превысить 5 Гт для компенсации остаточных выбросов, которые трудно сократить, и корректировки глобального углеродного бюджета²⁰¹. Для этих целей к 2050 году масштабы мощностей УХУ должны вырасти более чем в 100 раз. Основываясь на этой оценке, эксперты прогнозируют сооружение от 70 до 100 объектов УХУ в год по миру, создание до 100 тыс. новых рабочих мест в строительстве и 30–40 тыс. постоянных рабочих мест для операторов и обслуживающего персонала, а также приближение мировой индустрии УХУ

¹⁹⁷ CCS Facilities Database // Global CCS institute. – 2023. – URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 10.04.2023).

¹⁹⁸ Там же.

¹⁹⁹ Global Status of CCS 2023 // Global CCS Institute. – 2023. – 97 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf> (дата обращения: 01.05.2023).

²⁰⁰ Global Warming of 1.5°C // IPCC. – 2018. – URL: <https://www.ipcc.ch/sr15/> (дата обращения: 01.04.2023).

²⁰¹ Global Status of CCS 2021 // Global CCS Institute. – 2021. – 79 p. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf (дата обращения: 01.03.2023).

к размеру мировой газовой промышленности в течение последующих нескольких десятилетий²⁰².

Обращаясь к сценарию МЭА “Net Zero”, можно заключить, что технологии УХУ не получат стремительного развития в ближайшие 5 лет; при этом к 2030 году прогнозируется их резкий рост до 1,6 Гт с увеличением до 7,6 Гт CO₂ в год к 2050 году²⁰³. Компания “BP”, принимая во внимание усиление интереса к декарбонизации по всему миру, а также допуская, что поставленные цели действительно будут достигнуты, в своем сценарии “Net Zero” прогнозирует рост суммарной мощности УХУ до 6 Гт CO₂ в год к 2050 году²⁰⁴. По оценкам агентства IRENA, улавливание углекислого газа достигнет уровня 3,4 Гт CO₂ в год к 2050 году. Также отмечается, что для достижения целей по сдерживанию прироста температуры необходимо нарастить масштабы улавливания с 1 до 2 Гт CO₂ в год уже к 2030 году²⁰⁵. Относительно низкое значение прогнозных данных объясняется предположением о том, что недорогие ВИЭ для многих секторов поставят под сомнение целесообразность развития УХУ, нацеленных, в том числе, на продление использования ископаемых видов топлива. Вместе с тем, автор не разделяет данную позицию.

Учитывая нелинейность мирового роста мощностей УХУ и отсутствие унифицированных прогнозных данных за определённый период, имеющиеся в открытых источниках данные целесообразно представить в виде графика, отражающего возможные сценарии увеличения мощностей в ближайшие 30 лет (см. рисунок 2.2). Для анализа и выработки консенсус-прогноза прогнозные значения представлены с ориентацией на то, что развитие мощностей УХУ является обязательным условием достижения целей Парижского соглашения по климату. Количественные прогнозы по развитию УХУ, использованные

²⁰² Там же.

²⁰³ Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector // International Energy Agency. – 2021. – 222 p. – URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf (дата обращения: 01.03.2023).

²⁰⁴ BP Energy Outlook: 2022 edition // BP. – 2022. – 109 p. – URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> (дата обращения: 07.05.2023).

²⁰⁵ Reaching zero with renewables capturing carbon // IRENA. – 2021. – 107 p. – URL: https://www.irena.org/-/media/Irena/Files/Technical-papers/IRENA_Capturing_Carbon_2021.pdf?rev=bf05359177504164aab7fad527b35e0d (дата обращения: 07.05.2023).

для составления консенсус-прогноза, в большей степени ориентируются на численные прогнозные значения мощностей улавливания, так как именно этот этап технологической цепочки является основным. Несмотря на разные оценки различных агентств, все обсужденные выше организации однозначно подтверждают перспективность УХУ как опции декарбонизации в общей карте движения к углеродной нейтральности.

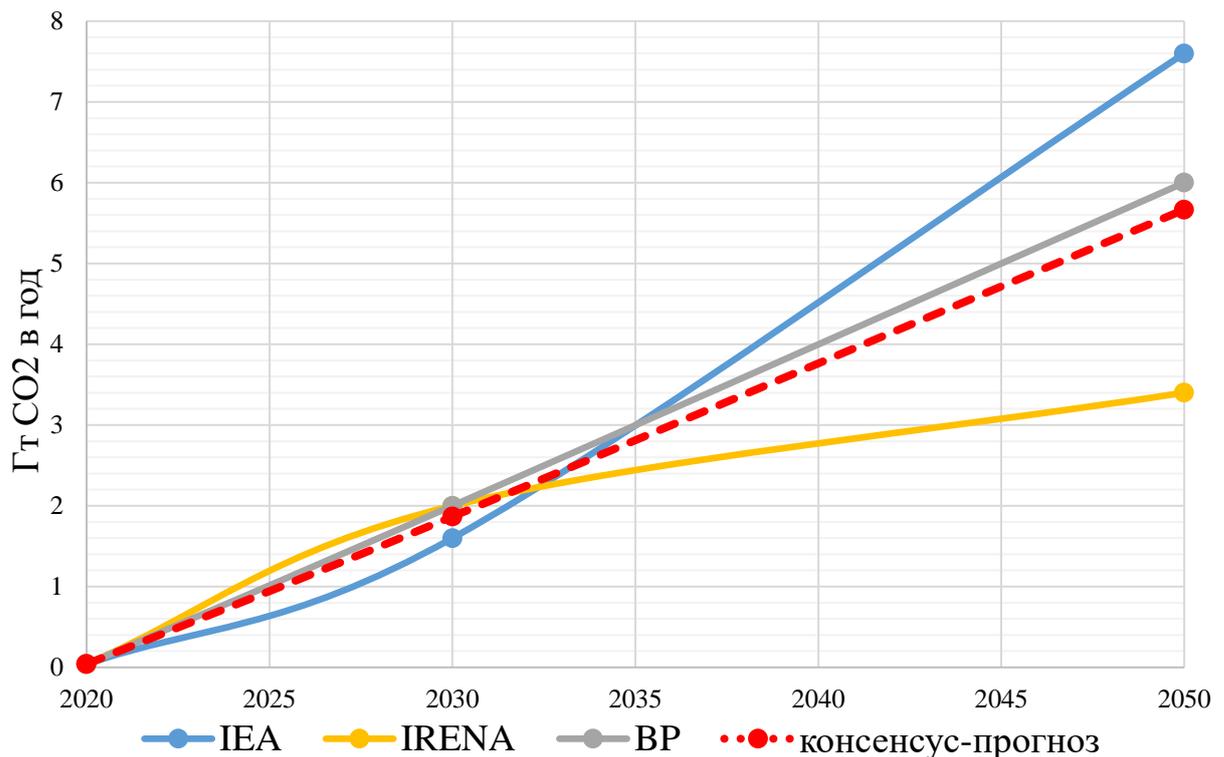


Рисунок 2.2 – Консенсус-прогноз развития мощностей УХУ в случае достижения нулевых выбросов к 2050 году

Источник: 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

Разрыв между существующими на сегодня (около 40-50 Мт CO₂ в год) и необходимыми для достижения указанных целей мощностями УХУ (5,8 Гт CO₂ в год по консенсус-прогнозу) является очень существенным. При прогнозируемых масштабах улавливания в год и существующем объеме годовых выбросов –

36,3 Гт по состоянию на 2021 год²⁰⁶ – можно предположить, что доля УХУ среди прочих мер декарбонизации может занять порядка 16 %. Это примерно соотносится с прогнозом МЭА, которое заявляет, что доля УХУ в общем объеме глобальных мер декарбонизации может составить порядка 18 %. Всё это потребует увеличения мер поддержки для повышения скорости и увеличения масштабов развития мощностей улавливания и хранения углерода. Очевидно, что темпы развития УХУ будут определять и масштабы инвестиций, направляемых на реализацию этих инициатив²⁰⁷.

Согласно последним оценкам МЭА²⁰⁸, несмотря на рост активности в области УХУ по всему миру, к 2030 году объем мощностей будет приближаться примерно к 1 Гт CO₂ в год. Разрыв между данным показателем и представленными выше необходимыми значениями по объемам мощностей подчеркивает необходимость усиления государственной поддержки по всему миру и дальнейших скоординированных усилий всех участников процесса, прежде всего, промышленных компаний. Также необходимо отметить, что при увеличении темпов строительства и ввода технологических цепочек в эксплуатацию на уровне отдельных стран и регионов могут возникнуть проблемы, связанные с подготовкой мощностей для геологического захоронения CO₂. Наличие хорошо изученных участков недр для хранения углекислого газа, с учетом длительности проведения таких работ, может стать узким местом для развития УХУ уже в ближайшем будущем²⁰⁹.

Как отмечалось, в России действующие проекты УХУ отсутствуют, но в мировом масштабе накоплен некоторый опыт. Согласно базе данных

²⁰⁶ Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021. Global emissions rebound sharply to highest ever level // IEA. – 2021. – 14 p. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf> (дата обращения: 03.07.2022).

²⁰⁷ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

²⁰⁸ CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market // IEA. – 2023. – 121 p. – URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).

²⁰⁹ Там же.

Глобального института CCS (англ. CCS Database. Global CCS institute)²¹⁰ – основному источнику информации по объектам УХУ – по состоянию на 2023 год в мире на разных стадиях реализации, от ранних этапов разработки до действующих, находится 392 коммерческих проекта УХУ (см. рисунок 2.3), и ежегодно количество проектов неуклонно растет. Так, в 2023 году число коммерческих проектов выросло в два раза по сравнению с 2022 годом – был зафиксирован один из самых высоких темпов роста (102 %) за последние пять лет. Почти в три раза увеличилось число коммерческих проектов на ранних этапах разработки (с 74 до 204 единиц), что подчеркивает растущий интерес к внедрению данного комплекса технологий.



Рисунок 2.3 – Динамика изменения количества коммерческих проектов УХУ на разных стадиях в 2019-2023 гг.

Источник: Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – Т. 1. – №. 57. – С. 169-174.

Если говорить о действующих проектах (стадия эксплуатации), которые уже сегодня вносят свой вклад в поставленные на различных уровнях задачи по снижению выбросов ПГ, то их насчитывается около 40 (см. рисунок 2.4). Следует отметить достаточно медленный темп ввода мощностей в эксплуатацию,

²¹⁰ CCS Facilities Database // Global CCS institute. – 2023. – URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 10.04.2023).

что обусловлено длительным периодом строительства мощностей, а также экономическими проблемами.

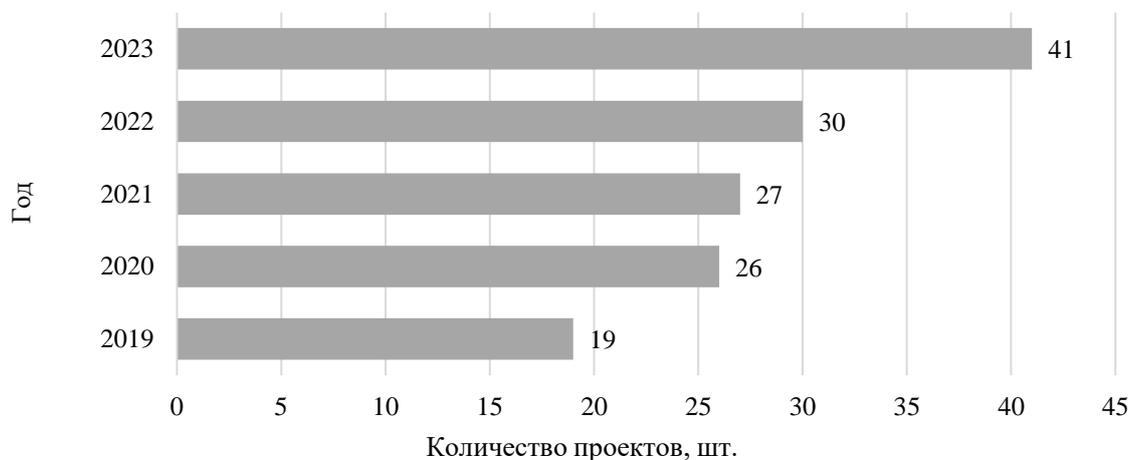


Рисунок 2.4 – Динамика изменения количества действующих коммерческих проектов УХУ в 2019-2023 гг.

Источник: Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – Т. 1. – №. 57. – С. 169-174.

За последний год количество действующих проектов увеличилось более чем на 30 %. Только в Китае в течение 2023 года было введено в эксплуатацию 5 новых объектов УХУ²¹¹ – это самый высокий показатель в мире. Для сравнения, в 2022 году суммарно по всем странам рост количества проектов на стадии эксплуатации составил только три единицы.

Основными источниками техногенного CO₂ являются объекты энергетики и промышленности, что определяет их ключевую роль при построении технологической цепочки. Основные известные и используемые в мировой практике способы транспортировки – трубопроводы и морские суда (последние – реже), способы захоронения – в отработанных нефтяных и газовых, а также соленосных пластах. Комплекс таких технологических решений с разной комбинацией звеньев технологической цепи лежит в основе проектов УХУ, реализуемых в мире.

²¹¹ Global Status of CCS 2023 // Global CCS Institute. – 2023. – 97 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf> (дата обращения: 01.05.2023).

Большинство действующих проектов УХУ в мире реализуется с применением решений CO₂-EOR на заключительном этапе технологической цепочки. Почти в половине действующих проектов CO₂ улавливается на предприятиях по переработке природного газа. В 2021 году в Исландии начал работу первый крупномасштабный проект УХУ с улавливанием газа напрямую из атмосферы (DAC), еще несколько подобных проектов находятся на разных стадиях, предшествующих эксплуатации. Во всех остальных действующих проектах CO₂ улавливается с промышленных источников (техногенный CO₂). Еще как минимум четыре проекта планируется запустить к 2027 году, в которых CO₂ будет улавливаться в процессе получения энергии из биомассы (BECCS)²¹². В целом, большая часть мощностей УХУ по миру связана с переработкой природного газа и производством химикатов (этанол, удобрения и др.), а также с производством чугуна и стали и электроэнергии. Лидерами по количеству проектов УХУ на сегодняшний день являются США, Китай, Великобритания, Австралия; отдельно стоит выделить Канаду, Норвегию и Нидерланды как страны с крупными действующими мощностями улавливания, хранения и использования углерода. В целом, предположение о том, что в течение следующих 30-50 лет и далее будет создаваться новая масштабная мировая индустрия по улавливанию и хранению углерода, по мнению автора, является реалистичным.

Существуют примеры проектов УХУ, функционирующих в рамках одной отрасли, однако они, скорее, являются единичными. Проекты, реализующиеся в одной отрасли, зачастую базируются на объектах по производству водорода и биоэтанола в нефтегазовой отрасли. Для реализации всей технологической цепи УХУ чаще задействованы разные сектора промышленности, что объясняется необходимостью реализации нескольких технологических этапов; в рамках одной отрасли это представляется возможным в редких случаях. В таблице 2.4 представлены примеры таких проектов²¹³.

²¹² Там же.

²¹³ 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.

Таблица 2.4 – Проекты УХУ, реализующиеся в рамках одной и нескольких отраслей промышленности

Проект	Страна	Количество отраслей	Категория проекта (по объемам улавливания) ²¹⁴	Стадия проекта ²¹⁵	Задействованные отрасли промышленности
Проект «Газпром нефть» (месторождение Русанда)	Сербия / Россия	1	Мелкий	В эксплуатации	Нефтегазовая
Baytown Low Carbon Hydrogen	США	1	Крупнейший глобальный	Активная разработка	Производство водорода
Acorn	Великобритания	2	Крупнейший глобальный	Ранние этапы разработки	Нефтегазовая, производство водорода
ACTL	Канада	2	Крупный	В эксплуатации	Нефтегазовая, химическое производство
CCU Lighthouse Carboneras	Испания	2	Средний	н /д	Производство цемента, химическое производство
Zero Carbon Humber	Великобритания	4	Крупнейший глобальный	н /д	Химическое производство, производство чугуна и стали, производство цемента, энергетическая

Источник: 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.

Так, на российском проекте ПАО «Газпром нефть» на месторождении Русанда в Сербии углекислый газ в объеме примерно 100 тыс. т в год отделяется от природного газа и закачивается в газовую шапку для поддержания пластового давления, то есть задействована одна отрасль – нефтегазовая. Другим примером проекта, реализующегося в рамках одной отрасли, является американский

²¹⁴ Для отнесения проекта к категории по объёму мощностей и стадии проекта используются классификации, разработанные Глобальным институтом CCS и Институтом энергетического перехода Керни.

²¹⁵ То же.

водородный проект Baytown Low Carbon Hydrogen, который будет введен в эксплуатацию в 2027 г. Оператор проекта – “ExxonMobil” – планирует построить крупнейший завод по производству низкоуглеродного водорода на своей нефтеперерабатывающей (нефтехимической) площадке в Бейтауне. Планируется, что ежедневный объем производства будет составлять порядка 280 млн м³ водорода, при этом 98 %, или до 7 млн т CO₂ в год, будет улавливаться и храниться²¹⁶.

Среди примеров проектов, реализующихся в двух и более отраслях, можно выделить шотландский проект Acorn с мощностью улавливания 5-10 млн т CO₂ в год²¹⁷. CO₂ будет улавливаться на газовых терминалах в Сент-Фергусе – одном из важнейших энергетических объектов Великобритании, а также на заводе по производству водорода из природного газа Acorn Hydrogen²¹⁸. Далее газ будет транспортироваться трубопроводами и морскими судами и закачиваться в постоянные хранилища под Северным морем.

Канадский проект АСТЛ является крупным – мощность улавливания 1,4-14 млн т CO₂ в год²¹⁹. Углекислый газ улавливается на химических заводах и заводе по производству удобрений (Nutrien), далее транспортируется трубопроводом протяженностью 240 км на нефтяные месторождения, где закачивается в пласты с целью повышения нефтеотдачи²²⁰. Трубопровод принадлежит сервисной компании “Wolf Midstream” (частная компания, которая владеет и управляет энергетическими активами в Западной Канаде²²¹), в то время как “Enhance Energy” (базирующаяся в Альберте компания по управлению

²¹⁶ CCS Facilities Database // Global CCS institute. – 2023. – URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 10.04.2023).

²¹⁷ Global Status of CCS 2023 // Global CCS Institute. – 2023. – 97 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf> (дата обращения: 01.05.2023).

²¹⁸ Acorn Projects // Acorn. – 2022. – URL: <https://www.theacornproject.uk/projects> (дата обращения: 25.01.2022).

²¹⁹ Global Status of CCS 2023 / Global CCS Institute. – 2023. – 97 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf> (дата обращения: 01.05.2023).

²²⁰ Global CCS Institute welcomes the 20th and 21st large-scale CCS facilities into operation // Global CCS Institute. – 2020. – 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: 25.01.2022).

²²¹ Wolf Stream. – 2022. – URL: <https://wolfmidstream.com/carbon/> (дата обращения: 25.01.2022).

выбросами CO₂²²²) является владельцем и оператором в части утилизации и хранения CO₂.

Проект CCU Lighthouse Carboneras в Испании является средним по мощности (0,7 млн т уловленного CO₂ в год). Проект будет базироваться на цементном заводе LafargeHolcim в Карбонерасе (Альмерия, Испания) и направлен на улавливание CO₂, выделяемого в процессе производства цемента, для дальнейшего преобразования, очистки и повторного использования для повышения урожайности в сельском хозяйстве. Проект не нуждается в системе транспортировки, так как утилизация углекислого газа планируется «на месте»²²³.

Крупнейший глобальный проект Zero Carbon Humber в Великобритании (18 млн т уловленного CO₂ в год) объединяет химические, металлургические, цементные и другие промышленные заводы, выбрасывающие CO₂. Норвежская энергетическая компания “Equinor” и британская электроэнергетическая компания “National Grid” являются партнерами проекта и предоставляют морские трубопроводы и инфраструктуру для хранения уловленного CO₂ в южной части Северного моря²²⁴.

Так, в рамках одной отрасли чаще реализуются мелкие и средние проекты, предполагающие использование и/или захоронение уловленного CO₂ «на месте», но есть и исключения. Крупные и крупнейшие глобальные проекты объединяют, как правило, производственные объекты, функционирующие в двух отраслях и более, технологические процессы которых могут быть различны. Например, в рамках одного проекта объединяются отрасли по производству цемента и удобрений. Можно резюмировать, что этапы технологической цепочки УХУ в рамках одного проекта в общем виде могут быть организованы следующим образом: CO₂ обычно улавливается на промышленных заводах (цементных, химических, металлургических) и энергетических объектах, транспортируется по трубопроводам, операторами которых являются нефтегазовые или специализированные компании, закачивается в нефтегазовые пласты с целью

²²² Enhance Energy. – 2022. – URL: <https://enhanceenergy.com/#3> (дата обращения: 25.01.2022).

²²³ Lighthouse Carboneras // Carbon Clean. – 2020. – URL: <https://www.carbonclean.com/news/lafargeholcim-and-carbon-clean-to-develop-large-scale-ccus-plant> (дата обращения: 25.01.2022).

²²⁴ Zero Carbon Humber. – 2022. – URL: <https://www.zerocarbonhumber.co.uk/> (дата обращения: 29.01.2022).

увеличения нефтеотдачи, направляется на повторное полезное использование в сельском хозяйстве и других отраслях и/или закачивается под землю для хранения. Это позволяет сформулировать идею о том, что технологические цепочки и проекты УХУ носят межотраслевой характер, что определяет особые подходы к организации и управлению ими. Такие сложные технологические цепочки представляют собой межотраслевые промышленные комплексы, требующие выстраивания межотраслевых связей и представляющие собой особый объект управления, подходы к которому отличаются от подходов, используемых на уровне предприятия или проекта²²⁵. Кроме того, в каждом конкретном случае такие промышленные комплексы УХУ являются уникальными. Совокупность факторов, определяющих особенности управления такими объектами, представлена на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Совокупность факторов, определяющих особенности управления межотраслевыми комплексами УХУ

Источник: составлено автором.

²²⁵ 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.

Реализация технологических цепочек УХУ предполагает необходимость учета особенностей задействованных в технологической цепочке отраслей. Технологическая и инфраструктурная обеспеченность каждого конкретного проекта УХУ, а также возможности по захоронению и утилизации углекислого газа в каждом конкретном случае также будут определять подходы к управлению такими системами. В случае полезного использования углекислого газа (получение на его основе продуктов с экономической ценностью) необходим также учет особенностей, связанных с рыночной спецификой, в которой функционирует объект управления. Такие особенности формируются в зависимости от вида планируемой к получению продукции из CO₂. Также необходим учет тенденций развития промышленных отраслей и специфики конкретных предприятий, особенностей государственного регулирования в страновом, региональном и отраслевом разрезах, инфраструктурных и социально-экономических факторов, особенностей развития территорий, уровня развития технологий и обеспеченности техникой и установками улавливания и многих других составляющих²²⁶. Причем каждый из перечисленных факторов является комплексным, также существует зависимость между ними. Изучение таких факторов представляется отдельной научной проблемой в связи с тем, что исследуемая система является крайне сложной (неструктурированной).

Специфика сложного межотраслевого взаимодействия в проектах УХУ, а также уникальный характер проекта в каждом конкретном случае должны учитываться при планировании и реализации полномасштабных проектов, в том числе в России.

В методологическом плане при планировании реализации УХУ возникает проблема с инструментарием прогнозирования, так как именно оно является базой для разработки стратегических планов развития различных объектов, в том числе промышленных систем. Методы экстраполяции, которые основаны на тенденциях прошлого, к решению данной задачи трудно применимы, так как

²²⁶ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181

ретроспективная информация по данному вопросу крайне ограничена, а устойчивые закономерности развития межотраслевых комплексов УХУ не сложились ни в мире, ни в России. Кроме того, использование методов экстраполяции существенно ограничено именно в современных условиях, когда происходит переход к шестому технологическому укладу^{227,228}. Также следует отметить, что каждый межотраслевой комплекс УХУ является уникальным объектом, и метод аналогий трудно применим.

Концептуальное моделирование внутренних и внешних факторов, определяющих развитие того или иного промышленного комплекса, может быть применено частично, так как любые оценки будущего развития межотраслевых комплексов УХУ на долгосрочную перспективу будут носить вероятностный характер. Что касается статистических методов, их применение существенно ограничено из-за отсутствия ретроспективных данных и сложности перевода всей совокупности факторов в количественное (численное) выражение. Это существенно осложняет разработку подходов к управлению и планов развития УХУ. Кроме того, должна быть соблюдена иерархия при управлении такими системами (государство, отрасли промышленности, регионы, задействованные компании, межотраслевые комплексы, проекты и т.д.).

В качестве специфических особенностей можно выделить следующие:

- высокая степень неопределенности при прогнозировании тенденций развития промышленности (в том числе с учетом геополитических и макроэкономических факторов);
- уникальность каждого проекта и комплекса УХУ, что предполагает наличие индивидуальных (уникальных) подходов к выбору технологий, логистических схем, системы управления и отсутствие возможности применения методов аналогий;

²²⁷ Моделирование и прогнозирование мировой динамики / В. А. Садовничий, А. А. Акаев, А. В. Коротаев, С. Ю. Малков. – М.: ИСПИ РАН, 2012. – 359 с.

²²⁸ Глазьев С. Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития. – М.: ВлаДар, 1993. – 310 с.

- необходимость учета и взаимоувязки большого числа факторов, влияющих на развитие УХУ (от глобальных до конкретных технологических и региональных в местах реализации);

- недостаток упорядоченных статистических данных для построения целостных прогнозных моделей развития проектов УХУ;

- необходимость учета и взаимоувязки факторов, формирующихся на различных уровнях управления (государство, регион, отрасль/отрасли, компании, проекты);

- необходимость сочетания интересов государства, бизнеса с фокусом на стратегические приоритеты развития отраслей российской промышленности, экономики страны в целом и интересы общества.

Также необходимо отметить, что при моделировании развития комплексов УХУ в условиях России необходимы:

- учет зарубежного опыта и накопленных знаний в области реализации УХУ;

- ориентация на апробированные модели, подходы и методы, а также «извлеченные уроки», существующие в мировой практике;

- учет российской специфики.

Как уже было отмечено, самым явным сдерживающим фактором на пути развития и масштабирования технологических цепочек УХУ является экономика таких проектов, а для внедрения комплекса УХУ и реализации всей технологической цепочки в промышленности нужны определенные условия. Меры государственного регулирования таких инициатив могут быть разные – от механизмов, поддерживаемых на глобальном уровне, до специфических, действующих в рамках одного государства и даже региона. Мировой опыт подтверждает – проекты УХУ появляются и развиваются там, где созданы соответствующие институциональные условия. Это подтверждает актуальность изучения основ государственного регулирования УХУ в различных странах²²⁹.

²²⁹ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.

2.4 Государственное регулирование и институты поддержки УХУ: мир и Россия

Затраты на реализацию УХУ, прежде всего, капитальные и на энергопотребление установок, высоки, что определяет необходимость государственной поддержки таких инициатив. В Стратегии с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 года также отмечается, что развитие технологий УХУ «требуется дополнительных стимулирующих мер со стороны государств и институтов развития»²³⁰.

В России определены национальные климатические цели по снижению выбросов ПГ до 70 % к 2030 году от уровня 1990 года²³¹ и достижению углеродной нейтральности не позднее 2060 года²³². Государством признается важность разработки соответствующей политики и мер по снижению выбросов ПГ на всех уровнях. Как отмечалось, в 2021 году Правительство РФ утвердило Стратегию с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 года, согласно которой первостепенную важность приобретает «создание стимулов и условий для переориентации потоков капитала на финансирование устойчивого экологического, социального и экономического развития страны»²³³.

В том же году вышел Федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов», который «определяет основы правового регулирования отношений в сфере хозяйственной и иной деятельности, которая сопровождается выбросами парниковых газов и осуществляется на территории Российской Федерации, а также на континентальном шельфе, в исключительной экономической зоне Российской Федерации, российском секторе Каспийского

²³⁰ Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 г. № 3052-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 08.11.2021 г.

²³¹ О сокращении выбросов парниковых газов: Указ Президента Российской Федерации от 04.11.2020 г. № 666 / Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102895994> (дата обращения: 10.03.2023).

²³² Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 г. № 3052-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 08.11.2021 г.

²³³ Там же.

моря»²³⁴. В соответствии с Законом, как отмечалось, юридические лица и индивидуальные предприниматели, масса выбросов которых составляет 150 тыс. т CO₂-экв. в год и более до 1 января 2024 г. и 50 тыс. т CO₂-экв. в год и более с 1 января 2024 г., обязаны впервые предоставить отчеты о выбросах ПГ. За непредоставление отчетности предусмотрены административные штрафы, а за превышение квоты выбросов – плата в рамках эксперимента по их сокращению²³⁵. Кроме того, Закон предлагает основы функционирования национальной системы углеродных офсетов, подразумевающей государственную систему реализации добровольных проектов по сокращению выбросов / увеличению поглощения ПГ, выпуска и обращения углеродных единиц²³⁶.

В 2022 году был принят Федеральный закон «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации», в котором обозначались основы проведения эксперимента по квотированию выбросов ПГ на территории Сахалинской области, его цели и задачи. Данный эксперимент предполагает реализацию ряда мер государственного регулирования и поддержки, стимулирующих развитие «зеленых» проектов и способствующих движению региона к углеродной нейтральности. Так, на Сахалине будет принято «жесткое» регулирование – система квотирования выбросов CO₂. Помимо опробования инструментов внутреннего рынка торговли выбросами (углеродными единицами), в регионе предполагается реализация косвенных методов поддержки, таких как снижение налоговой нагрузки, государственные субсидии.

Эксперимент по квотированию выбросов ПГ на Сахалине часто воспринимается как база для разработки, внедрения и «опробования» организационно-экономических инструментов в рамках функционирования законодательной системы, регулирующей выбросы ПГ, – углеродного

²³⁴ Об ограничении выбросов парниковых газов: Федеральный закон Российской Федерации от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 05.07.2021 г.

²³⁵ Шевелева Н. А. Обязательства по управлению выбросами парниковых газов // Экология производства. – 2023. – №2. – С. 36-45.

²³⁶ Углеродное регулирование в России // Министерство экономического развития Российской Федерации. – 2023. – 17 с. – URL:

https://www.economy.gov.ru/material/file/9e904ab98684f07ebefca5f83ba2cfd2/uglerodnoe_regulirovanie_v_rossii.pdf (дата обращения: 12.04.2023).

регулирования. Его задача, в общем случае, сводится к обеспечению развития различных низкоуглеродных инициатив. Упрощённо можно сказать, что при углеродном регулировании выбросы ПГ становятся «платным» путем применения различных мер – либо через установление налогов на выбросы (англ. carbon tax), либо с использованием систем квотирования выбросов (англ. carbon cap). Часто к двум обозначенным механизмам подключается механизм торговли (англ. carbon trade) в различных его проявлениях.

Налог на выбросы действует как штраф — предприятие платит государству в соответствии с установленными ограничениями. Часть выбросов может обходиться компании «бесплатно», а после определенного порога взимается плата. Данный механизм можно рассматривать как агрессивный инструмент государственного регулирования, значительно влияющий на коммерческую деятельность попадающих под него компаний²³⁷.

Система квотирования выбросов работает посредством установления квот на выбросы. Предприятие может заплатить деньги за превышение квоты, но есть и другой способ соблюсти ограничение — купить недостающие углеродные единицы у другого предприятия. Так появляется рынок купли-продажи углеродных единиц (иными словами – углеродный рынок, торговля углеродными (эмиссионными) квотами, углеродными единицами; англ. Emission Trading Scheme, ETS). Углеродные рынки могут быть разными: глобальными и внутренними, обязательными и добровольными. Важным элементом работы такого рынка является ценообразование на углерод (англ. carbon pricing).

Чаще всего отмечают смешанные формы регулирования на национальном и региональном уровнях, а также применение различных мер поддержки в комплексе²³⁸. С учетом того, что углеродное регулирование направлено именно на регулирование выбросов ПГ, оно может быть стимулом для развития всего набора известных и используемых низкоуглеродных инициатив и проектов на определённой территории, в частности технологий УХУ.

²³⁷ Romasheva N., Ilinova A. CCS Projects: How Regulatory Framework Influences Their Deployment // Resources. – 2019. – Vol. 8 (4). – P. 181. – DOI: 10.3390/resources8040181.

²³⁸ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.

Основой развития низкоуглеродных инициатив в целом являются либо налоги на выбросы, либо их квотирование с одновременным развитием рынка углеродных единиц. Вместе с тем, в мире накоплен достаточный опыт других мер, которые будут рассмотрены ниже. Обратимся к зарубежному опыту по данным вопросам. В таблице 2.5 представлены результаты синтеза основных направлений и мер регулирования и поддержки УХУ в различных странах²³⁹.

Таблица 2.5 – Основные меры государственного регулирования инициатив и проектов УХУ в различных странах

Страна	Меры и механизмы регулирования и поддержки	Источники
США	1. Налоговый кредит “45Q” 2. Государственные программы поддержки, прямое финансирование УХУ на всех стадиях 3. Налоговые льготы и другие меры на уровне отдельных штатов (например, Калифорния, Техас)	240,241,242
Китай	1. Система торговли выбросами (англ. Emission Trading Scheme, ETS) 2. Государственные программы поддержки, прямое финансирование УХУ на всех стадиях	243,244
Норвегия	1. Налог на углерод 2. Государственные программы поддержки, прямое финансирование УХУ на всех стадиях (программа CLIMIT) 3. Система торговли выбросами (ETS)	245,246
Великобритания	1. Система торговли выбросами (ETS) 2. Контракты на разницу (англ. contracts for difference, CfD) 3. Государственные программы поддержки, прямое финансирование УХУ на всех стадиях (CCS Infrastructure Fund – CIF)	247

²³⁹ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.

²⁴⁰ Осипцов А. Технологии улавливания, полезного использования и хранения двуокиси углерода (CCUS) / А. Осипцов, И. Гайда, Е. Грушевенко, С. Капитонов // Сколковский институт науки и технологий. – 2022. – 79 с. – URL: <https://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2022/11/CCUS-Skolteh-2022-11-10.pdf> (дата обращения: 12.10.2023).

²⁴¹ Brief. The US Section 45Q Tax Credit for Carbon Oxide Sequestration: An Update. Global CCS Institute. URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/45Q_Brief_in_template_LLB.pdf (дата обращения: 22.12.2023).

²⁴² Herzog H. Financing CCS Demonstration Projects: Lessons Learned from Two Decades of Experience // Energy Procedia. – 2017. – V. 114. – P. 5691-5700. – DOI: [10.1016/j.egypro.2017.03.1708](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1708)

²⁴³ Chen W., Lu X., Lei Y. Comparison of Incentive Policies for the Optimal Layout of CCUS Clusters in China’s Coal-Fired Power Plants Toward Carbon Neutrality // Engineering – 2021. – V. 7. – P. 1692-1695. – DOI: [10.1016/j.eng.2021.11.011](https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.11.011)

²⁴⁴ Wang X., Tang R., Meng M. Research on CCUS business model and policy incentives for coal-fired power plants in China // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2023. – Vol. 125: 103871. – DOI: [10.1016/j.ijggc.2023.103871](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103871).

²⁴⁵ Bekken S., Schöffel K., Aakenes S. The CLIMIT Program and its Strategy for Norwegian Research, Development and Demonstration of CCS Technology // Energy Procedia. – 2013. – V. 37. – P. 6508-6519. – DOI: [10.1016/j.egypro.2013.06.581](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.581)

²⁴⁶ Осипцов А. Технологии улавливания, полезного использования и хранения двуокиси углерода (CCUS) / А. Осипцов, И. Гайда, Е. Грушевенко, С. Капитонов // Сколковский институт науки и технологий. – 2022. – 79 с. – URL: <https://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2022/11/CCUS-Skolteh-2022-11-10.pdf> (дата обращения: 12.10.2023).

²⁴⁷ The Carbon Capture and Storage Infrastructure Fund: an update on its design // GOV.UK. – 2022. – URL: <https://www.gov.uk/government/publications/design-of-the-carbon-capture-and-storage-ccs-infrastructure-fund/the-carbon-capture-and-storage-infrastructure-fund-an-update-on-its-design-accessible-webpage> (дата обращения: 29.07.2023).

Продолжение таблицы 2.5

Страна	Меры и механизмы регулирования и поддержки	Источники
Канада	1. Закон о ценообразовании на загрязнение парниковыми газами 2. Государственные программы поддержки, прямое финансирование УХУ на всех стадиях (Carbon Capture and Storage Fund)	248,249
Нидерланды	1. Система торговли выбросами (ETS) 2. Программа стимулирования устойчивого производства энергии и изменения климата (The Sustainable Energy Production and Climate Transition Incentive Scheme – SDE++)	250,251

Источник: составлено автором.

США занимают первое место в мире по количеству действующих мощностей УХУ. Согласно последним данным (декабрь 2023 г.), в стране функционируют 15 установок УХУ, которые в совокупности способны улавливать около 0,4 % от общего годового объема выбросов. Порядка 120 объектов находятся на разных стадиях разработки и строительства, и к моменту их запуска УХУ сможет обеспечивать улавливание до 3 % годовых выбросов. Такой незначительный вклад УХУ частично объясняется тем, что технология обычно используется в секторах, где затраты на улавливание минимальны – на предприятиях по переработке природного газа, производстве аммиака и этанола, а на них приходится небольшая доля общих выбросов США. Функционирование практически всех установок УХУ частично окупается за счет использования уловленного CO₂ для повышения нефтеотдачи пластов²⁵².

В 2008 году в стране был введен первый в мире стимулирующий налоговый кредит на утилизацию и хранение CO₂, получивший название “45Q” (англ. The 45Q Tax Credit)^{253,254}. Он представляет собой определенную сумму денежного

²⁴⁸ Herzog H. Financing CCS Demonstration Projects: Lessons Learned from Two Decades of Experience // Energy Procedia. – 2017. – V. 114. – P. 5691-5700. – DOI: [10.1016/j.egypro.2017.03.1708](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1708)

²⁴⁹ How carbon pricing works. Information on Canada’s carbon pollution pricing system // Government of Canada – 2023. – URL: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/putting-price-on-carbon-pollution.html> (дата обращения: 09.02.2023).

²⁵⁰ Orca: the first large-scale plant. URL: <https://climeworks.com/roadmap/orca> (дата обращения 18.01.2024).

²⁵¹ SDE++ 2021. Stimulation of Sustainable Energy Production and Climate Transition. URL: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2023-08/Brochure%20SDE%2B%2B%202021%20-%20oktober%202021.pdf> (дата обращения 22.12.2023).

²⁵² Carbon Capture and Storage in the United States // Congressional Budget Office. – 2023. – 31 p. – URL: <https://www.cbo.gov/system/files/2023-12/59345-carboncapture-storage.pdf> (дата обращения: 05.08.2023).

²⁵³ Trendafilova P. What is The 45Q Tax Credit? // Carbon Herald. – 2023. – URL: <https://carbonherald.com/what-is-45q-tax-credit/> (дата обращения: 12.09.2023).

²⁵⁴ U.S. shows 'commendable leadership' on support for CCS // The International CCS Knowledge Centre. – 2022. – URL: <https://ccsknowledge.com/news/us-shows-commendable-leadership-on-support-for-ccs> (дата обращения: 12.09.2023).

кредита (льготы) за тот объем CO₂, который улавливается и затем отправляется на геологическое захоронение и/или используется, в том числе для увеличения нефтеотдачи пластов (EOR). В 2018 году эта мера претерпела ряд существенных изменений²⁵⁵ в части расширения спектра действия. С 2022 года “45Q” представляет собой налоговую льготу в размере 85 долл./т на улавливание и геологическое хранение CO₂ (CCS) и 60 долл./т на улавливание, хранение и использование CO₂ (CCUS), включая повышение нефтеотдачи пластов (EOR). Для объектов по прямому улавливанию углекислого газа из воздуха сумма может достигать 180 долл./т при последующем захоронении газа и 130 долл./т при его использовании. Компании, которые улавливают и хранят/используют CO₂, имеют право на налоговую льготу за каждую тонну предотвращённых выбросов.

Для применения такой меры существует ряд условий, в том числе требования к минимальным мощностям для энергетических, промышленных объектов и прямого улавливания углекислого газа из воздуха. В период 2010-2019 гг. компании заявили о льготах в общем объеме порядка 1 млрд долл., а в период 2023-2027 гг. налоговый кредит сократит доходы государства примерно на 5 млрд долл.

Льгота “45Q” может работать в tandem с другими механизмами, например, с Калифорнийским протоколом CCS по низкоуглеродному топливу (англ. California Low Carbon Fuel Standard CCS protocol, LCFS). К другим примерам можно отнести стандарты экологически чистой энергетики (англ. clean energy standards) и местные налоговые льготы на инвестиции, а также различные грантовые и кредитные программы²⁵⁶. Также существуют местные стимулирующие инициативы на уровне отдельных штатов (например, в штате Техас).

В США также действует ряд государственных программ по поддержке УХУ. Согласно оценкам, за период 2011-2023 гг. объем ежегодных ассигнований

²⁵⁵ Fan Jing-Li., Xu Mao, Wei Shijie. Evaluating the effect of a subsidy policy on carbon capture and storage (CCS) investment decision-making in China – A perspective based on the 45Q tax credit // Energy Procedia. – 2018. – Vol. 154. – P. 22-28. – DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.005.

²⁵⁶ Brief. The US Section 45Q Tax Credit for Carbon Oxide Sequestration: An Update. Global CCS Institute. URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/45Q_Brief_in_template_LLB.pdf (дата обращения: 22.12.2023).

(от поддержки научных исследований до пилотных проектов) составил около 5,3 млрд долл.²⁵⁷. В целом, следует заключить, что основными финансовыми стимулами для использования УХУ в США являются доходы от повышения нефтеотдачи пластов и мера “45Q”. Налоговые льготы в целом, и “45Q” в частности, на сегодня считаются наиболее прогрессивной мерой для стимулирования развития УХУ, что на практике подтверждается опытом США.

Китай является крупнейшим потребителем электроэнергии в мире; почти 90 % выбросов CO₂ в стране приходится на энергетический сектор, из них 40 % – на производство электроэнергии²⁵⁸. Политика страны направлена на регулирование выбросов в данной отрасли с одновременным развитием новых «зеленых» технологий. Китай характеризуется высокой степенью зависимости от ископаемых видов топлива, поэтому в стране признано, что энергетический переход должен быть «плавным»: полный отказ от ископаемого топлива сопровождается высокими рисками потери активов. С 2021 года в стране запущена система торговли выбросами (ETS), которая является основным, по мнению большинства экспертов, экономическим механизмом для развития низкоуглеродных инициатив. В случае Китая ее функционирование распространяется на угольные и газовые электростанции. Несмотря на то что в стране уже запущен углеродный рынок, а также действуют программы поддержки УХУ, низкая цена на углерод (менее 10 долл. за тонну – в разы меньше, чем в странах Европы) и отсутствие точечных механизмов не позволяют эффективно стимулировать реализацию УХУ исключительно на основе коммерческой логики²⁵⁹.

В странах Европы главным экономическим стимулом для развития технологий УХУ и других низкоуглеродных инициатив является европейская система торговли выбросами (EU ETS), а также системы регулирования

²⁵⁷ Carbon Capture and Storage in the United States // Congressional Budget Office. – 2023. – 31 p. – URL: <https://www.cbo.gov/system/files/2023-12/59345-carboncapture-storage.pdf> (дата обращения: 05.08.2023).

²⁵⁸ Wang X., Tang R., Meng M. Research on CCUS business model and policy incentives for coal-fired power plants in China // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2023. – Vol. 125. – P. 103871. – DOI: 10.1016/j.ijggc.2023.103871.

²⁵⁹ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.

на национальном уровне. При этом цены на углерод достаточно высоки. Вместе с тем, ряд стран проходит и свой уникальный путь. Так, запущенная в Норвегии система регулирования выбросов углекислого газа (налог на углерод) позволила ещё в конце XX века начать реализацию проектов УХУ на коммерческой основе. Также в стране развито программно-целевое финансирование УХУ, основная программа – CLIMIT с объемом ассигнований порядка 24 млн евро ежегодно. Заявку на участие в программе могут подать исследовательские институты, норвежские компании и международные партнеры, занимающиеся исследованиями в области УХУ, демонстрацией технологий, реализацией пилотных проектов. Благодаря программе, Норвегии удалось стать одной из стран-лидеров в области развития технологий УХУ и их внедрения в промышленности.

В Великобритании (лидер по количеству действующих проектов в Европе) действует национальная система торговли выбросами – UK ETS, реализуется государственное финансирование транспортной и инфраструктуры хранения (англ. Transport and Storage, T&S), а также проектов по улавливанию техногенного CO₂ через специализированный фонд – The Carbon Capture and Storage Infrastructure Fund (CIF)²⁶⁰. Помимо прочего, распространён механизм, получивший название «контракты на разницу» (англ. contract for difference, CfD), – это основной правительственный механизм поддержки новых проектов по производству электроэнергии с низким содержанием углерода. В общем виде он основан на компенсации разницы между ценой, указанной в контракте, и фактически сложившейся ценой. В случае УХУ он представляет собой компенсацию разницы между стоимостью электроэнергии, произведённой с применением УХУ («нетрадиционная электроэнергия»), и стоимостью электроэнергии, произведённой без УХУ («традиционная электроэнергия»). Это может быть государственная субсидия, надбавка к цене, выравнивающая

²⁶⁰ The Carbon Capture and Storage Infrastructure Fund: an update on its design // GOV.UK. – 2022. – URL: <https://www.gov.uk/government/publications/design-of-the-carbon-capture-and-storage-ccs-infrastructure-fund/the-carbon-capture-and-storage-infrastructure-fund-an-update-on-its-design-accessible-webpage> (дата обращения: 29.07.2023).

стоимость нетрадиционной электроэнергии²⁶¹. Контракты на разницу стимулируют инвестиции в низкоуглеродные технологии, обеспечивая большую определенность и стабильность доходов генераторов электроэнергии, в то же время защищая потребителей от более высоких затрат на нее²⁶².

В Нидерландах запущена крупная программа SDE++, которая направлена на широкомасштабное внедрение технологий для производства возобновляемой энергии и других технологий, снижающих выбросы CO₂. В 2020 году программа была расширена (пред. SDE+), и в сферу ее действия вошли инициативы УХУ в части компаний, занимающихся непосредственно улавливанием²⁶³. Финансирование в рамках программы предоставляется компаниям и некоммерческим организациям в виде гранта на срок от 12 до 15 лет, в зависимости от реализуемых низкоуглеродных инициатив.

В Канаде действует закон о ценообразовании на загрязнение парниковыми газами (англ. Greenhouse Gas Pollution Pricing Act, GGPPA). В стране сформирован фонд улавливания и хранения CO₂ для поддержки крупномасштабных проектов УХУ, действуют методы прямого финансирования. С 2019 года во всех юрисдикциях Канады действуют цены на углеродное загрязнение. Канадский подход является гибким: любая провинция или территория может разработать собственную систему ценообразования, учитывающую местные потребности, или выбрать федеральную²⁶⁴. Эксперты называют законодательство в области УХУ, сформированное в Канаде, одним из самых зрелых.

В рассмотренных и других странах с активной позицией относительно технологий УХУ также реализуются грантовые программы (например, UK CCUS

²⁶¹ Eliminating World Poverty: Building our Common Future // Department for International Development. – 2009. – 150 p. – URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7b831a40f0b645ba3c4ce7/7656.pdf> (дата обращения: 22.03.2023).

²⁶² Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.

²⁶³ SDE++ 2021. Stimulation of Sustainable Energy Production and Climate Transition // Netherlands Enterprise Agency. – 2021. – 56 p. – URL: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2023-08/Brochure%20SDE%2B%2B%202021%20-%20oktober%202021.pdf> (дата обращения: 02.09.2023).

²⁶⁴ How carbon pricing works. Information on Canada's carbon pollution pricing system // Government of Canada. – 2023. – URL: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/putting-price-on-carbon-pollution.html> (дата обращения: 09.02.2023).

infrastructure fund). Еще одним распространённым механизмом поддержки не только УХУ, но и других низкоуглеродных проектов являются «льготные тарифы» (англ. Feed-in-Tariff, FIT). Изначально такой механизм был предназначен для привлечения инвестиций в ВИЭ, но затем был расширен. Он предполагает предоставление гарантированной цены выше рыночной для производителей низкоуглеродной энергии, а также обеспечение производителей долгосрочными контрактами. В случае УХУ данный тариф может работать для электростанций с улавливанием CO₂ на своих мощностях. Такие тарифы широко распространены в США и в других странах, в частности в Германии и Японии.

Таким образом, в разных странах применяются различные меры государственного регулирования, развиваются механизмы поддержки УХУ, которые отличаются характером, уровнем развитости и эффективности, степенью специфичности и распространённости, а также принципами работы, лежащими в их основе. Следует отметить, что в странах-лидерах по развитию УХУ проводимая политика в данной области отличается комплексностью – сочетанием различных способов прямого и косвенного регулирования, «принуждения» и стимулирования развития УХУ, в том числе «жесткого» регулирования выбросов и прямого финансирования таких инициатив на разных стадиях.

Как отмечалось, в России действующие мощности по улавливанию и хранению углерода отсутствуют. На сегодня известно лишь об одном проекте на ранних этапах разработки, зарегистрированном в базе данных Глобального института CCS, – Ямал СПГ CCS (ПАО «НОВАТЭК»). Вместе с тем, ряд российских промышленных компаний проявляет интерес к данным инициативам. В частности, ПАО «НК «Роснефть» рассматривает возможность использования подземных хранилищ газа и собственных выработанных месторождений для хранения углерода²⁶⁵.

С учетом сказанного, можно сделать вывод, что в России на государственном уровне признается важность разработки соответствующей

²⁶⁵ Роснефть анонсирует климатические цели до 2035 года // ПАО «Роснефть»: официальный сайт. – 2020. – URL: <https://www.rosneft.ru/press/releases/item/204425> (дата обращения: 12.10.2023).

политики по снижению выбросов ПГ на всех уровнях, предпринимаются первые шаги в данном направлении. Вместе с тем, следует признать, что в части УХУ специфические меры регулирования, институты поддержки развития технологий отсутствуют. Стоит упомянуть первые попытки формирования законодательной базы по данным вопросам, в частности утвержденный в 2023 г. проект Методических рекомендаций по обоснованию пригодности участков недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, с целью размещения углекислого газа²⁶⁶. Методические рекомендации устанавливают «единые для Российской Федерации принципы выбора, геологического изучения и обоснования возможности использования участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых, при размещении в пластах горных пород углекислого газа, с учетом природоохранных и других ограничений в соответствии с действующим законодательством». С 2022 г. в России действует отдельная лицензия на строительство и эксплуатацию подземных сооружений для размещения углекислого газа (ПСРУГ). Геологическое изучение участка недр и оценка его пригодности для строительства и эксплуатации ПСРУГ также разрешены в рамках лицензий на разведку и добычу полезных ископаемых или совмещенных лицензий на геологическое изучение, разведку и добычу полезных ископаемых. С 2024 года уже введена возможность строительства и эксплуатации ПСРУГ в рамках лицензии на пользование недрами для разведки и добычи полезных ископаемых, в рамках лицензии на пользование недрами для геологического изучения, разведки и добычи полезных ископаемых. Однако по иным направлениям работы в области УХУ на государственном уровне информация отсутствует²⁶⁷.

²⁶⁶ Методические рекомендации по обоснованию выбора участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – 2023. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115498> (дата обращения: 13.10.2023).

²⁶⁷ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

Достижение желаемой углеродной нейтральности потребует от всего мира целого набора конкретных шагов и действий во всех отраслях, и процесс этот будет сложным, долгим и дорогостоящим. Промышленные компании уже сегодня работают над определением вариантов снижения выбросов углекислого газа, их ранжированием и оценкой по различным критериям, в том числе возможностям применения, стоимости и эффективности, для включения в свои карты декарбонизации, разрабатываемые на корпоративном уровне. Определение набора доступных для каждой конкретной компании опций представляет собой отдельную научную и практическую задачу, решение которой было предпринято в рамках данной работы посредством предложенной систематизации опций декарбонизации на примере нефтегазовых компаний. Систематизация предполагает разделение деятельности по снижению выбросов ПГ на четыре направления с разными принципами действия. Предложенная систематизация может служить ориентиром при определении набора опций декарбонизации, доступных каждой конкретной компании, для их последующей оценки и включения в стратегии декарбонизации. Особое место среди доступных опций для декарбонизации нефтегазовых и других промышленных компаний занимают технологии улавливания и хранения углерода.

УХУ – это укрупненное название набора технологий, которые направлены на предотвращение попадания уже образовавшегося углекислого газа в атмосферу и позволяют двигаться к углеродной нейтральности постепенно, без радикальных изменений в промышленных и энергетических процессах. В общем случае технологическая цепочка УХУ включает в себя три этапа: 1) улавливание углекислого газа на источнике выбросов; 2) транспортировка CO_2 одним из известных способов; 3) полезное использование или закачка газа с целью долгосрочного хранения под землей. В последние годы интерес к технологиям УХУ значительно вырос. Вместе с тем, общий объем мощностей по миру невелик,

а в России такие проекты отсутствуют. Несмотря на это, комплекс технологий УХУ рассматривается как одно из направлений в рамках Стратегии с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 года, что подтверждает признание данного направления на государственном уровне и перспективность его развития в России.

Вместе с тем, разрыв между существующими на сегодня (около 40-50 Мт CO_2 в год) и необходимыми для достижения указанных целей мощностями УХУ (5,8 Гт CO_2 в год по консенсус-прогнозу) в мире является очень существенным. Существует целый спектр факторов, сдерживающих развитие и масштабирование УХУ, прежде всего экономика таких проектов. Проекты УХУ лишь косвенно могут быть связаны с получением дохода, а в ряде случаев, когда предусмотрено только геологическое хранение, он отсутствует. Потенциальные доходы от повышения нефтеотдачи, как показывает мировой опыт, лишь частично могут компенсировать затраты на функционирование всей цепочки, а текущих мер государственного регулирования в большей части стран и регионов недостаточно для развития проектов на коммерческой основе. Для увеличения темпов развития технологических цепочек улавливания и хранения углерода необходимы системное совершенствование государственного регулирования и скоординированные действия всех участников процесса.

Существуют примеры проектов УХУ, функционирующих в рамках одной отрасли, однако они, скорее, являются единичными. Для реализации всей технологической цепи УХУ чаще задействованы разные отрасли промышленности, что позволяет сформулировать идею о том, что технологические цепочки УХУ носят межотраслевой характер и являются особым объектом управления. Управление уникальными межотраслевыми комплексами УХУ должно основываться на учете совокупности факторов, влияющих на их формирование и развитие.

В разных странах применяются различные меры государственного регулирования, развиваются механизмы поддержки УХУ. Следует отметить, что в странах-лидерах по количеству проектов проводимая политика отличается

системностью и комплексностью. Следует отметить ряд общих мер, таких как системы торговли выбросами, налог на углерод, а также набор специфичных мер, таких как налоговая льгота “45Q” и контракты на разницу, побуждающих компании к реализации УХУ. В России на государственном уровне признается важность разработки соответствующей политики по снижению выбросов ПГ, предпринимаются первые шаги в данном направлении. Вместе с тем, следует признать, что в части УХУ специфические меры регулирования, институты поддержки развития технологий отсутствуют.

При подготовке данной главы диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования (1-8), а также иные публикации (9, 10):

1. Череповицына А. А. Снижение выбросов парниковых газов: от глобального контекста к стоимостной оценке улавливания углекислого газа в Арктике // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2025. – № 2. – С. 148–163. – DOI: 10.37614/2220-802X.2.2025.88.010.

2. Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – Т. 1. – №. 57. – С. 169-174.

3. Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

4. Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81).– С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181.

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. – DOI: 10.3390/en16083575.

6. Череповицына А. А., Дорожкина И. П., Костылева В. М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 473–487. – DOI: 10.17073/2072-1633-2022-4-473-487.

7. Ilinova A., Romasheva N., Cherepovitsyn A. CC(U)S initiatives: Public effects and “combined value” performance // Resources. – 2021. – Vol. 10. – No. 6: 61. – 20 p. – DOI: 10.3390/resources10060061.

8. Romasheva N., Ilinova A. CCS projects: How regulatory framework influences their deployment // Resources. – 2019. – Vol. 8. – No. 4: 181. – 19 p. – DOI: 10.3390/resources8040181.

9. Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

10. 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.

ГЛАВА 3. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК УХУ

3.1 Технико-экономическое обобщение теоретических и практических знаний по улавливанию и хранению углерода

Технологические цепочки УХУ могут быть разными – различаться на уровне входящих в их состав этапов, участвующих в ее реализации компаний и отраслей, источника выбросов техногенного углекислого газа и мест захоронения / способов использования, используемых на разных этапах технологий и решений и пр. Очевидно, что проекты УХУ также будут различаться по целям реализации, объемам мощностей, стоимости реализации этапов (прежде всего, улавливания) и другим факторам. С научной точки зрения это является предпосылкой для разработки набора признаков, по которому могут быть обобщены имеющиеся в науке и практике знания о таких инициативах. В рамках работы при технико-экономическом обобщении предлагается ориентироваться на три группы признаков – базовые, технологические и организационно-экономические²⁶⁸.

1) Базовые признаки определяют сущность и основы реализации технологической цепи УХУ – тип проекта, источник выбросов, объемы мощностей. Данные признаки выделены на основе анализа возможных комбинаций звеньев технологической цепочки, доступных способов использования CO₂, а также выявления источника CO₂ (улавливание техногенного газа или из атмосферы), определяющего, в конечном счете, задействованные в проекте отрасли, и категоризации проекта в зависимости от мощности, определяемой по объемам улавливания газа.

2) Технологические признаки акцентируют внимание на конкретных способах и технологических решениях, применяемых на этапах всей

²⁶⁸ Череповицына А. А., Дорожкина И. П., Костылева В. М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 473–487. – DOI: 10.17073/2072-1633-2022-4-473-487.

технологической цепи – от улавливания и транспортировки до захоронения и/или использования. Данные признаки выделены на основе известных этапов технологической цепочки, а также анализа возможных способов их реализации, известных в теории и мировой практике, с выделением там, где применимо, конкретных технологий.

3) Организационно-экономические признаки определяют способы проектной реализации УХУ и стоимостные характеристики. Данные признаки выделены на основе теории проектного управления, известных в теории и мировой практике организационных форм и моделей реализации таких инициатив, стоимости улавливания газа, зависящей, в большей степени, от концентрации CO_2 в газовом потоке, а также территориального размещения мощностей²⁶⁹.

В рамках предложенных групп признаков выделены конкретные частные признаки и виды проектов согласно данным признакам. Разработанный вариант технико-экономического обобщения представлен на рисунке 3.1, а характеристика признаков – в таблице 3.1.

Особый интерес в группе базовых признаков представляет разделение технологических цепочек УХУ на проекты CCS, CCU и CCUS. Ряд особенностей таких типов проектов уже обсуждался в рамках работы. Обратимся более подробно к перспективам полезного использования углекислого газа. Несмотря на экологическую направленность УХУ, тип проекта, предполагающий перманентное хранение газа (CCS), рассматривают CO_2 как отход, что соответствует линейной модели. В ответ на возникающую необходимость рационального использования имеющихся ресурсов появился комплекс технологий типов CCU и CCUS, нацеленный на полезное использование CO_2 . Такие проекты соответствуют ключевому принципу циркулярной экономики “3R”: reduce, reuse, recycle²⁷⁰.

²⁶⁹ Череповицына А. А., Дорожкина И. П., Костылева В. М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 473–487. – DOI: 10.17073/2072-1633-2022-4-473-487.

²⁷⁰ Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy — A new sustainability paradigm? // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 143. – P. 757–768. – DOI:10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

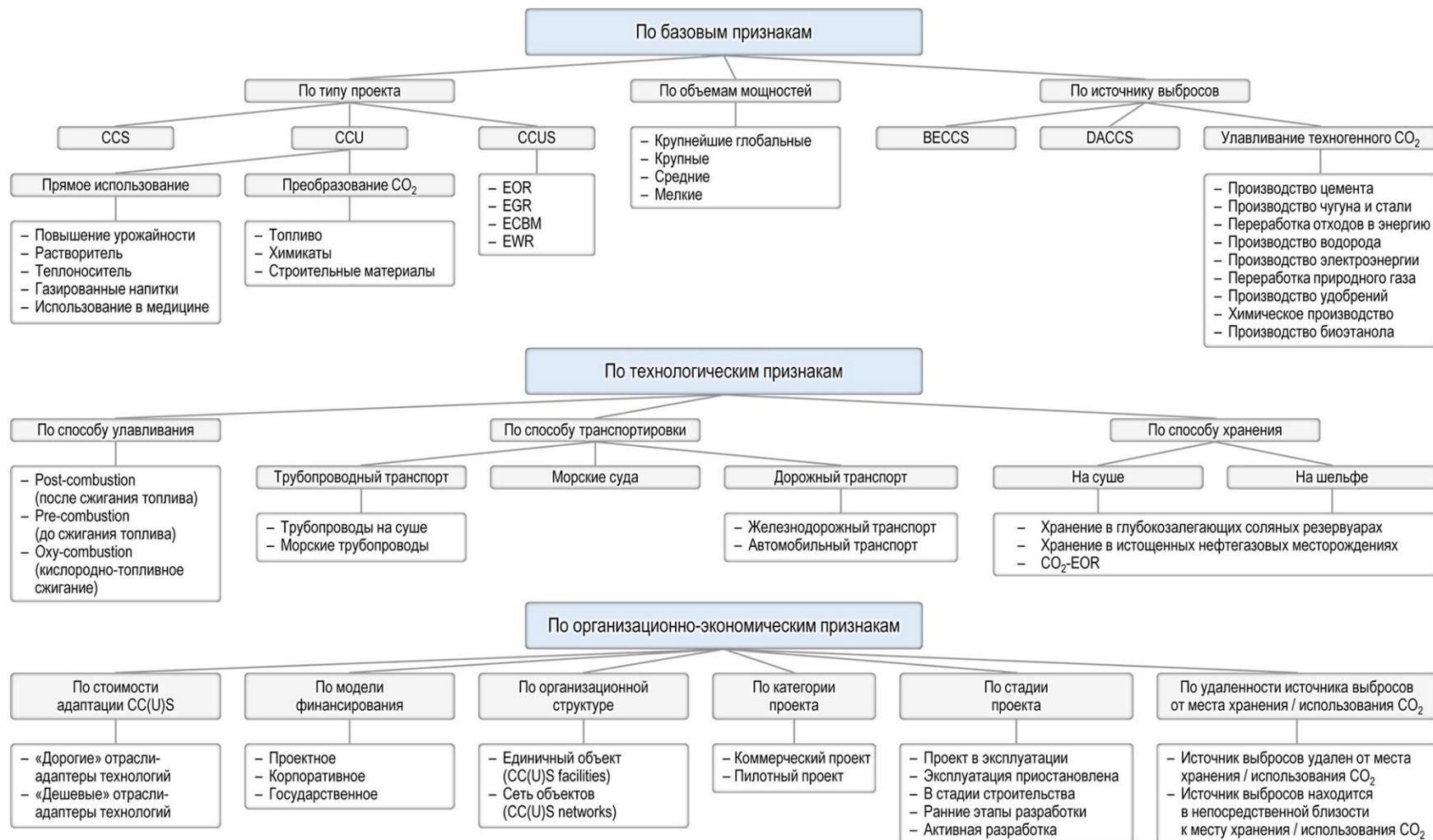


Рисунок 3.1 – Концептуальное видение технологических цепочек УХУ: технико-экономическое обобщение

Источник: Череповицына А. А., Дорожкина И. П., Костылева В. М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 473–487. – DOI: 10.17073/2072-1633-2022-4-473-487.

Таблица 3.1 – Характеристика признаков технико-экономического обобщения знаний об УХУ

Виды проектов	Примечание
БАЗОВЫЕ ПРИЗНАКИ	
По типу проекта	
CCS (улавливание и хранение CO ₂)	CO ₂ улавливается и транспортируется для хранения под землей.
CCU (улавливание и использование CO ₂): - прямое использование CO ₂ ; - преобразование CO ₂	CO ₂ улавливается и используется в исходном виде или с преобразованием для производства новых продуктов.
CCUS (улавливание, хранение и использование CO ₂): - EOR (enhanced oil recovery – повышение нефтеотдачи пластов); - EGR (enhanced gas recovery – повышение газоотдачи пластов); - ЕСВМ (enhanced coalbed methane recovery – повышение отдачи метана угольных пластов); - EWR (enhanced water recovery – повышение водоотдачи пластов).	EOR является самым распространённым вариантом использования CO ₂ ; EGR, ЕСВМ, EWR находятся в стадии изучения, тестирования и пробной эксплуатации.
По объемам мощностей	
Крупнейшие глобальные проекты (более 5 Мт CO ₂ в год)	Категоризация проектов по мощностям улавливания основана на подходах Глобального института CCS и Института энергетического перехода Керни.
Крупные проекты (1-5 Мт CO ₂ в год)	
Средние проекты (0,2-1 Мт CO ₂ в год)	
Мелкие проекты (0,2 Мт CO ₂ в год)	
По источнику выбросов	
DACCS (Direct Air Capture with Carbon Capture and Storage – прямое улавливание CO ₂ из атмосферы)	Существует только один коммерческий проект в стадии эксплуатации (“Orca” в Исландии).
BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage – улавливание CO ₂ , произведенного в процессе получения энергии из биомассы)	Известно о нескольких коммерческих проектах BECCS на стадиях активной и ранней разработки в США и Швеции.
Улавливание техногенного CO ₂ по секторам (производство цемента, производство чугуна и стали, переработка отходов в энергию и т.д.)	Под сектором подразумеваются задействованные в проекте отрасли промышленности. Часто определяется по сектору, к которому относится источник выбросов.

Продолжение таблицы 3.1

Виды проектов	Примечание
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ	
По способу улавливания CO ₂	
Post-combustion (улавливание CO ₂ после сжигания топлива)	Улавливание в конечной фазе высвобождения газов сгорания; наиболее зрелая и экономически эффективная технология.
Pre-combustion (улавливание CO ₂ до сжигания топлива)	Основано на процессе газификации, через который проходит топливо, и предназначено для получения синтез-газа; требует более высоких капитальных затрат.
Oxy-fuel combustion (кислородно-топливное сжигание)	Сжигание топлива в обогащенной кислородом среде; обеспечивает поток дымовых газов с высокой концентрацией CO ₂ ; менее зрелая технология.
По способу транспортировки CO ₂	
Трубопроводный транспорт	Самый распространенный способ
Морские суда	Транспортировка CO ₂ в сжиженном состоянии (по аналогии с СПГ)
Дорожный транспорт	Наименее распространенный способ
Смешанный тип	Комбинация способов
По способу хранения CO ₂	
Хранение в глубоководных соляных резервуарах, истощенных нефтегазовых месторождениях; закачка CO ₂ в разрабатываемые нефтяные пласты с целью увеличения нефтеотдачи (CO ₂ -EOR)	Способы хранения могут быть реализованы на суше и на шельфе.
ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ	
По стоимости адаптации УХУ	
Проекты, реализуемые в «дешевых» отраслях-адаптерах УХУ	Переработка природного газа, производство удобрений и др.
Проекты, реализуемые в «дорогих» отраслях-адаптерах УХУ	Производство электроэнергии, производство чугуна и стали, производство цемента и др.
По модели финансирования	
Проектное, корпоративное, государственное, смешанное	Затраты на УХУ высоки, поэтому инициативы обычно реализуются на базе/при участии крупных компаний; сопровождаются мерами государственной поддержки.

Продолжение таблицы 3.1

Виды проектов	Примечание
По организационной структуре	
CCUS facility (единичный объект)	Самая простая форма, характерна для мелких и средних проектов, распространена для действующих проектов.
CCUS network (сеть объектов)	Сложная форма, характерна для крупных проектов, распространена для новых проектов.
По категории проекта	
Пилотный	Предназначены для тестовых и демонстрационных целей.
Коммерческий	Предназначены для коммерческой деятельности.
По стадии проекта	
Проект в эксплуатации, эксплуатация приостановлена, проект в строительстве и т.д.	Определяется как для коммерческих, так и для пилотных проектов с ориентацией на теорию проектного управления.
По удаленности источника выброса от места хранения / использования CO ₂	
Источник выброса удален от места хранения / использования CO ₂	Характерно для CCUS networks (несколько источников выбросов, мест хранения).
Источник выброса находится в непосредственной близости к месту хранения / использования CO ₂	Характерно для единичных объектов.

Источник: Череповицына А. А., Дорожкина И. П., Костылева В. М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 473–487. – DOI: 10.17073/2072-1633-2022-4-473-487.

Технологии и проекты использования углекислого газа (CCU) предполагают производство сырья и продуктов с экономической ценностью, что делает их более привлекательными ввиду возможной потенциальной самоокупаемости при соответствующем уровне развития и масштабирования технологий. Однако не во всех моделях реализации технологических цепочек УХУ с использованием газа на заключительном этапе может идти речь о предотвращении выбросов, обеспечивающем углеродную нейтральность всего процесса – основного и сопутствующих²⁷¹. Возможность достижения углеродной нейтральности полного жизненного цикла CCU будет зависеть от ряда факторов, основными из которых являются следующие²⁷²: (1) источник используемого CO₂; (2) объем энергопотребления и источник энергии, используемые в процессах улавливания и производства продуктов из CO₂; (3) направления и срок использования произведённого продукта.

Согласно данным Национальной академии наук, инженерии и медицины (англ. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, NASEM)²⁷³, продукты на основе CO₂, способные перманентно хранить в себе CO₂ сроком более 100 лет, способствуют достижению углеродной нейтральности при условии использования CO₂, уловленного из промышленных источников. В то же время продукты с более коротким сроком жизни (менее 100 лет) углеродно-нейтральны только в том случае, если произведены из углекислого газа, уловленного напрямую из атмосферы (DAC) или других биогенных источников. Согласно исследованию²⁷⁴, производство и использование продуктов, полученных на основе углекислого газа, с коротким сроком жизни, таких как метанол, метан и другие легкие углеводороды, способствуют снижению выбросов по сравнению с традиционными методами производства при условии применения ВИЭ при производстве этих продуктов. Несомненно, для проведения таких оценок

²⁷¹ Cherepovitsyna A., Kuznetsova E., Popov A., Skobelev D. Carbon Capture and Utilization Projects Run by Oil and Gas Companies: A Case Study from Russia // Sustainability. – 2024. – No. 16. – P. 6221. – DOI: 10.3390/su16146221.

²⁷² Там же.

²⁷³ Carbon Dioxide Utilization Markets and Infrastructure: Status and Opportunities: A First Report // National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.17226/26703>.

²⁷⁴ Garcia-Garcia G., Fernandez M. C., Armstrong K., Woollass S., Styring P. Analytical review of life-cycle environmental impacts of carbon capture and utilization technologies // Chemistry – Sustainability – Energy – Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 995-1015. – DOI: 10.1002/cssc.202002126.

необходимо прибегать к оценке полного жизненного цикла (Life-Cycle Assessment, LCA), подходы к которой в части ССУ не гармонизированы, а сама методология находится в стадии зарождения²⁷⁵.

Однако, несмотря на разное видение технологий ССУ и углеродного следа и неоднозначные оценки относительно будущего таких технологий при производстве различных продуктов на основе CO₂, развитие направления ССУ имеет определённые преимущества²⁷⁶. Во-первых, производство и использование продукции из CO₂ способны приводить к меньшей массе выбросов по сравнению с использованием традиционных аналогов сырья. Во-вторых, развитие технологий производства на основе CO₂ в качестве сырья способно снизить потребность в сырье ископаемого происхождения²⁷⁷. В-третьих, развитие ССУ способно перевести CO₂ из категории отходов в категорию сырья, что соответствует требованиям таких современных концепций и понятий, как ресурсосбережение, циркулярная экономика, низкоуглеродная экономика, циркулярная низкоуглеродная экономика²⁷⁸. В-четвертых, реализация проектов ССУ, предполагающих создание нового продукта, может внести вклад в низкоуглеродную диверсификацию компании-инициатора проекта. Развитие технологий, мер государственной поддержки, рынков будет способствовать становлению различных схем обращения с CO₂ и снижению, в конечном счете, их стоимости. На сегодня разработано несколько десятков технологий использования углекислого газа, но ранней коммерциализации такие технологии достигли только по нескольким видам продукции²⁷⁹.

Использование CO₂ без преобразования включает в себя уже упомянутую выше закачку в пласт – технологии CO₂-EOR. Также CO₂ находит коммерческое

²⁷⁵ Cherepovitsyna A., Kuznetsova E., Popov A., Skobelev D. Carbon Capture and Utilization Projects Run by Oil and Gas Companies: A Case Study from Russia // Sustainability. – 2024. – No. 16. – P. 6221. – DOI: 10.3390/su16146221.

²⁷⁶ Там же.

²⁷⁷ Там же.

²⁷⁸ Углеродно-нейтральные энергоёмкие отрасли промышленности. Технологический обзор // UNECE. – 2023. – 24 p. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_RU_draft_1.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

²⁷⁹ A Review of Global and U. S. Total Available Markets for Carbontech // Center for Carbon Removal. – 2021. – 5 p. – URL: https://static1.squarespace.com/static/5b9362d89d5abb8c51d474f8/t/619d4daeb3c7d55c494b8ea3/1637698990732/ccr04_executivesummary.FNL.pdf (дата обращения: 12.11.2021).

применение в пищевой промышленности в качестве хладагента, в производстве газированных напитков, в системах пожаротушения в качестве огнетушащего вещества, в машиностроении, медицине, сельском хозяйстве. Следует иметь в виду, что использование CO_2 в большинстве из этих направлений не приводит к его изоляции от земного углеродного цикла из-за короткого срока жизни получаемой продукции²⁸⁰.

Различные методы преобразования CO_2 расширяют варианты его использования. Газ может быть применен при минерализации, например для изготовления строительных материалов. Получение бетона с отверждением за счет CO_2 и производство заполнителей из природных минералов или отходов называют наиболее зрелыми решениями. К примерам промышленных технологических процессов, в которых углекислый газ используется в качестве сырья, относятся синтез карбамида, синтез диметилкарбоната, производство салициловой кислоты. Перспективные способы химической переработки CO_2 , в основе которых лежит процесс каталитического гидрирования, имеют различные уровни технологической готовности (англ. technology readiness level, TRL) и включают получение нефтехимических продуктов, таких как синтетические жидкие углеводороды, олефины, карбоновые кислоты, спирты, диметиловый эфир²⁸¹. Наиболее перспективным среди решений использования CO_2 на сегодня признается направление производства топлив, и одним из наиболее близких к промышленной коммерческой реализации процессов является синтез метанола из водорода и углекислого газа. Такие технологии преобразования CO_2 развиваются в большей части в регионах с доступом к относительно дешевым ВИЭ. Примером может служить завод по производству возобновляемого метанола имени Джорджа Олаха, расположенный в Исландии²⁸².

²⁸⁰ Cherepovitsyna A., Kuznetsova E., Popov A., Skobelev D. Carbon Capture and Utilization Projects Run by Oil and Gas Companies: A Case Study from Russia // Sustainability. – 2024. – No. 16. – P. 6221. – DOI: 10.3390/su16146221.

²⁸¹ Maximov A., Beletskaya I. Carbon dioxide and ‘methanol’ economy: advances in the catalytic synthesis of methanol from CO_2 // Russian Chemical Reviews. – 2024. – Vol. 93 (1): RCR5101. – DOI: 10.59761/RCR5101.

²⁸² Кузнецова Е. А., Череповицына А. А. Утилизация углекислого газа и циркулярная экономика: мир, Россия, Арктика // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2021. – № 4. – С.42-55. – DOI: 10.37614/2220-802X.4.2021.74.004.

В целом, технологии использования CO_2 потенциально могут стать существенной частью циркулярной (в том числе низкоуглеродной) экономики.

Возвращаясь к обсуждению группы базовых признаков, следует отметить, что разделение проектов по объемам мощностей улавливания также распространено в мировой практике. Очевидно, что мелкие проекты обычно являются локальными, региональными, реализуются на отдельных конкретных производствах и могут быть неизвестными. Крупные и крупнейшие глобальные проекты обычно представляют собой целые сети УХУ (англ. CCUS networks), являются, по большей части, межотраслевыми промышленными комплексами и реализуются на базе или при участии крупных мировых промышленных компаний.

Типы проектов по технологическим признакам технико-экономического обобщения разнятся применяемыми способами, технологиями и решениями на разных этапах. Улавливание является самым дорогим и технологически сложным звеном. По оценкам экспертов, на него приходится до 75 % всех затрат на УХУ. Укрупнённо можно выделить три группы технологий улавливания: 1) до сжигания топлива, 2) после сжигания топлива и 3) кислородно-топливное сжигание. Первая группа технологий применяется как на энергетических, так и на промышленных объектах; вторая группа активно применяется на объектах теплоэнергетики. Третья группа технологий является менее зрелой и начинает находить свое применение на новых мощностях УХУ. На сегодня в мировом масштабе улавливание углекислого газа после сжигания является наиболее широко применяемым подходом. Уровень затрат на улавливание обратно пропорционален концентрации CO_2 в потоке отходящих газов – чем выше содержание CO_2 , тем ниже затраты²⁸³. Данная зависимость лежит в основе условного разделения отраслей-адаптеров УХУ на «дорогие» отрасли (с затратами на улавливание до 200-250 долл. за 1 т углекислого газа) и «дешевые» отрасли (с затратами на улавливание порядка 15-50 долл. за 1 т

²⁸³ Mohammad M., Isaifan R., Weldu Y. W., Rahman M. A., Al-Ghamdiet S. G. Progress on carbon dioxide capture, storage and utilization // International Journal of Global Warming. – 2020. – Vol. 20 (2). – P. 124–144. – DOI: 10.1504/IJGW.2020.105386.

углекислого газа)²⁸⁴. Более подробно затраты на УХУ будут рассмотрены в следующих разделах.

Транспортировка и хранение CO₂, в отличие от улавливания, являются зрелыми технологическими процессами, отработанными на протяжении многих десятилетий в нефтегазовой отрасли. Это определяет отсутствие технологических препятствий по этим этапам при развитии УХУ. Большая часть уловленного CO₂ при реализации инициатив и проектов УХУ в мире транспортируется трубопроводами²⁸⁵.

Решения по закачке, хранению и мониторингу углекислого газа в хранилищах достаточно давно и хорошо известны. При сравнении известных способов захоронения на основе мирового опыта и теоретического исследования²⁸⁶ можно сделать следующие выводы: захоронение газа на суше дешевле, чем в море; захоронение газа в уже изученных пластах дешевле, чем в малоизученных; захоронение газа в истощённых нефтяных и газовых месторождениях дешевле, чем в соленосных формациях; захоронение в резервуарах, где уже есть существующая инфраструктура, дешевле, чем при полном ее отсутствии; захоронение в крупных хранилищах с более высокой скоростью закачки газа дешевле, чем в мелких.

Типы проектов по организационно-экономическим признакам технико-экономического обобщения разнятся по структуре, этапности, стоимости, цели реализации проекта, модели финансирования. Также выделен такой признак, как удалённость источника выбросов от места хранения и/или использования CO₂. Несмотря на то что основная часть затрат приходится на этап улавливания, последний также влияет на стоимость реализации УХУ. Стоимость полной технологической цепочки УХУ является одним из главных факторов при принятии решения о реализации проекта. Проекты УХУ требуют высокого

²⁸⁴ Череповицына А. А., Дорожкина И. П., Костылева В. М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 473–487. – DOI: 10.17073/2072-1633-2022-4-473-487.

²⁸⁵ Там же.

²⁸⁶ Kearns D. Technology readiness and costs of CCS / D. Kearns, H. Liu, C. Consoli // Global CCS Institute. – 2021. – 49 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf> (дата обращения: 12.03.2023).

уровня капитальных и эксплуатационных затрат, поэтому обычно реализуются на базе или при участии крупных компаний и нуждаются в существенных мерах государственной поддержки, что зачастую обуславливает применение смешанной модели их финансирования²⁸⁷.

Что касается организационной структуры и форм реализации УХУ, типы проектов по данному признаку технико-экономического обобщения будут более подробно рассмотрены далее. Можно лишь отметить, что в предложенном варианте обобщения проекты укрупненно разделены на единичные объекты (англ. CCUS facility), представляющие собой цепочку создания стоимости (англ. value chain), и сети объектов (англ. CCUS networks). Последние представляют собой более сложные организационные формы УХУ, которые обычно объединяют несколько источников выбросов, разные места хранения и носят названия кластеров (англ. clusters), сетей (англ. networks) и хабов (англ. hubs).

Следует отметить, что при разработке технико-экономического обобщения была предпринята попытка учесть максимальное количество признаков, определить их в соответствующие группы, внести пояснения по видам проектов. Вместе с тем, присутствуют допущения о неполноте и дискуссионном характере обобщения по ряду критериев – например, по модели финансирования, по удаленности источника выбросов от мест хранения / использования газа и другим – в силу ограниченного доступа к информации и незначительному накопленному опыту по реализации таких инициатив в мире²⁸⁸.

²⁸⁷ Череповицына А. А., Дорожкина И. П., Костылева В. М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 473–487. – DOI: 10.17073/2072-1633-2022-4-473-487.

²⁸⁸ Там же.

3.2 Проекты УХУ: организационные формы и договорные отношения

Организационные формы УХУ отличаются в зависимости от цели реализации технологической цепочки, а также от самой цепочки, которая может различаться, как было отмечено, в зависимости от количества источников выбросов и мощностей улавливания, видов используемого транспорта и характеристик транспортной системы, характеристик хранилищ, особенностей использования газа, входящих в технологическую цепь объектов и участников и т.д. Все это определяет набор критериев, которые могут выступить основой сравнительного анализа различных форм реализации УХУ.

В таблице 3.2 представлены такие формы, которые расположены от самой простой – цепочка создания стоимости – до более сложных, связанных с кластерными образованиями, сетями и хабами, нацеленными на укрупнение мощностей УХУ. При этом выделены единичные объекты (цепочка создания стоимости) и сети объектов (все остальные формы)²⁸⁹.

Самой простой формой реализации УХУ является цепочка создания стоимости или единичный объект. Такая форма обычно интегрирует все этапы технологической цепи – от улавливания до захоронения/использования CO₂, включает в себя компании разных отраслей промышленности, которые ранее не сотрудничали, но каждая из которых обладает определённым опытом и компетенциями, а также другие необходимые для реализации проекта мощности и инфраструктуру²⁹⁰. Зачастую проекты с таким типом организации относят к категории мелких или средних; углекислый газ улавливается на одном источнике и используется на одном объекте или отправляется на захоронение «на месте». В качестве примера можно привести китайский проект Sinopac Zhongyuan, улавливание CO₂ в котором (около 500 тыс. т в год) осуществляется

²⁸⁹ 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.

²⁹⁰ 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.

на химическом заводе, далее газ транспортируется по трубопроводу и используется на месторождении для операций CO₂-EOR.

Таблица 3.2 – Сравнительный анализ организационных форм реализации УХУ

Организационная форма	Количество источников выбросов и мощностей улавливания	Количество мест хранения	Характеристика транспортной инфраструктуры	Основные компании-участники
Единичные объекты (англ. CCUS facility)				
Цепочка создания стоимости (англ. value chain)	1	1	Отсутствует / есть трубопровод.	Промышленные, энергетические, транспортные
Сети объектов (англ. CCUS networks)				
Промышленный кластер (англ. industrial cluster)	Много	-	-	Промышленные, энергетические
Кластер хранения (storage cluster)	-	Много	-	Энергетические
Кластерная сеть (англ. cluster / CCUS network)	Много	1	Есть трубопровод / разветвлённая транспортная сеть.	Промышленные, энергетические, транспортные
Международные сети и партнерство (англ. international networks and collaboration)	1 и более	1 и более	Есть трубопровод / разветвлённая транспортная сеть.	Международные промышленные, энергетические, транспортные
Хаб УХУ (англ. CCUS hub)	Много	Много	Разветвлённые транспортные сети, объединенные центральным пунктом сбора.	Промышленные, энергетические, транспортные

Источник: 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.

Более сложные организационные формы УХУ могут объединять несколько источников выбросов и мощностей улавливания, разные места хранения, реализовываться при участии органов государственной власти, международных компаний и т.д. Такие формы в зарубежной литературе могут носить название кластеров, сетей и хабов.

Согласно М. Портеру, «кластер — это группа географически соседствующих взаимосвязанных компаний (поставщики, производители) и

связанных с ними организаций (образовательные заведения, органы государственного управления, инфраструктурные компании), действующих в определенной сфере и взаимодополняющих друг друга»²⁹¹. Концепция отраслевых кластеров стала популярной основой для экономического и географического развития²⁹². По сути, отраслевой кластер представляет собой географическую концентрацию предприятий, поставщиков и аффилированных организаций, связанных с определённой отраслью. Кластеры могут появляться в результате удачно складывающихся условий внешнего окружения, таких как наличие минерально-сырьевой базы, доступность транспортных узлов, возможности развития кадрового потенциала, близость к перспективным рынкам²⁹³ и пр.

Среди преимуществ кластера в теории выделяют повышение производительности входящих в него участников, взаимодополняемость отраслей, возможность ведения эффективного диалога между компаниями, поставщиками, правительством и другими заинтересованными сторонами и др. Концентрация взаимосвязанных компаний, их сосредоточение на одной географической территории позволяет также использовать преимущества эффекта масштаба. В отличие от единичных проектов кластеры быстрее получают государственное финансирование и правительственные одобрения в силу укрупнённого характера производственных мощностей.

Применительно к УХУ можно выделить два вида кластеров²⁹⁴:

1) промышленные кластеры (англ. industrial clusters) – форма организации первого этапа (улавливание) технологической цепи. Идея кластеров улавливания порождена тем, что по всему миру существует множество объектов с существенными объемами выбросов ПГ, которые зачастую расположены

²⁹¹ Porter M. *The Competitive Advantage of Nations*. – New York: Free Press, 1990. – 875 p.

²⁹² Chain C. P., de Santos A. C., de Castro Júnior L. G., do Prado J. W. Bibliometric analysis of the quantitative methods applied to the measurement of industrial clusters // *Journal of Economic Surveys*. – 2019. – Vol. 33. – Is. 1. – P. 60-84. – DOI: 10.1111/joes.12267.

²⁹³ *Creating shared value: How to reinvent capitalism—And unleash a wave of innovation and growth* // *Managing sustainable business: An executive education case and textbook* / M. E. Porter, M. R. Kramer. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2018. – P. 323-346. – DOI: 10.1007/978-94-024-1144-7_16.

²⁹⁴ 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.

на небольших расстояниях друг от друга. Примером такой организационной модели является кластер Teesside в Великобритании, являющийся частью проекта Net Zero Teesside с мощностью улавливания до 6 млн т CO₂ в год и объединяющий энергетические мощности-источники выбросов, а также предприятия тяжелой промышленности (производство чугуна и стали, химическое производство);

2) кластеры хранения (англ. storage clusters) – форма организации третьего этапа (захоронение) технологической цепи. В кластерах хранения CO₂ обычно распределяется между группой различных, но достаточно близких по расположению геологических мест хранения и/или нефтегазовых месторождений. Примером кластера хранения является совокупность газовых месторождений в Северном море, используемых для захоронения углекислого газа (до 5 млн т в год) в рамках проекта Porthos (Нидерланды). Проект получил серьезную государственную поддержку от правительства страны.

Развитие идеи кластеров способствовало созданию другой организационной модели – кластерная сеть (англ. cluster / CCUS network). Кластерная сеть тесно связана с понятием «транспортная сеть» или «трубопроводная сеть» (англ. pipeline network), что в научной литературе часто и подразумевается под данной организационной моделью^{295,296}. Однако существует и более широкое определение термина: 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. По сравнению с единичными объектами УХУ,

²⁹⁵ Wetenhall B., Race J., Aghajani H., Fernandez E. S., Naylor M., Lucquiaud M., Chalmers H. Considerations in the Development of Flexible CCS Network // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 114. – P. 6800-6812. – DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1810.

²⁹⁶ Guo J.-X. Integrated optimization model for CCS hubs and pipeline network design // Computers & Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 132: 106632. – DOI: [10.1016/j.compchemeng.2019.106632](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106632).

кластерные сети крупнее и включают в себя больше заинтересованных сторон, а также более активное участие местных и региональных органов власти²⁹⁷.

Разновидностью кластерной сети являются международные сети и партнерство (англ. international networks and collaboration). Это кластерные сети, реализующиеся на территории нескольких государств или объединяющие объекты, операторами которых являются международные компании. Примером является уникальный британский проект Zero Carbon Humber (мощность улавливания – более 18 млн т CO₂ в год), партнером которого выступает норвежская компания “National Grid”, предоставляющая услуги по транспорту углекислого газа, а также инфраструктуру хранения.

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 (англ. CCUS hubs). Эта наиболее сложная и одновременно «молодая» организационная модель, обычно объединяющая промышленные кластеры и кластеры хранения с разветвленными транспортными сетями, соединенными центральным пунктом сбора. Хабы могут создаваться как на этапе улавливания, так и на этапе хранения, или одновременно на обоих этапах. Хабы УХУ особенно распространены в газотранспортных отраслях²⁹⁸²⁹⁹. Яркими примерами являются хабы распределения CO₂ по трубопроводам в США – Денвер-Сити Хаб и Мак Ками Хаб в Техасе.

В целом, происходящие процессы в области укрупнения форм реализации УХУ отвечают идее о том, что «объединения экономических агентов на основе партнерства и взаимной выгоды могут стать «окном возможностей» для

²⁹⁷ 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.

²⁹⁸ Там же.

²⁹⁹ Understanding industrial CCS hubs and clusters. Global Status of CCS special report // Global CCS Institute. – 2016. – 15 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf> (дата обращения: 31.01.2022).

предприятий, которым требуется одновременно решать задачи по экономической выживаемости, технологической независимости и соблюдению принципов устойчивого развития»³⁰⁰.

Уникальные межотраслевые комплексы УХУ требуют особых моделей реализации в рамках определённых форм, рассмотренных выше. Анализ показал, что для действующих крупномасштабных проектов УХУ реализуется три основных варианта договорной организации^{301,302}, представленных ниже:

1) вертикальная интеграция, представляющая собой реализацию проекта УХУ внутри отдельной компании;

2) партнерство, определяющее реализацию проекта несколькими компаниями через создание совместного предприятия или консорциум;

3) сотрудничество с сервисной компанией посредством двух форм:
 – «оператор» – оператор обеспечивает реализацию всех этапов, устанавливаются договорные отношения по покупке CO₂ с эмитентом;
 – «транспортер» – эмитент самостоятельно осуществляет улавливание, продает CO₂ компании-транспортеру, которая осуществляет этапы транспортировки и закачки.

Схожее выделение вариантов договорной организации с большей ориентацией на бизнес-модели реализации УХУ представлено в материалах Глобального института CCS³⁰³. В качестве самой простой выделяется традиционная модель «полной цепочки создания стоимости». Согласно источнику³⁰⁴, по мере развития и совершенствования моделей УХУ появляются и другие новые бизнес-модели, например «сетевые» и «узловые», которые предполагают создание промышленного кластера. При реализации такой модели

³⁰⁰ Толстых Т. О., Шмелева Н. В., Гамидуллаева Л. А., Краснобаева В. С. Роль коллаборации в развитии интеграции промышленных предприятий // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2023. – № 1. – С. 5–36. – DOI: 10.21685/2227-8486-2023-1-1.

³⁰¹ Осипцов А. Технологии улавливания, полезного использования и хранения двуокиси углерода (CCUS) / А. Осипцов, И. Гайда, Е. Грушевенко, С. Капитонов // Сколковский институт науки и технологий. – 2022. – 79 с. – URL: <https://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2022/11/CCUS-Skolteh-2022-11-10.pdf> (дата обращения: 12.10.2023).

³⁰² Yao X., Zhong P., Zhang X., Zhu L. Business model design for the carbon capture utilization and storage (CCUS) project in China // Energy policy. – 2018. – Vol. 121. – P. 519–533. – DOI: 10.1016/j.enpol.2018.06.019.2018.

³⁰³ Global Status of CCS 2023 / Global CCS Institute. – 2023. – 97 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf> (дата обращения: 01.05.2023).

³⁰⁴ Там же.

одна или несколько компаний в совместном предприятии инвестируют в развитие инфраструктуры для транспортировки и/или хранения CO₂ и затем предоставляют ее в пользование местным предприятиям-эмитентам за определенную плату. Еще одной новой бизнес-моделью является реализация улавливания как услуги. Поставщик технологий проектирует, строит и эксплуатирует установку улавливания по техническому заданию эмитента. Отдельно стоит выделить бизнес по транспортировке и хранению. Как правило, один или несколько крупных эмитентов обеспечивают первичное функционирование инфраструктуры транспортировки и хранения, после чего инфраструктура расширяется с целью вовлечения новых эмитентов, часто с более высокой стоимостью улавливания.

Выделяют также и подход, основанный на принципе «постройте, и они придут», когда инфраструктура для транспортировки и хранения проектируется и строится независимо от источников CO₂.

Модели получения доходов от реализации проектов УХУ в рамках приведенных выше вариантов также могут отличаться. Укрупненно их можно разделить на получаемые за счет³⁰⁵: 1) рыночных выгод, в случае продажи уловленного CO₂ или предоставления платных услуг; 2) налоговых льгот, в случае наличия углеродного регулирования; 3) углеродного рынка, при действующих инструментах углеродных сертификатов и кредитов; 4) государственной поддержки в случае прямого участия.

Таким образом, для реализации технологической цепочки УХУ чаще задействованы разные сектора промышленности. Комплексы УХУ представляют собой сложные инфраструктурные промышленные проекты, которые при этом «жестко» привязаны к источникам выбросов и местам хранения CO₂, то есть к определенным территориям. Тенденции к укрупнению мощностей УХУ, развитию промышленных кластеров и хабов усложняют и без того сложный процесс управления межотраслевыми системами УХУ. Уровень и глубина интеграционных взаимодействий увеличиваются, количество стейкхолдеров

³⁰⁵ Осипцов А. Технологии улавливания, полезного использования и хранения двуокиси углерода (CCUS) / А. Осипцов, И. Гайда, Е. Грушевенко, С. Капитонов // Сколковский институт науки и технологий. – 2022. – 79 с. – URL: <https://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2022/11/CCUS-Skoltech-2022-11-10.pdf> (дата обращения: 12.10.2023).

возрастает, объект управления укрупняется, количество интерфейсов также растёт. Тесная интеграция участников: промышленных компаний различных отраслей, государственных структур различных уровней, сервисных компаний и научных организации – с одной стороны, значительно усложняет процесс управления, а с другой – создает новый спектр возможностей, где обращение с CO₂ может рассматриваться как отдельная отрасль, а сам CO₂ – как ценный ресурс.

3.3 Подходы к оценке затрат на УХУ

Определение УХУ в качестве перспективной меры декарбонизации обуславливает важность понимания и оценки стоимости реализации всей технологической цепочки. На сегодня в большей части стран УХУ не являются экономически целесообразными, широко распространёнными и зрелыми по всему спектру решений. Это определяет большой разброс мнений относительно подходов к оценке стоимости всего цикла УХУ, а также существующих оценок. Известные подходы к оценке затрат на УХУ не унифицированы; разные подходы применяются для конкретных целей, отраслей и случаев. Для концептуального моделирования технологических цепочек УХУ с последующей оценкой конкретных проектов в России необходимо провести обзор и анализ существующих подходов и методик, пригодных для планирования затрат³⁰⁶.

В основе представленных в открытых источниках значений затрат на УХУ лежат различные подходы и методы их определения, в том числе экспертные оценки, результаты моделирования, инженерные исследования, модификация ранее опубликованных данных и др. Методы и подходы, используемые для определения диапазонов затрат на УХУ, отличаются. В таблице 3.3 приведена информация об основных выявленных подходах³⁰⁷.

³⁰⁶ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

³⁰⁷ Там же

Таблица 3.3 – Характеристика подходов к оценке затрат на УХУ

Подход к оценке затрат	Суть
Определение общей стоимости обращения с 1 т CO ₂	Позволяет унифицировать оценку по разным отраслям и технологическим цепочкам. Позволяет сравнивать УХУ с другими опциями декарбонизации (ВИЭ, энергоэффективность и др.).
Оценка затрат по стадиям технологического цикла цепочки УХУ	Является базовым подходом, применяемым по всем отраслям. Позволяет определять затраты по каждому звену технологической цепочки (улавливание, транспортировка, хранение) и, в последующем, компоновать их при разных условиях.
Оценка затрат по отраслям применения	Сводится к оценке затрат на улавливание в разных отраслях как единственных существенно отличающихся при формировании технологической цепочки. Позволяет сравнивать различные отрасли-адаптеры УХУ между собой.
Оценка затрат в вариантах BASE (базовые затраты) и ОРТИ (оптимизированные затраты)	Сводится к оценке базовых затрат (первые мощности с самыми высокими затратами) и оптимизированных затрат (усовершенствованные мощности с более низкими затратами). Позволяет отслеживать снижение затрат в связи с усовершенствованием решений, а также прогнозировать последующее улучшение экономики УХУ.
Разделение отраслей-адаптеров УХУ на энергетику и промышленность	Сводится к разделению отраслей на 2 общие группы – энергетика и другие промышленные сектора. В рамках групп используются разные подходы и методики к оценке затрат.

Источник: 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

Главным показателем является стоимость обращения с 1 тонной CO₂. Для УХУ этот показатель является достаточно высоким. Затраты могут достигать 200 долл. на 1 тонну CO₂ и более, и это, как отмечалось, главное препятствие на пути их распространения. За последнее десятилетие более десяти потенциально крупных проектов в мире были отменены, и почти все – по экономическим причинам.

Так как суть подхода сводится к делению совокупных затрат на УХУ на массу выбросов CO₂, в рамках подхода необходимо определить, относительно какого количества CO₂ ведётся расчёт – уловленного (англ. captured) или предотвращённого (англ. avoided). Разница отражена на рисунке 3.2³⁰⁸.

³⁰⁸ Там же.

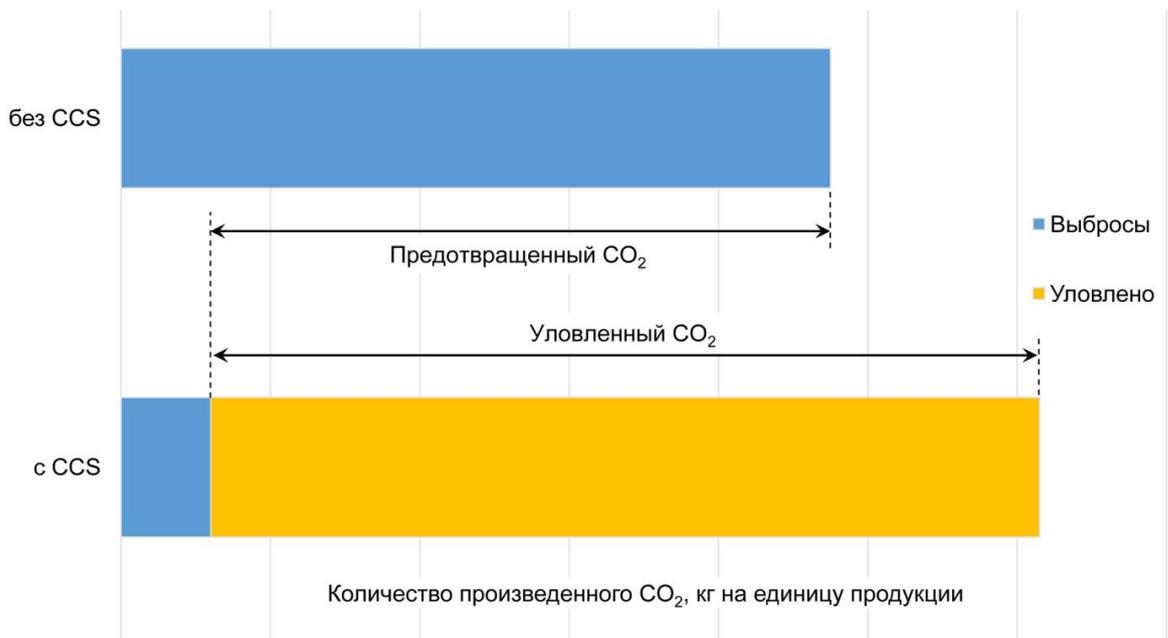


Рисунок 3.2 – Разница между массой уловленного и предотвращённого CO_2

Источник: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC. – 2005. – 442 p. – URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf (дата обращения: 06.04.2023); переведено на русский язык автором.

В связи с тем, что ввод установок улавливания приводит к увеличению общего количества выбросов CO_2 на предприятии, величина предотвращённых выбросов всегда меньше уловленных, а стоимость на 1 тонну CO_2 обратно пропорциональна этому. Более точным является учёт именно предотвращённых выбросов, поэтому далее рассмотрим методы с использованием этого показателя³⁰⁹³¹⁰

Можно выделить три метода оценки затрат на 1 тонну предотвращённых выбросов³¹¹ при использовании технологий УХУ. Данные методы подходят для оценки затрат как на объектах энергетики, так и промышленности. В основе этих методов лежит показатель нормированной стоимости электроэнергии (англ. Levelized Energy Cost, LEC; Levelized Cost of Energy, LCOE). Показатель

³⁰⁹ Rubin E. S. Understanding the pitfalls of CCS cost estimates // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2012. – Vol. 10. – P. 181-190. – DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.06.004.

³¹⁰ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

³¹¹ Roussanaly S. Calculating CO_2 avoidance costs of Carbon Capture and Storage from industry // Carbon Management. – 2019. – Vol. 10. – Is. 1. – P. 105-112. – DOI: 10.1080/17583004.2018.1553435.

представляет собой цену безубыточности производства товара – Ц (формула 3.1)³¹².

$$\sum_i \frac{O_i * Ц}{(1+r)^i} = \sum_i \frac{I_i}{(1+r)^i} + \frac{\mathcal{E}_i}{(1+r)^i} + \frac{T_i}{(1+r)^i}, \quad (3.1)$$

где O_i – годовой объем электричества, произведённого и проданного, МВт;

$Ц$ – цена электричества (LCOE), ден. ед.;

I_i – годовые инвестиции в УХУ (сумма инвестиций в УХУ за весь срок реализации проекта, делённая на количество лет), ден. ед.;

\mathcal{E}_i – годовые эксплуатационные расходы на УХУ, ден. ед.;

T_i – расходы на топливо, ден. ед.;

i – расчётное количество лет реализации проекта, лет;

r – ставка дисконтирования, %.

Преобразование данной формулы (уравнения) позволяет получить формулу показателя нормированной стоимости электроэнергии LCOE ($Ц$ в формуле выше), определяемого как средняя расчётная себестоимость производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла электростанции (см. формулу 3.2).

$$LCOE = \frac{\sum_i \frac{I_i + \mathcal{E}_i + T_i}{(1+r)^i}}{\sum_i \frac{O_i}{(1+r)^i}}, \quad (3.2)$$

Показатель LCOE изначально был предложен для определения себестоимости производства электроэнергии и, впоследствии, стоимости предотвращенных выбросов CO_2 именно в энергетике³¹³, но позднее был адаптирован и для промышленности в виде показателя нормированной стоимости основных материалов (англ. Levelised cost of key material, LCOKM).

³¹² Rubin E. S. Understanding the pitfalls of CCS cost estimates // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2012. – Vol. 10. – P. 181-190. – DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.06.004.

³¹³ IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC. – 2005. – 442 p. – URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf (дата обращения: 06.04.2023).

LCOE представляет собой показатель, с помощью которого можно определить, на какую величину увеличится средняя расчётная себестоимость производства 1 единицы электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла электростанции. Достоинствами LCOE являются возможность сравнения различных опций декарбонизации и низкоуглеродных решений между собой, а также широкая распространённость такого подхода и его простота и понятность для различных заинтересованных сторон. Несмотря на это, следует отметить, что данная метрика подходит только для упрощенной экономической оценки, не связанной с принятием инвестиционных решений, поскольку она не учитывает рыночные и финансовые факторы проекта.

Обращаясь к обозначенным выше трем методам оценки затрат на 1 тонну предотвращённых выбросов, можно определить первый метод – «исчерпывающий» (англ. exhaustive), который напрямую связан с показателем LCOE. Суть метода заключается в сравнении себестоимости производства единицы продукции на рассматриваемом объекте с использованием технологии УХУ и без использования УХУ и последующем определении стоимости обращения с 1 тонной CO₂ путём деления значения полученной разницы по себестоимости на количество тонн предотвращённых выбросов (см. формулу 3.3).

$$\text{Стоимость предотвращенных выбросов } CO_2 = \frac{(LCOKM)_{CCS} - (LCOKM)_{ref}}{\left(\frac{\text{тонн}_{CO_2}}{\text{ед}_{пр}}\right)_{ref} - \left(\frac{\text{тонн}_{CO_2}}{\text{ед}_{пр}}\right)_{CCS}}, \quad (3.3)$$

где $(LCOKM)_{CCS}$ – нормированная стоимость единицы продукции с УХУ;

$(LCOKM)_{ref}$ – нормированная стоимость единицы продукции без УХУ;

$(\text{тонн}_{CO_2}/\text{ед}_{пр})_{ref}$ – количество выбросов CO₂ на единицу продукции без УХУ, тонн;

$(\text{тонн}_{CO_2}/\text{ед}_{пр})_{CCS}$ – количество выбросов CO₂ на единицу продукции с УХУ, тонн.

Данный метод является признанным и широко используемым в науке и практике, характеризуется точностью и наглядностью. Применение метода позволяет проводить сравнительный анализ, а также понимать конечную стоимость 1 тонны предотвращённых выбросов. Вместе с тем, выделяют и существенный недостаток – необходимость сбора значительного количества исходных технических и экономических данных применительно к рассматриваемому объекту³¹⁴³¹⁵.

Выделяют еще два метода, которые применимы в случае, если реализация УХУ на объекте напрямую не влияет на основное производство и основные процессы деятельности³¹⁶.

Один из этих методов основывается на принципе дисконтирования денежных потоков. Стоимость обращения с 1 тонной CO₂ определяется путём деления значения чистой дисконтированной стоимости (англ. net present value, NPV) проекта УХУ на количество тонн предотвращённых выбросов (см. формулу 3.4).

$$\text{Стоимость предотвращенных выбросов CO}_2 = \frac{NPV}{\sum_i \frac{\text{тонн}_{CO_2}(i)}{(1+r)^i}}, \quad (3.4)$$

где NPV – чистая дисконтированная стоимость проекта УХУ, ден. ед.;

тонн_{CO_2} – количество предотвращённых выбросов в год, тонн.

Для упрощённого расчёта можно использовать третий метод оценки затрат, который основывается на принципе проведения статических расчётов. В данном случае принимается допущение, что ежегодные эксплуатационные расходы и количество предотвращённых выбросов CO₂ остаются постоянными в течение всего срока реализации проекта (см. формулу 3.5).

³¹⁴ Roussanaly S. Calculating CO₂ avoidance costs of Carbon Capture and Storage from industry // Carbon Management. – 2019. – Vol. 10. – Is. 1. – P. 105-112. – DOI: 10.1080/17583004.2018.1553435.

³¹⁵ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

³¹⁶ Там же.

$$\text{Стоимость предотвращенных выбросов } CO_2 = \frac{I_i + Э_i}{\text{тонн}_{CO_2}} \quad (3.5)$$

Так, рассмотренные выше методы расчёта могут быть использованы для оценки затрат на всю технологическую цепочку УХУ, по стадиям технологического цикла УХУ и по различным отраслям-адаптерам технологий.

В целом, подход, основанный на разделении УХУ на стадии, является ключевым при оценке затрат на всю технологическую цепочку. Очевидно, что в этом случае общая величина затрат на УХУ складывается из затрат на: 1) улавливание CO_2 в источнике выбросов, его выделение, очистку и другие процессы, предшествующие транспортировке; 2) транспортировку CO_2 трубопроводом или посредством другого транспорта; 3) закачку CO_2 в хранилище с учетом последующих возникающих эксплуатационных затрат и мониторинга хранилища³¹⁷.

Как отмечалось, самым дорогим этапом во всей цепочке является улавливание газа на источнике выбросов со всеми необходимыми последующими процессами, предшествующими транспортировке. Такие затраты могут составлять около 2/3 от всех совокупных затрат на УХУ. Стоимость улавливания газа является одним из главных показателей при оценке затрат на УХУ с разделением по отраслям-адаптерам технологий. Такие затраты будут различаться от отрасли к отрасли в зависимости от технологических особенностей этих процессов в разных отраслях.

В существующей литературе по теме также описан подход к определению базовых и оптимизированных затрат. Базовые затраты (BASE) представляют собой консервативные затраты; это первые мощности и блоки УХУ, построенные сразу после демонстрационной фазы. Оптимизированные затраты (OPTI) – это затраты на усовершенствованных мощностях и блоках, включая технологические улучшения, доработанные решения и прочее. Обычно затраты в оценках OPTI ниже затрат в оценках BASE. Ожидается, что по мере активного развития мощностей УХУ по всему миру технологические процессы будут

³¹⁷ Там же.

совершенствоваться, а затраты, как следствие, будут снижаться, открывая новые перспективы для развития этого направления. На сегодня можно утверждать, что полностью зрелые технологии и решения УХУ в мире практически отсутствуют³¹⁸.

Существует также подход, основанный на разделении всех отраслей-адаптеров УХУ на электроэнергетику и другие промышленные сектора. В основе такого разделения, в свою очередь, лежит разница в получаемом товарном продукте (электроэнергия / другая товарная продукция) и подходах к расчёту затрат.

С учетом того, что для функционирования установок улавливания на объекте требуются значительные объёмы электроэнергии, затраченная на эксплуатацию установки электроэнергия может рассматриваться как уменьшение в конечном объёме ее производства на объекте. Это позволяет использовать в отношении объектов электроэнергетики показатель LCOE³¹⁹. В конечном счете, становится возможным определить рост стоимости производства единицы электроэнергии, что будет сделано далее.

Следует отметить, что парциальное давление CO₂ в потоке отходящих газов энергетических объектов достигает существенно меньших значений, чем на многих промышленных³²⁰. Это напрямую влияет на повышенные затраты на улавливание и, соответственно, всю цепочку УХУ на объектах энергетики.

Так, на начало 2022 года в мире существует один действующий коммерческий проект по улавливанию CO₂ на электростанции – Boundary Dam в Канаде, а также один приостановленный – Petra Nova в США. Оба проекта представляют собой примеры модернизации угольных электростанций для улавливания CO₂. Электростанция в Канаде была модернизирована в 2014 году для улавливания порядка 1 Мт CO₂ в год и действует до сих пор. На объекте в США улавливание углекислого газа осуществлялось с 2017 года,

³¹⁸ Там же.

³¹⁹ Там же.

³²⁰ Kearns D. Technology readiness and costs of CCS / D. Kearns, H. Liu, C. Consoli // Global CCS Institute. – 2021. – 49 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf> (дата обращения: 12.03.2023).

но было приостановлено в 2020 году. Эксперты связывают это с высокими затратами на УХУ, присущими данному сектору.

Как отмечалось, затраты на реализацию УХУ складываются по каждому звену технологической цепочки. Ниже будут рассмотрены подходы и значения для каждого звена.

Выделяют три основные группы технологий улавливания CO₂, представленные ниже³²¹.

1) улавливание после сжигания (англ. post-combustion). Наиболее зрелая и экономически целесообразная технология³²², применяется преимущественно на тепловых электростанциях. Примером применения этой технологии может служить уже упомянутый проект Boundary Dam (Канада) – первая в мире угольная электростанция, достаточно успешно использующая УХУ³²³;

2) улавливание до сжигания (англ. pre-combustion). Более энергоэффективный процесс, чем предыдущий; требует более высоких капитальных затрат на интегрированный комбинированный цикл газификации³²⁴. Примером применения технологии могут служить американские проекты Great Plains, где источником выбросов являются мощности по производству синтетического природного газа, и Coffeyville, где выбросы улавливаются на заводе по производству удобрений^{325, 326};

3) улавливание при кислородно-топливном сжигании (англ. oxy-fuel combustion). Менее зрелый процесс, чем предыдущие. Активно используется в новых проектах, находящихся на стадии разработки.

³²¹ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

³²² Zhiwu L., Wichitpan R., Helei L. et al. Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvents // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2015. – Vol. 40. – P. 26-54. – DOI: [10.1016/j.ijggc.2015.06.017](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.06.017).

³²³ Boundary Dam Carbon Capture Project // SaskPower. – 2022. – URL: <https://www.saskpower.com/Our-Power-Future/Infrastructure-Projects/Carbon-Capture-and-Storage/Boundary-Dam-Carbon-Capture-Project> (дата обращения: 27.05.2022).

³²⁴ Koysoumpa E., Bergins C., Kakaras E. The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies // The Journal of Supercritical Fluids. – 2018. – Vol. 132. – P. 3-16. – DOI: 10.1016/j.supflu.2017.07.029.

³²⁵ Jansen D., Gazzani M., Manzolini G., van Dijk E., Carbo M. Pre-combustion CO₂ capture // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2015. – Vol. 40. – P. 167-187. – DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.05.028.

³²⁶ Madejski P., Chmiel K., Subramanian N., Kús T. Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies // Energies. – 2022. – Vol. 15 (3). – P. 887. – DOI: 10.3390/en15030887.

Стоимость улавливания CO₂ обычно определяется как сумма капитальных и эксплуатационных затрат на установку, выраженная в долларах США на 1 тонну уловленного или предотвращённого углекислого газа. Стоимость улавливания 1 тонны CO₂, основываясь на представленных в открытых источниках данных, может варьировать от 15 до 120 и выше долл. за тонну в зависимости от источника выбросов, мощности объекта, стоимости электроэнергии, оборудования и других факторов³²⁷. Кроме того, наблюдается разница в оценках в различных источниках (см. таблицу 3.4).

Таблица 3.4 – Сравнение стоимостей улавливания из разных источников для условий США в ценах 2019 г.

Источник	Международное энергетическое агентство	Национальный нефтяной совет США	Исследовательский центр Belfer Center
Угольные тепловые электростанции	50-100	83-268	19-128
Газовые тепловые электростанции	н/д	93-290	48-146
Производство цемента	60-120	64-95	18-199
Сталелитейное производство	40-100	75-113	8-129
Производство водорода	50-80	61-88	63-132
Производство этанола	н/д	24-34	25-35
Производство аммиака	25-35	21-30	21-31
Переработка природного газа	15-25	23-35	н/д

Источник: 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

Несмотря на отличие значений между разными источниками данных, между отраслями применения прослеживается условное деление на «дорогие» и «дешевые» отрасли-адаптеры УХУ. На рисунке 3.3 представлены стоимость улавливания углекислого газа из атмосферы (по данным МЭА) и диапазоны затрат на разных промышленных объектах с разделением отраслей-адаптеров УХУ на «дорогие» и «дешевые»³²⁸.

³²⁷ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

³²⁸ Там же.

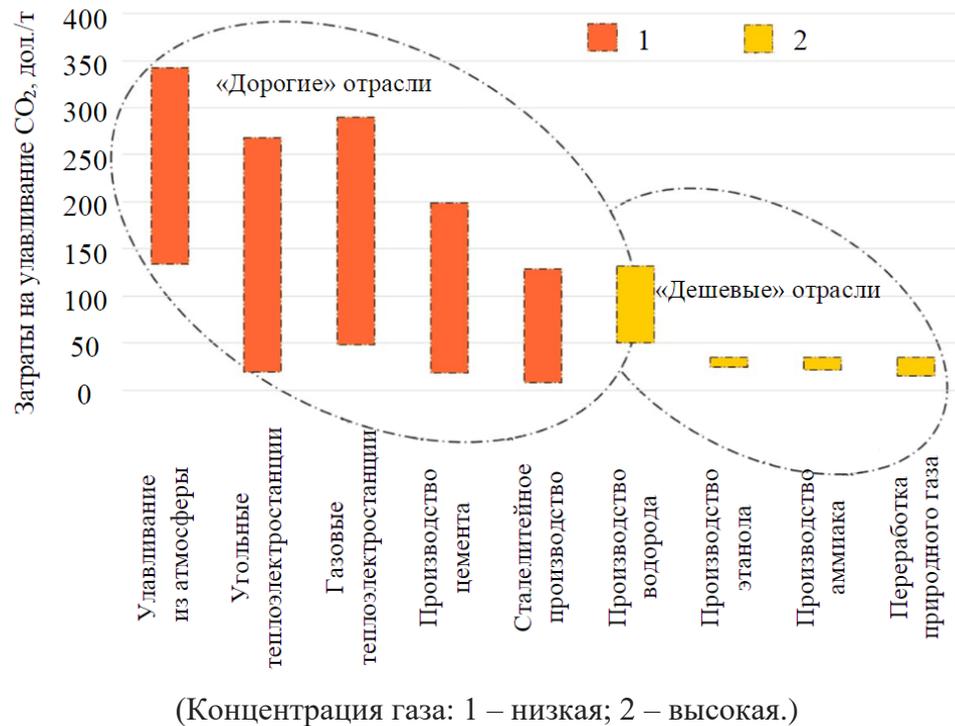


Рисунок 3.3 – Стоимость улавливания CO₂ из атмосферы и по отраслям промышленности

Источник: 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

При этом в разных источниках литературы значения стоимости в «дешевых» отраслях варьируют меньше, чем в «дорогих». Так, затраты на улавливание при производстве аммиака составляют 21-35 долл., тогда как диапазон затрат в цементной отрасли составляет 18-199 долл. на 1 тонну CO₂.

Касательно производства водорода путем риформинга и газификации угля, при улавливании из концентрированного потока затраты будут невысокие, а степень улавливания – порядка 60 % от общих выбросов³²⁹. Процент улавливания может быть увеличен до 90 % при дополнительном улавливании из низкоконцентрированного потока, что повышает стоимость. В этой связи

³²⁹ Soltani R., Rosen M. A., Dincer I. Assessment of CO₂ capture options from various points in steam methane reforming for hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Vol. 39. – Is. 35. – P. 20266-20275. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.09.161.

производство водорода может быть как «дорогой», так и «дешевой» отраслью-адаптером УХУ³³⁰.

Транспортировка CO₂ является важной частью технологической цепочки, так как призвана соединять источники улавливания CO₂ с местами его хранения. В мировой практике распространено два основных способа транспортировки углекислого газа – по трубопроводам и на судах, редко – грузовым и железнодорожным транспортом. Как было отмечено, транспортировка газа любым из этих способов является зрелым технологическим процессом³³¹.

Большая часть углекислого газа по действующим проектам в мире транспортируется трубопроводами. На территорию США приходится порядка 85 % всех трубопроводов для транспортировки CO₂. В дополнение к существующим 8-9 тыс. км действующих трубопроводов, по которым ежегодно транспортируется около 70 Мт CO₂, планируется реализовать еще несколько крупных проектов, которые должны были добавить к существующей инфраструктурной сети почти 6 тыс. км новых мощностей³³². Сети трубопроводов также функционируют в Канаде, Бразилии, Китае, Нидерландах, Норвегии, Саудовской Аравии и ОАЭ. Транспортировка CO₂ судами технологически очень схожа с транспортировкой сжиженного природного газа (СПГ).

Стоимость транспортировки CO₂ зависит, прежде всего, от территориального расположения мощностей проекта и существующей системы транспорта. Например, затраты на транспортировку 2 млн тонн углекислого газа в год трубопроводом оценивают от 4 до 31 долл. за тонну, морским транспортом – от 21 до 27 долл. за тонну в зависимости от расстояния.

На рисунке 3.4 приведены данные 2011 г. о стоимости транспортировки углекислого газа различными способами, отражающие зависимость затрат от массы CO₂ и расстояния.

³³⁰ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

³³¹ Там же.

³³² CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market // IEA. – 2023. – 121 p. – URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).

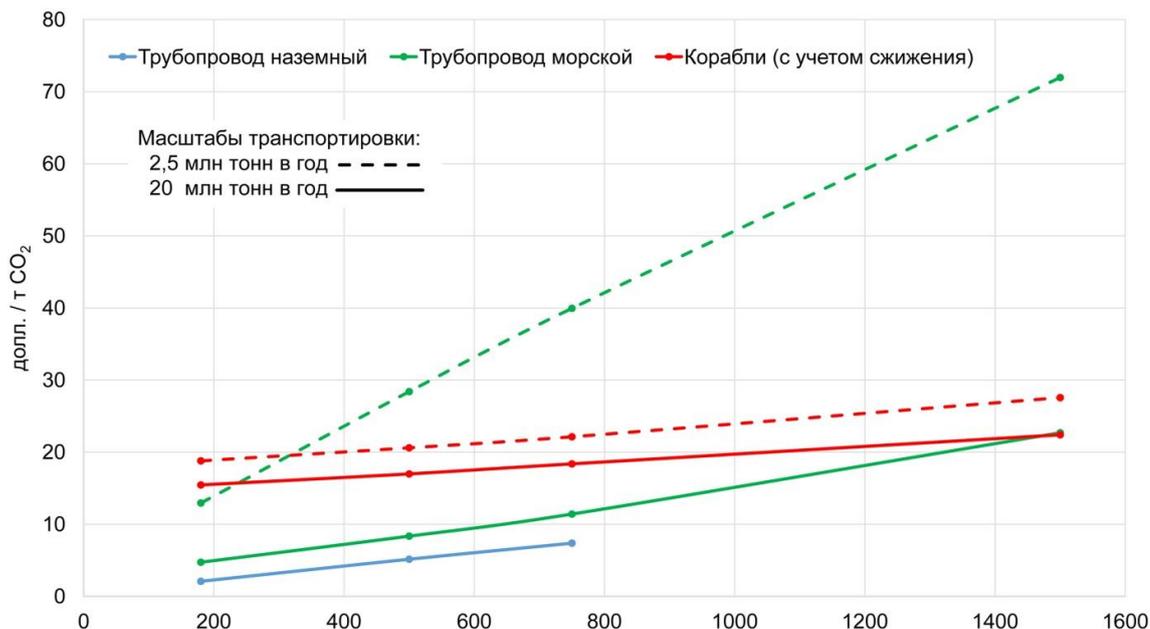


Рисунок 3.4 – Расходы на транспортировку CO₂ на большие расстояния

Источник: The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage // ZEP. – 2011. – 51 p. – URL: <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Overall-CO2-Costs-Report.pdf> (дата обращения: 21.05.2022).

Таким образом, при необходимости транспортировки больших количеств CO₂ на относительно небольшие и средние расстояния целесообразно использование трубопроводов, при этом стоимость на тонну будет расти пропорционально увеличению расстояния. Морской транспорт требует предварительного сжижения газа, что значительно увеличивает затраты, в связи с чем этот вид транспорта экономически предпочтителен к использованию при средних объёмах и на дальние расстояния³³³. На рисунке 3.4 видно, насколько ярко выраженным является эффект масштаба при транспортировке газа трубопроводом³³⁴.

Геологическое захоронение CO₂ является заключительным этапом в цепочке УХУ. Технологические и другие решения по закачке, хранению и мониторингу CO₂ в недрах Земли достаточно давно и хорошо известны. Хранение

³³³ Knoope M. M. J., Ramirez A., Faaij A. P. C. Investing in CO₂ transport infrastructure under uncertainty: A comparison between ships and pipelines // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2015. – Vol. 41. – P. 174-193. – DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.07.013.

³³⁴ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

CO₂ требует его сжатия; для обеспечения поддержания высокого давления пласт-хранилище должен находиться на глубине не менее 800 м. Обычно CO₂ хранится в геологических формациях, сравнимых с теми, которые естественным образом содержат воду, нефть или газ; используемые технологии являются практически теми же, что используются для повышения нефтеотдачи пластов.

Можно выделить три зрелых варианта хранения углекислого газа³³⁵: (1) закачка углекислого газа в нефтяной пласт для повышения нефтеотдачи и последующего хранения (CO₂-EOR); (2) хранение в соленосных пластах; (3) хранение в истощённых (выработанных) нефтяных и газовых месторождениях.

В целом, закачка газа осуществляется в пласт через скважину, где он остаётся в ловушке; весь процесс сопровождается постоянным мониторингом до начала, во время закачки и после закрытия скважины. Первая технология (CO₂-EOR) вместе с хранением представляет собой полезное использование газа для повышения нефтеотдачи, а два других решения – его пассивное хранение. Большая часть проектов УХУ в мире реализуется посредством CO₂-EOR. Каждый из этих видов хранения может быть реализован в резервуарах, расположенных на суше и в море. Большинство действующих коммерческих проектов на сегодня используют в качестве хранилищ глубокозалегающие соленосные пласты на суше, а истощённые нефтегазовые месторождения используются в основном для пилотных и демонстрационных проектов, в силу самых низких затрат³³⁶.

Оценки затрат на захоронение CO₂ являются ориентировочными и характеризуются достаточно большим разбросом. Так, по данным МЭА, для условий США стоимость захоронения углекислого газа оценивается от 5 до 55 долл. за 1 тонну, при этом для более 60 % наземных резервуаров стоимость не превышает 10 долл. за 1 тонну, в случае морских – для половины резервуаров не более 40 долл. за 1 тонну. Национальный нефтяной совет оценил стоимость наземного захоронения углекислого газа в США от 1 до 18 долл. за 1 тонну CO₂

³³⁵ Kearns D. Technology readiness and costs of CCS / D. Kearns, H. Liu, C. Consoli // Global CCS Institute. – 2021. – 49 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf> (дата обращения: 12.03.2023).

³³⁶ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

в зависимости от региона и масштабов закачки. Однако стоимость хранения CO₂ будет зависеть непосредственно от конкретного хранилища³³⁷.

Сравнивать удельные затраты на захоронение достаточно сложно в связи с тем, что стоимость закачки будет сильно зависеть от специфических, уникальных характеристик конкретного хранилища или нефтегазового месторождения. На рисунке 3.5 представлена вариация затрат на хранение в зависимости от типа хранилища с учетом затрат на мониторинг.

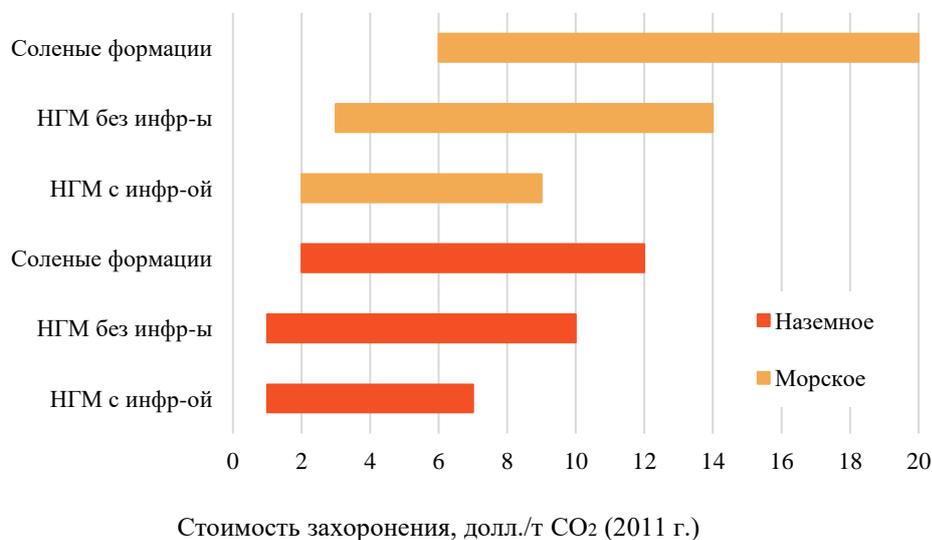


Рисунок 3.5 – Расходы на захоронение CO₂ (НГМ – нефтегазовое месторождение)

Источник: The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage // ZEP. – 2011. – 51 p. – URL: <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Overall-CO2-Costs-Report.pdf> (дата обращения: 21.05.2022).

Исходя из предположения, что более дешёвые доступные хранилища будут использоваться в первую очередь при масштабировании УХУ, а более дорогие чуть позже, когда потребуется больше мощностей для хранения, можно сделать вывод, что стоимость хранения на ранних этапах развития УХУ в каждом конкретном регионе будет ниже³³⁸.

По некоторым проектам в открытых источниках представлены суммарная стоимость транспорта и хранения на тонну CO₂. Например, проект Northern

³³⁷ Там же.

³³⁸ Там же.

Lights, представляющий первую в мире инфраструктуру транспортировки и хранения CO₂, где хранение углекислого газа предоставляется в качестве услуги, даёт оценки по стоимости и хранению в размере 30–45 долл. за тонну CO₂³³⁹. Схема реализации проекта предполагает транспортировку CO₂ на кораблях из различных портов для последующего захоронения в Северном море.

Таким образом, полная технологическая цепочка УХУ может быть реализована в диапазоне затрат от 20-25 до 200 и выше долл. за тонну CO₂, при этом большая часть затрат – это затраты на улавливание. Вместе с тем, сектора, стоимость реализации УХУ в которых расположена в нижней части этого диапазона, предоставляют меньше возможностей для улавливания значительных объемов CO₂. Более крупные источники выбросов, такие как производство электроэнергии и некоторые промышленные производства, как правило, имеют стоимость улавливания CO₂ в верхней части этого диапазона. Следовательно, у этих секторов меньшие экономические возможности для внедрения УХУ. В следующем разделе будет представлена разработанная автором система факторов, определяющая уровень затрат на УХУ и обосновывающая необходимость учета таких факторов при планировании реализации межотраслевых комплексов УХУ.

3.4 Система факторов, определяющая уровень затрат на УХУ, и базовые организационные составляющие различных форм

На основе проведённых автором исследований можно сделать вывод о том, что для каждого звена технологической цепочки УХУ характерен набор факторов, который определяет уровень затрат на его реализацию. Также существует ряд возможностей по сокращению затрат в рамках каждого звена, что определяет потенциал сокращения издержек на весь комплекс УХУ, необходимый для

³³⁹ Northern Lights: Accelerating decarbonisation // Northern Lights. – 2022. – URL: <https://norlights.com/> (дата обращения: 27.05.2022).

масштабирования таких решений (см. рисунок 3.6). Такую систему факторов следует рассматривать как определяющую при моделировании сложных межотраслевых цепочек УХУ, так как именно высокий уровень затрат является основной причиной медленного распространения в мире и отсутствия их в России.



Рисунок 3.6 – Система факторов, определяющая уровень затрат на УХУ

Источник: 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

Согласно экспертным оценкам, при прочих равных условиях затраты на улавливание находятся в обратной зависимости от парциального давления CO₂ в газовом потоке. Это, в большей степени, происходит за счёт того, что парциальное давление определяет необходимое технологическое оборудование, а именно: его размер, конструктив и характеристики, требуемые на работу установки затраты электроэнергии (чем выше парциальное давление, тем меньше энергозатраты), а также доступные технологии улавливания. Это, в свою очередь, вносит существенный вклад в общую стоимость улавливания и реализацию всей технологической цепи УХУ. Таким образом, стоимость улавливания углекислого газа будет существенно ниже при его выделении из концентрированных потоков,

которые получают, например, при переработке природного газа, производстве аммиака, этанола, водорода («дешёвые» отрасли). Однако при производстве электроэнергии, цемента и стали, улавливании углекислого газа из атмосферы (DAC) затраты на улавливание существенно возрастают («дорогие» отрасли)³⁴⁰. Все это определяет необходимость проведения комплекса предварительных работ по выбору источника выбросов при моделировании технологических цепочек УХУ. Источник выбросов необходим для реализации всех организационных форм УХУ, обсужденных ранее, за исключением кластера хранения, а концентрация источников выбросов – для кластеров улавливания и более сложных форм (сетей и хабов).

Капитальные затраты на установки улавливания углекислого газа имеют тенденцию к нелинейному росту с увеличением масштаба. Обычно капитальные затраты пропорциональны масштабу в степени n , где n зависит от количества установок (см. формулу 3.6)³⁴¹.

$$K_A = K_B \left(\frac{M_A}{M_B} \right)^n, \quad (3.6)$$

где $K_{A,B}$ – капитальные вложения проектов А, Б соответственно, ден. ед.;

$M_{A,B}$ – мощность установок улавливания проектов А, Б соответственно, тонн;

n – варьируется от 0,6 (одна установка) до 0,8 (несколько параллельных установок), доли ед.

Предполагается, что для установки улавливания увеличение мощности в два раза приведёт к увеличению капитальных затрат примерно на 50 %. Это означает, что удельные капитальные затраты на единицу уловленных или предотвращённых выбросов должны снизиться примерно на 25 %. Следуя этой зависимости, можно сделать вывод, что эффект будет еще более выраженным при более значительном

³⁴⁰ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

³⁴¹ Tribe M. A., Alpine R. L. W. Scale economies and the «0.6 rule» // Engineering Costs and Production Economics. – 1986. – Vol. 10. – Is. 4. – P. 271-278. – DOI: 10.1016/0167-188X(86)90053-4.

увеличении мощностей³⁴². По оценкам экспертов, чтобы минимизировать затраты на улавливание, мощность установок улавливания должна быть не менее 0,4-0,45 Мт CO₂ год³⁴³.

Особое место при управлении затратами на УХУ отводится модуляризации – системе проектирования, основанной на модульном подходе. Модуляризация реализуется посредством создания оборудования стандартизированным способом с использованием технологий массового производства – модулей. Применение такого подхода позволит заложить «фундамент» для создания установок улавливания, адаптированных к каждому конкретному случаю, а также улучшить адаптацию инновационных решений и разработок на этапе улавливания (например, использование ионных жидкостей для очистки газа, сорбентов, мембран или применение принципиально новых технологий для улавливания углерода из воздуха)³⁴⁴. Модуляризация установок улавливания позволит облегчить процессы проектирования, монтажа и эксплуатации мощностей улавливания, согласования схемы всего технологического процесса. Все это может значительно улучшить экономику УХУ, а применение инновационных решений будет способствовать их распространению. Вместе с тем, все это требует проведения комплекса серьёзных НИОКР и последующих работ.

Очевидно, что стоимость улавливания газа в каждом конкретном случае также зависит от стоимости электроэнергии и других ресурсов в регионе. С учетом того, что энергозатраты на улавливание и компримирование углекислого газа весьма существенны, одним из способов их снижения является использование низкзатратных способов энергоснабжения работы мощностей. Так, например, по данным Глобального института CCS, использование сбросного тепла может снизить затраты на улавливание примерно на 10-20 долл. на 1 тонну

³⁴² 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

³⁴³ Kearns D. Technology readiness and costs of CCS / D. Kearns, H. Liu, C. Consoli // Global CCS Institute. – 2021. – 49 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf> (дата обращения: 12.03.2023).

³⁴⁴ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

CO₂. Данный факт должен также учитываться при выборе региона и конкретной локации реализации УХУ.

Стоимость улавливания CO₂ в «дорогих» отраслях снижалась в течение последнего десятилетия и, по прогнозам экспертов, к 2025 г. уменьшится на 50 % по сравнению с 2010 г. Это обусловлено известными в науке и практике эффектами обучения и накопления опыта, которые сопровождают развитие любой промышленной технологии. Например, затраты на улавливание по проекту Boundary Dam в 2014 г. составляли порядка 105 долл./т CO₂ (в ценах 2020 г.), а по аналогичному проекту Petra Nova к 2017 году достигли порядка 70 долл./т CO₂ (в ценах 2020 г.). Это означает, что при планировании и реализации схожих проектов УХУ, особенно в рамках одной страны, региона и компании, при передаче соответствующего опыта с течением времени можно рассчитывать на снижение затрат. Стоимость транспортировки CO₂ будет определяться расположением мощностей проекта и существующей инфраструктурой. Наличие последней, представленной трубопроводами, морскими платформами, наземными сооружениями, скважинами и т.д., позволяет использовать уже существующие мощности повторно, и цепочки УХУ необходимо выстраивать именно с учетом таких возможностей. Это является одним из базовых принципов построения межотраслевых цепочек УХУ, следование которому позволит значительно сократить капитальные затраты на их реализацию как на стадии транспортировки, так и на стадии хранения, что может стать решающим фактором для реализации таких инициатив³⁴⁵.

Стоимость транспортировки трубопроводом подвержена эффекту масштаба; достаточно сильно снижаются затраты на 1 т транспортируемого CO₂ на расстояние 1 км при годовом объеме транспортировки до 0,5 Мт в год; при увеличении годового объема транспортировки затраты будут снижаться не так существенно. Таким образом, затраты очень высоки при небольших объемах транспортируемого газа, быстро снижаются с увеличением объема и впоследствии практически выравниваются, когда масса транспортируемого CO₂

³⁴⁵ Там же.

достигает миллионов тонн. Это, наряду с ориентацией на существующую инфраструктуру, определяет потенциал по управлению затратами при планировании реализации данного звена УХУ. Дополнительное снижение затрат на транспорт может быть достигнуто путём создания комплексной транспортной инфраструктуры с объединением разных видов транспорта, разделением затрат в рамках кластеров и более выраженным проявлением эффекта масштаба.

Крупные эмитенты CO₂ обычно самостоятельно способны обеспечить такие масштабы транспортировки газа, чтобы это было (в той степени, в которой это возможно) экономически целесообразно. При развитии кластеров и хабов крупные эмитенты служат стержневыми в узле, позволяя более мелким эмитентам CO₂ также использовать трубопровод для перемещения газа с меньшими затратами³⁴⁶. Очевидно, что транспортная инфраструктура необходима там, где требуется «связка» мест улавливания с местами захоронения. Она необходима при укрупнении организационных форм реализации УХУ – уже упомянутых кластеров, сетей и хабов УХУ. Последняя зачастую связана с наличием разветвлённых транспортных сетей, соединённых центральным пунктом сбора и распределения.

Стоимость захоронения углекислого газа во многом зависит от типа пласта и наличия существующей инфраструктуры. Так, захоронение газа в малоизученных морских соленосных формациях с отсутствующей инфраструктурой сопровождается самыми высокими затратами, а хранение на хорошо изученном участке на суше (в истощённых нефтяных и газовых месторождениях) с возможностью повторного использования инфраструктуры является самым дешёвым вариантом³⁴⁷. Очевидно, что первые цепочки УХУ, в том числе в России, целесообразно реализовывать с ориентацией на доступ к последним. Это подчёркивает важность участия нефтегазовых компаний в УХУ. В целом, наличие мощностей хранения необходимо для реализации всех организационных форм УХУ, за исключением кластера улавливания,

³⁴⁶ Там же.

³⁴⁷ Там же.

а концентрация мощностей хранения – для кластеров хранения и более сложных форм (сетей и хабов).

Особая роль в снижении затрат на УХУ отводится возможностям цифровизации и автоматизации; это может влиять на затраты не только на этапе хранения, но и на всей цепочке УХУ.

Кроме того, представляется возможным определить набор основных организационных составляющих для реализации различных форм межотраслевых цепочек УХУ (см. таблицу 3.5). Так, для цепочки создания стоимости (единичного объекта) базовыми организационными факторами являются наличие источника выбросов и мощностей хранения, а также возможность создания и использования существующей транспортной инфраструктуры. Вместе с тем, по последнему фактору существуют исключения, так как необходимость в транспортной системе может отсутствовать, а CO₂ использоваться на месте. Для кластера улавливания базовым фактором является наличие источника выбросов, а для кластера хранения – мощностей хранения с возможностью их концентрации на одной географической территории. Базовыми факторами для реализации кластерной сети являются возможность создания и использования существующей транспортной инфраструктуры и концентрация нескольких источников выбросов в определённой географической области. Обычно для реализации данной формы УХУ характерно наличие единой системы транспортировки и хранения, одного места хранения, поэтому необходимость в концентрации таких мощностей чаще всего отсутствует³⁴⁸. Самая сложная и относительно молодая форма реализации УХУ – хаб – основывается на всех выявленных базовых организационных факторах. Разветвлённая транспортная сеть и центральные пункты сбора и распределения являются отличительными особенностями данной формы.

³⁴⁸ 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.

Таблица 3.5 – Базовые организационные составляющие реализации различных форм УХУ

Фактор Форма	Наличие источника выбросов	Концентрация нескольких источников выбросов на одной территории	Возможность создания / использования существующей транспортной инфраструктуры	Возможность создания / использования существующих центральных пунктов сбора и распределения	Наличие мощностей хранения	Концентрация мощностей хранения на одной территории
Цепочка создания стоимости						
Кластер улавливания						
Кластер хранения						
Кластерная сеть						
Хаб						

где – базовый фактор, определяющий возможности реализации организационной формы.

Источник: 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.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

Технологические цепочки УХУ могут различаться большим набором признаков, что с научной точки зрения является предпосылкой для создания технико-экономического обобщения имеющихся теоретических и практических знаний об УХУ. В работе выделены три группы основополагающих признаков, которые могут служить основой для такого обобщения. Базовые признаки определяют сущность и основы реализации технологической цепочки УХУ. Технологические признаки акцентируют внимание на конкретных способах и технологических решениях, применяемых на этапах всей технологической цепочки. Организационно-экономические признаки определяют способы проектной реализации УХУ и стоимостные характеристики. Предложенное обобщение представляет собой методическую основу, которая позволяет систематизировать инициативы и проекты УХУ, определить характеристики конкретных проектов, сравнить их между собой. С помощью предложенного обобщения становится возможным в полном объеме структурировать реальную информацию и статистику по существующим проектам УХУ для принятия управленческих решений.

Проведенный анализ различных организационных форм построения технологических цепочек УХУ 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 УХУ. Реализация технологической цепочки УХУ зачастую подразумевает участие компаний из разных отраслей, что требует построения особых форм реализации таких проектов и определения принципов взаимодействия участников. В рамках определённых организационных форм также необходимо установление соответствующих договорных отношений между участниками технологической цепочки. Реализация улавливания на объекте-эмитенте может осуществляться в рамках отдельного проекта, равно как и

транспортировка и хранение – в рамках другого. Возможно также создание совместных предприятий и консорциумов для совместной реализации всех технологических этапов. При концептуальном моделировании реализации технологических цепочек УХУ в России необходимо ориентироваться на апробированные в мировой практике формы и подходы к построению договорных отношений. При этом следует учитывать необходимый набор основных организационных составляющих для реализации различных форм организации межотраслевых цепочек УХУ.

Полная технологическая цепочка УХУ может быть реализована в диапазоне затрат от 20-25 до 200 и выше долл. за 1 тонну CO₂, при этом большая часть затрат – это затраты на улавливание. На этапе планирования УХУ важно уделять внимание тем факторам, которые значительно влияют на уровень затрат. Например, следует избегать небольших масштабов установок по улавливанию, так как в этом случае технологические процессы улавливания становятся значительно дороже, а также следует предварительно планировать и моделировать создание всей технологической цепочки с более эффективными вариантами ее реализации, с более подходящей формой реализации и договорными отношениями. Понимание специфики затрат на УХУ в разных отраслях необходимо для формирования государственной политики, разработки инструментов поддержки таких проектов.

При подготовке данной главы диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования (1-7), а также иные публикации (8):

1. Череповицына А. А. Снижение выбросов парниковых газов: от глобального контекста к стоимостной оценке улавливания углекислого газа в Арктике // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2025. – № 2. – С. 148–163. – DOI: 10.37614/2220-802X.2.2025.88.010.

2. 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. – DOI: 10.3390/en16083575.

3. Череповицына А. А., Дорожкина И. П., Костылева В. М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 473–487. – DOI: 10.17073/2072-1633-2022-4-473-487.

4. Череповицына А., Череповицын А., Кузнецова Е. Проекты улавливания, хранения и использования CO₂ и их экономическая целесообразность // ЭКО. – 2024. – Т. 54. – № 1. – С. 117–131. – DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2024-1-117-131.

5. Cherepovitsyna A., Kuznetsova E., Popov A., Skobelev D. Carbon Capture and Utilization Projects Run by Oil and Gas Companies: A Case Study from Russia // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – No. 14: 6221. – DOI: 10.3390/su16146221.

6. Cherepovitsyna A., Kuznetsova E., Guseva T. The costs of CC(U)S adaptation: The case of Russian power industry // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9 (1). – P. 704–710. – DOI: 10.1016/j.egyr.2022.11.104.

7. Pinova A., Kuznetsova E. CC(U)S initiatives: Prospects and economic efficiency in a circular economy // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8 (1). – P. 1295–1301. – DOI: 10.1016/j.egyr.2021.11.243.

8. 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.

ГЛАВА 4. КОНСТРУКЦИИ УХУ И КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ВИДЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК В РОССИИ

4.1 Конструкции технологических цепочек УХУ

История УХУ началась около 50 лет назад. Впервые в промышленных масштабах улавливание CO_2 , его транспортировка на расстояние более 350 км и закачка в подземный резервуар была осуществлена в Пермском нефтегазоносном бассейне в США компанией “Chevron” в 1972 году.

Несмотря на то что первым коммерческим промышленным проектам УХУ более 50 лет, их развитие по миру можно охарактеризовать как достаточно медленное. Вместе с тем, технологии отделения и улавливания CO_2 (англ. separation and capture technologies) успешно внедряются и эксплуатируются уже несколько десятилетий там, где это имеет коммерческий смысл. В качестве примера можно привести отделение CO_2 от метана при добыче природного газа (англ. natural gas processing), а также отделение CO_2 от водорода в процессе производства аммиака для получения мочевины (англ. hydrogen - ammonia - fertiliser). Именно такие процессы лежат в основе большей части проектов, реализуемых по миру. Однако технологии развиваются, области применения технологий улавливания углекислого газа расширяются, варианты реализации технологической цепочки диверсифицируются. Все это привело к тому, что в мировой практике сложился ряд конструкций реализации УХУ, анализ которых представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Ключевые характеристики основных конструкций УХУ

Ключевой фактор для реализации конструкции	Характеристика фактора в части образования CO ₂	Отрасль реализации конструкции	Вид улавливания (основной)	Характеристика конструкции	Примеры проектов	Примерные мощности, млн т/год	Источники данных
Подготовка природного газа							
Состав природного газа	Высокое содержание CO ₂ в добываемом природном газе	Газовая / подготовка (переработка) природного газа (англ. natural gas processing)	Улавливание до сжигания (англ. pre-combustion)	Реализуется на производствах (газоперерабатывающих комплексах), добывающих природный газ с высоким содержанием CO ₂ , снижение содержания которого необходимо для соответствия газа стандарту в части физико-химических показателей. Часто такая конструкция рассматривается как часть разработки газового месторождения. Характеризуется относительно низкой стоимостью улавливания CO ₂ .	Occidental Terrell (США), EOR; ExxonMobil Shute Creek (США), EOR; Equinor Sleipner (Норвегия), геологическое хранение; Century plant (США), EOR; Petrobras Santos (Бразилия), EOR.	От 0,2-0,5 до 7-10	349,350, 351
Производство сжиженного природного газа (СПГ)							
Особенность технологической цепочки СПГ	Дополнительные объёмы образования CO ₂ на этапе подготовки и сжижения газа	Газовая / СПГ / подготовка (переработка) природного газа (англ. natural gas processing)	Улавливание до сжигания (англ. pre-combustion)	Реализуется на производствах (газоперерабатывающих комплексах), сжижающих природный газ. Для транспортировки в сжиженном виде газ должен быть дополнительно очищен, а процессы сжижения являются энергозатратными, что делает заводы СПГ крупными источниками выбросов и перспективными локациями для реализации конструкции. Реализация конструкции часто используется компаниями для присвоения СПГ статуса углеродно-нейтрального.	Shevron Gorgon (Австралия), геологическое хранение; Qatargas Qatar LNG (Катар), геологическое хранение.	От 2,2 до 4	352,353

³⁴⁹ CCS Facilities Database // Global CCS institute. – 2023. – URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 10.04.2023).

³⁵⁰ The current state of CCS in the U.U – résumé after 100 years of CO₂ capture and 25 years of extensive federal funding // Geoengineering monitor. – 2022. – URL: <https://www.geoengineeringmonitor.org/2022/12/the-current-state-of-ccs-in-the-u-s-resume-after-100-years-of-co2-capture-and-25-years-of-extensive-federal-funding/> (дата обращения: 01.02.2024).

³⁵¹ The Future of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS): Status, Issues, Needs // Resources for the future. – 2017. – 8 p. – URL: <https://media.rff.org/documents/RFF-May24-CCUS20event20summary.pdf> (дата обращения: 01.02.2024).

³⁵² Gorgon carbon capture and storage. Reducing greenhouse gas emissions for a lower carbon future // Chevron global. – 2024. – URL: <https://australia.chevron.com/our-businesses/gorgon-project/carbon-capture-and-storage> (дата обращения: 02.02.2024).

³⁵³ Купцов Н. В., Самодуров М. С. Углеродно-нейтральный сжиженный природный газ — текущий статус, перспективы и методы снижения углеродного следа // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2023. – Т. 8. – № 1. – С. 138-146. – DOI: 10.51890/2587-7399-2023-8-1-138-146.

Продолжение таблицы 4.1

Ключевой фактор для реализации конструкции	Характеристика фактора в части образования CO ₂	Отрасль реализации конструкции	Вид улавливания (основной)	Характеристика конструкции	Примеры проектов	Примерные мощности, млн т/год	Источники данных
Производство азотных удобрений							
Технологический процесс производства водорода и удобрений	Образование CO ₂ в процессе производства водорода и азотных удобрений	Производство азотных удобрений (англ. hydrogen / ammonia / fertiliser)	Промышленная сепарация (англ. industrial separation) / улавливание до сжигания (англ. pre-combustion)	Реализуется на заводах по производству водорода и азотных удобрений. Часто суть конструкции сводится к использованию побочного продукта (CO ₂) при производстве карбамида (мочевины), а в случае, когда объемы образования превышают такие потребности, CO ₂ направляется для повышения нефтеотдачи / захоронения. Представляет собой конструкцию, предотвращающую выбросы CO ₂ , образующиеся в результате промышленных процессов. Характеризуется относительно низкой стоимостью улавливания CO ₂ .	Enid fertiliser (США), EOR; Coffeyville (США), EOR; Shell Quest (Канада), геологическое хранение.	От 0,2-0,3 до 0,9-1	354,355, 356
Производство энергии (уголь)							
Технологический процесс производства энергии из угля	Образование CO ₂ в процессе сжигания угля	Производство энергии (уголь) (англ. power generation and heat)	Улавливание после сжигания (англ. post-combustion)	Реализуется на угольных электростанциях. Конструкция представляет собой вариант модернизации традиционных энергетических мощностей для улавливания CO ₂ с развитием инфраструктуры для транспортировки газа (часто для целей EOR), так как его использование «на месте» зачастую невозможно. Характеризуется относительно высокой стоимостью улавливания CO ₂ .	Boundary Dam (Канада), EOR; Petra Nova (США), EOR; China National Energy Guohua Jinjie (Китай), EOR / геологическое хранение; China National Energy Taizhou (Китай), EOR.	От 0,15 до 1,4	357,358

³⁵⁴ CCS Facilities Database // Global CCS institute. – 2023. – URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 10.04.2023).

³⁵⁵ The Future of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS): Status, Issues, Needs // Resources for the future. – 2017. – 8 p. – URL: <https://media.rff.org/documents/RFF-May24-CCUS20event20summary.pdf> (дата обращения: 01.02.2024).

³⁵⁶ Global Status of CCS 2023 // Global CCS Institute. – 2023. – 97 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf> (дата обращения: 01.05.2023).

³⁵⁷ Jinjie power station // Global Energy Monitor. – 2024. – URL: https://www.gem.wiki/Jinjie_power_station#cite_note-2 (дата обращения: 01.02.2024).

³⁵⁸ Repositioning CCUS for China's Net-Zero Future // Global CCS Institute. – 2022. – 19 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/09/CCUS-for-China-Net-Zero-Future-0922.pdf> (дата обращения: 05.02.2024).

Продолжение таблицы 4.1

Ключевой фактор для реализации конструкции	Характеристика фактора в части образования CO ₂	Отрасль реализации конструкции	Вид улавливания (основной)	Характеристика конструкции	Примеры проектов	Примерные мощности, млн т/год	Источники данных
Производство синтетического природного газа							
Технологический процесс производства синтетического природного газа	Образование CO ₂ при получении синтетического газа из углеводородного сырья	Производство синтетического природного газа (англ. synthetic natural gas)	Улавливание до сжигания (газификация) (англ. pre-combustion (gasification))	Реализуется на производствах, получающих синтетический природный газ из углеводородного сырья (угля). Полученный газ соотносится по свойствам с природным, однако не является углеродно-нейтральным, что обуславливает актуальность применения такой конструкции.	Great Plains (GPSP) (США), EOR	3 (единственный проект)	³⁵⁹
Химическое производство							
Технологические процессы производства продукции из углеводородного сырья	Образование CO ₂ при получении различных продуктов из углеводородного сырья путем его химической переработки	Химическое производство (англ. chemical)	Промышленная сепарация (англ. industrial separation) / улавливание до сжигания (англ. pre-combustion) / ректизол (англ. rectisol)	Реализуется на химических производствах (НПЗ, угольно-химических заводах), получающих различные виды продуктов путем химической переработки углеводородного сырья. По мере развития технологий актуальность применения такой конструкции возрастает. Часто реализуется посредством создания химических кластеров в силу комплексности технологических цепочек.	Sinopec Qilu Petrochemical (Китай), EOR, геологическое хранение; Yangchang Yulin CO ₂ -EOR (Китай), EOR.	От 0,05 до 1	³⁶⁰

³⁵⁹ Great Plains Synfuels Plant // National Energy Technology Laboratory. – 2024. – URL: <https://www.netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/great-plains> (дата обращения: 05.02.2024).

³⁶⁰ Углеродно-нейтральные энергоемкие отрасли промышленности. Технологический обзор // UNECE. – 2023. – 24 p. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_RU_draft_1.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

Продолжение таблицы 4.1

Ключевой фактор для реализации конструкции	Характеристика фактора в части образования CO ₂	Отрасль реализации конструкции	Вид улавливания (основной)	Характеристика конструкции	Примеры проектов	Примерные мощности, млн т/год	Источники данных
Производство чугуна и стали							
Технологический процесс производства чугуна и стали	Образование CO ₂ в промышленном процессе и в процессе сжигания топлива для получения энергии при производстве чугуна и стали	Производство чугуна и стали (англ. iron and steel production)	Промышленная сепарация (англ. industrial separation) / улавливание после сжигания (англ. post-combustion)	Реализуется на заводах по производству чугуна и стали. Конструкция представлена единственным в мире коммерческим проектом, но обладает большим потенциалом в связи со сложностью применения иных опций декарбонизации мощностей чёрной металлургии. Характеризуется средней относительно других отраслей стоимостью улавливания CO ₂ .	ADNOC Al-Reyadah (ОАЭ), EOR	0,8 (единственный проект)	361,362, 363
Производство цемента							
Технологический процесс производства цемента	Образование CO ₂ в промышленном процессе и в процессе сжигания топлива для получения энергии	Цемент (англ. cement)	Улавливание до сжигания (англ. pre-combustion) / улавливание после сжигания (англ. post-combustion)	Реализуется на заводах по производству цемента. Конструкция не реализуется в промышленных масштабах на коммерческой основе. Имеет большой потенциал для декарбонизации производства цемента в перспективе.	Действующие в промышленных масштабах коммерческие проекты отсутствуют. Brevik Norcem – Langskip (Норвегия), геологическое хранение (строительство).	-	364

³⁶¹ Выбросы металлургической промышленности // Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. Том 3: Промышленные процессы и использование продуктов / Д. Маркс, Д. Любетски, Б. А. Штайнер и др. – Женева, 2006. – Гл. 4. – С. 4.1.-4.94. – URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/3_Volume3/V3_4_Ch4_Metal_Industry.pdf (дата обращения: 01.02.2024).

³⁶² Al Reyadah: Project Details // The university of Edinburgh. – 2024. – URL: <https://www.geos.ed.ac.uk/scs/project-info/622> (дата обращения: 05.02.2024).

³⁶³ Углеродно-нейтральные энергоёмкие отрасли промышленности. Технологический обзор // UNECE. – 2023. – 24 p. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_RU_draft_1.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

³⁶⁴ Там же.

Продолжение таблицы 4.1

Ключевой фактор для реализации конструкции	Характеристика фактора в части образования CO ₂	Отрасль реализации конструкции	Вид улавливания (основной)	Характеристика конструкции	Примеры проектов	Примерные мощности, млн т/год	Источники данных
Биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода							
Процесс (в том числе технологический) получения энергии/топлива из биомассы	Образование CO ₂ в процессе сжигания/преобразования биомассы	Биоэнергетика (англ. BECCS) / производство этанола	При сжигании биомассы – улавливание после сжигания (англ. post-combustion capture); при преобразовании биомассы – улавливание не требуется.	Реализуется на мощностях по получению энергии и топлива из биомассы (например, завод по производству этанола из кукурузы). Может быть углеродно-отрицательной, если масса секвестрированного CO ₂ больше выделяемого в процессе производства, транспортировки, переработки и использования биомассы.	ADM Illinois Industrial (США), геологическое хранение; Bonanza BioEnergy (США), EOR; Arkalon (США), EOR.	От 0,1 до 1	³⁶⁵

Источник: составлено автором.

³⁶⁵ Bioenergy and Carbon Capture and Storage // Global CCS Institute. – 2020. – 12 p. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/BIOENERGY-AND-CARBON-CAPTURE-AND-STORAGE_Perspective_New-Template.pdf (дата обращения: 18.03.2024).

Под конструкцией УХУ в рамках работы подразумевается такая конструкция, которая получается в результате вариативных изменений в рамках базовой технологической цепочки «улавливание – транспорт – хранение». При этом изменения обусловлены воздействием разных факторов, таких как источник CO₂, особенности промышленных и энергетических процессов, развитие новых технологий, появление новых секторов промышленности, а также рост возможностей по утилизации и захоронению газа. Все это, в конечном счете, определяет модельные особенности технологических цепочек по улавливанию и хранению углерода.

Подготовка природного газа

Большая часть действующих проектов по миру реализуется в рамках конструкций УХУ по переработке (подготовке) природного газа (англ. natural gas processing). Такие проекты в промышленных масштабах реализуются в мире с 1970-1980 годов, лидером являются США. Ключевым фактором для реализации такой конструкции является повышенное содержание CO₂ в добываемом природном газе. Так, например, в американском проекте Occidental Terrell добываемый природный газ содержит от 18 до 53 % CO₂ и без дополнительной очистки не может быть востребован на рынке. Уловленный углекислый газ в случае этого проекта по трубопроводам протяжённостью несколько сотен километров подаётся на зрелые нефтяные месторождения для повышения нефтеотдачи.

Такая конструкция в промышленном проекте Equinor Sleipner (Норвегия) реализуется как часть разработки газового месторождения. Природный газ в пласте содержит около 9 % CO₂, и для достижения коммерческих характеристик необходимо снижать его содержание, как и в предыдущем примере. Углеродный налог стал одним из ключевых факторов, побудивших компанию Equinor (ранее Statoil) к повторной закачке удалённого из природного газа CO₂ в геологическое хранилище – песчаник. Данный проект стал первым в мире, реализующим этот процесс на морской платформе.

В большей части проектов, реализуемых по такой конструкции, уловленный углекислый газ используется для операций CO₂-EOR. Для транспортировки газа до места закачки в нефтяное месторождение обычно требуется трубопровод, но в ряде случаев транспортировка не требуется: углекислый газ закачивается «на месте». В качестве примера можно привести проект Petrobras Santos (Бразилия), где добываемый природный газ содержит 8-40 % CO₂³⁶⁶. Также в упомянутом выше норвежском проекте Sleipner осуществляется прямая закачка газа, и необходимость в создании транспортных мощностей отсутствует.

Следует отметить два действующих крупнейших американских проекта по улавливанию CO₂ на газоперерабатывающих производствах – завод Shute Creek компании “ExxonMobil” мощностью 7 млн т CO₂ в год и завод Century Plant компании “Occidental Petroleum” мощностью 5 млн т CO₂ в год. Данная конструкция начала развиваться и до сегодняшнего дня является широко распространённой в США.

Производство СПГ

Снижение выбросов ПГ по всей цепочке создания стоимости СПГ может реализовываться в разных вариантах. При этом структура объёмов выбросов, приходящихся на различные этапы технологической цепи, различается по источникам. В целом, порядка 65–75 % связывают с конечным использованием СПГ как энергоресурса; на процессы добычи, подготовки, сжижения, транспортировки и регазификации относят около 25–35 % от объёма выбросов по всей цепочке. При этом доля выбросов, приходящаяся на сжижение в общей цепочке СПГ, составляет от 7,2 до 12,5 % согласно различным оценкам³⁶⁷.

Применение УХУ на мощностях по сжижению природного газа является действующей в настоящее время и перспективной в будущем конструкцией. СПГ должен содержать минимальное количество CO₂, что определяет необходимость его дополнительной очистки там, где это необходимо. Кроме того, для подготовки

³⁶⁶ CCS Facilities Database // Global CCS institute. – 2023. – URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 10.04.2023).

³⁶⁷ Купцов Н. В., Самодуров М. С. Углеродно-нейтральный сжиженный природный газ — текущий статус, перспективы и методы снижения углеродного следа // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2023. – Т. 8. – № 1. – С. 138-146. – DOI: 10.51890/2587-7399-2023-8-1-138-146.

и сжижения газа необходима электроэнергия, выработка которой также связана с образованием углекислого газа, что делает заводы СПГ крупными источниками выбросов. Крупнейшим СПГ-проектом, реализующим УХУ, является Gorgon (Австралия) с мощностью до 4 млн т CO₂ в год. Углекислый газ, получаемый в ходе подготовки природного газа для сжижения, улавливается на Горгонском газовом заводе, после чего закачивается под землю на глубину более 2 км³⁶⁸. Катарский проект Qatargas Qatar LNG предусматривает улавливание CO₂ на таком же заводе с последующей закачкой газа в геологическое хранилище. Подобное решение планирует применить и в России компания ПАО «НОВАТЭК» в рамках проекта Ямал СПГ.

Производство азотных удобрений

Конструкция основывается на производствах, технологический процесс которых связан с получением CO₂ при производстве водорода и азотных удобрений (аммиака). Частично побочный углекислый газ используется для производства мочевины, однако объемы его образования зачастую превышают эти потребности, что побуждает к его «выводу» из производственного процесса. Так, на американском заводе по производству удобрений Enid Fertilizer часть образовавшегося CO₂ используется при производстве мочевины, а оставшиеся объемы продаются нефтегазовым компаниям для решений CO₂-EOR. Подобные конструкции реализуются и на других известных в мире заводах, в частности американском PCS Nitrogen Details – излишки CO₂ продаются компании “Denbury Resources” для дальнейшего использования в нефтяных пластах. С 2013 года в рамках проекта Air Products SMR в США функционирует первая полномасштабная промышленная установка по производству водорода на основе парового риформинга метана с применением УХУ.

³⁶⁸ Gorgon carbon capture and storage. Reducing greenhouse gas emissions for a lower carbon future // Chevron global. – 2024. – URL: <https://australia.chevron.com/our-businesses/gorgon-project/carbon-capture-and-storage> (дата обращения: 02.02.2024).

Производство энергии (уголь)

Конструкция представляет собой модернизацию традиционной угольной электростанции для улавливания углекислого газа при сжигании угля. Самые известные угольные электростанции, адаптировавшие УХУ, – Boundary Dam в Канаде и Petra Nova в США. За последние три года два подобных проекта были запущены и в Китае. Мощности УХУ на одном из энергоблоков электростанции China National Energy Guohua Jinjie были введены в эксплуатацию в 2021 году. В 2023 году на электростанции China National Energy Taizhou была введена установка УХУ мощностью до 500 тыс. т CO₂ в год. На сегодня это крупнейшая в Азии и третья по величине в мире (после Boundary Dam и Petra Nova) установка УХУ в угольной энергетике.

Производство синтетического природного газа

Данная конструкция реализуется на производствах, сутью технологического процесса которых состоит в получении синтетического природного газа из углеводородного сырья, частый случай – в процессе газификации угля (англ. «coal to gas»). Примером реализации такой конструкции является единственный в мире проект – завод Great Plains Synfuels (GPSP) в США, который уже более 25 лет производит синтетический природный газ из бурого угля. Уловленный в процессе CO₂ по трубопроводу направляется для операций по повышению нефтеотдачи. В целом, данная конструкция является перспективной при развитии и масштабировании технологий газификации угля.

Химическое производство

Химические производства являются источниками существенной массы выбросов ПГ, так как используют ископаемое топливо в качестве сырья, а не только в качестве источника получения энергии. УХУ признается одной из основных технологий декарбонизации данного сектора³⁶⁹. На текущем уровне развития технологий зачастую конструкция реализуется на угольно-химических, нефтеперерабатывающих и нефтехимических производствах. В качестве примера

³⁶⁹ Углеродно-нейтральные энергоемкие отрасли промышленности. Технологический обзор // UNECE. – 2023. – 24 p. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_RU_draft_1.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

реализации такой конструкции можно привести проект Yangchang Yulin CO₂-EOR (Китай), который представляет собой технологическую цепочку, состоящую из установки улавливания на китайском угольно-химическом заводе Yulin Coal Chemical с последующим использованием газа для повышения нефтеотдачи. Источником CO₂ являются мощности по переработке угля, природного газа и остатков тяжелой нефти в химические продукты. К преимуществам данного проекта относят то, что на угольно-химическом заводе образуется практически чистый поток CO₂, что существенно снижает затраты на улавливание, а производственные мощности расположены недалеко от нефтяных месторождений, что позволяет сократить затраты и выбросы, связанные с транспортировкой³⁷⁰.

В Китае также действует проект Sinopec Qilu Petrochemical – самый крупный в стране по улавливанию CO₂, мощностью до 1 млн т CO₂ в год. Углекислый газ улавливается на НПЗ и поставляется для операций CO₂-EOR на нефтяное месторождение.

Конструкция такого рода также функционирует в рамках Нанкинского парка химической промышленности в Китае – проект Sinopec Nanjing EOR. На производственной площадке с несколькими газификационными установками, использующими уголь и побочные продукты нефтепереработки, получают синтез-газ, который, в свою очередь, используется для различных процессов, включая производство водорода, удобрений, метанола и других жидких углеводородных продуктов. Согласно открытым данным, на площадке функционирует установка улавливания мощностью 50 тыс. т CO₂ в год и планируется ввод еще нескольких. В связи с предполагаемым развитием химических технологий и решений в данной области следует отметить перспективность применения такой конструкции на химических производствах.

Производство чугуна и стали

³⁷⁰ Yangchang CO₂-EOR: Unique Geology, Unique Challenges // Global CCS Institute. – 2016. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/insights/yanchang-co2-eor-unique-geology-unique-challenges/> (дата обращения: 10.02.2024).

Сталелитейная промышленность является одной из трудно декарбонизируемых отраслей. Конструкция УХУ в данной отрасли представлена единственным коммерческим проектом в Абу-Даби (ОАЭ). Углекислый газ улавливается на заводе прямого восстановления железа (англ. Direct Reduced Iron, DRI) Emirates Steel с использованием таких технологических решений, которые приводят к потоку отходящих газов с высоким содержанием CO_2 (>99 %). После соответствующей подготовки углекислый газ транспортируется по трубопроводу протяжённостью порядка 40 км и закачивается для повышения нефтеотдачи на объектах национальной нефтяной компании.

Вместе с тем, производство чугуна и стали можно отнести к наиболее крупным промышленным источникам выбросов CO_2 : в глобальном масштабе на него приходится около 7-9 % выбросов³⁷¹. Модернизация доменных и кислородных печей с применением УХУ может быть одним из основных направлений решения проблемы в среднесрочной перспективе, пока технологии прямого восстановления железа с водородом с нулевым содержанием углекислого газа не станут более конкурентоспособными с точки зрения затрат³⁷². Потенциально УХУ могут применяться ко всем источникам выбросов CO_2 сталелитейного производства.

В целом, следует отметить, что декарбонизация такой энергоёмкой отрасли является одной из базовых составляющих достижения желаемой углеродной нейтральности, что определяет наряду с отсутствием большого количества альтернативных направлений декарбонизации перспективность данной конструкции УХУ. Прогнозы МЭА подтверждают данный тезис: по оценкам экспертов, к 2060 году мощности УХУ должны быть интегрированы примерно на одной пятой всех мировых мощностей по производству сырой стали.

³⁷¹ Углеродно-нейтральные энергоёмкие отрасли промышленности. Технологический обзор // UNECE. – 2023. – 24 p. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_RU_draft_1.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

³⁷² Там же.

Производство цемента

Данная конструкция обладает серьёзным потенциалом для декарбонизации мощностей по производству цемента. Улавливание углекислого газа может применяться как для энергетических (сжигание ископаемого топлива), так и для промышленных (различные производственные операции) процессов. Действующие коммерческие проекты такого рода в мире отсутствуют, но разрабатывается ряд пилотных проектов, несколько проектов находятся на стадии строительства. Одним из сложных вопросов в рамках развития данной конструкции является транспортировка и хранение уловленного CO₂. Зачастую цементные заводы располагаются в непосредственной близости к населенным пунктам и промышленным площадкам, что усложняет процесс захоронения углекислого газа в непосредственной близости. В данной области существуют разработки по использованию уловленного CO₂ непосредственно при производстве цемента, но пока они не апробированы в промышленных масштабах.

Цементный завод Heidelberg Materials Brevik (Норвегия), находящийся на завершающей стадии строительства и оснащенный УХУ, станет первой в мире конструкцией такого типа, функционирующей в коммерческих масштабах. Углекислый газ будет транспортироваться и перманентно храниться в Северном море в рамках развития открытой сети по транспортировке и хранению углекислого газа «Северное сияние» (Northern Lights).

Биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода

Еще одна известная и перспективная конструкция УХУ – производство энергии и топлива из биомассы, так называемая биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода (англ. Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS). По миру существует лишь несколько действующих объектов с общим объемом мощностей улавливания порядка 1,5 млн т CO₂ в год. Единственная крупномасштабная технологическая цепочка BECCS с улавливанием до 1 млн т CO₂ в год представлена в США на мощностях по производству этанола из кукурузы – ADM Illinois Industrial. Углекислый газ образуется при ферментации,

что не требует применения технологии улавливания, сжимается и закачивается в геологическое хранилище, расположенное под землей на территории самого предприятия. Еще четыре действующих проекта по миру представляют собой заводы по производству этанола небольшой мощности в США и Канаде, где большая часть уловленного или полученного CO₂ используется для повышения нефтеотдачи. Вместе с тем, основные решения из набора технологии BECCS являются зрелыми, их потенциал в рамках общей траектории движения к углеродной нейтральности признается очень значительным, и именно данная конструкция УХУ, по мнению экспертов, станет одним из перспективных решений для декарбонизации промышленных систем и обеспечения отрицательных выбросов. На сегодня обеспечение доступа к земельным, водным ресурсам и наличие удобрений для получения биомассы является основным ограничением для развития BECCS³⁷³.

4.2 Трансформация конструкции УХУ и их применимость в России

Реализация технологических цепочек УХУ, как было выявлено и доказано автором, происходит в рамках конструкций, основные из которых проанализированы в рамках работы. При этом развитие и масштабирование УХУ приводит к перманентным изменениям, происходящим, в большей степени, в процессе появления новых технологий, совершенствования бизнес-моделей и возникновения новых институциональных условий в разных странах и регионах мира. Все это приводит к ряду модельных преобразований, основные из которых по стадиям технологической цепочки представлены ниже.

³⁷³ Bioenergy and Carbon Capture and Storage // Global CCS Institute. – 2020. – 12 p. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/BIOENERGY-AND-CARBON-CAPTURE-AND-STORAGE_Perspective_New-Template.pdf (дата обращения: 18.03.2024).

Улавливание углекислого газа

На сегодня, как было сказано, 41 действующая установка улавливания по миру обеспечивает совокупные мощности улавливания в объеме 40-50 млн т CO₂ в год. Улавливание и хранение углерода применяется как решение, направленное на предотвращение попадания CO₂ в атмосферу, который образуется при реализации ряда промышленных процессов, преобразовании топлива и производстве электроэнергии. Большая часть технологий улавливания и полных технологических цепочек УХУ реализуется в рамках конструкций по переработке (подготовке) природного газа (англ. natural gas processing) – порядка 65 % всего уловленного CO₂ в мире приходится на данный сектор. На втором месте в мире – мощности по отделению углекислого газа от водорода на заводах по производству азотных удобрений (англ. hydrogen / ammonia / fertiliser), угольно-химические, нефтеперерабатывающие и нефтехимические производства: на их долю приходится около 25 % всех мощностей улавливания по миру. Третье место принадлежит угольной энергетике: порядка 5 % действующих мощностей улавливания функционируют на угольных электростанциях³⁷⁴. При этом ключевой тенденцией стратегического характера является зарождающаяся диверсификация источников улавливания в средне- и долгосрочной перспективах, с последующим изменением общей структуры областей применения улавливания углекислого газа в совокупном объеме функционирующих по миру мощностей. Диверсификация происходит как в сторону DAC (с 1-го действующего проекта по состоянию на 2023 год до 4-х к 2025 году), так и в сторону вовлечения и масштабирования улавливания в традиционных трудно декарбонизируемых отраслях промышленности: производство чугуна и стали, цементная промышленность, новые химические производства. Так, на сегодня улавливание в цементной отрасли не осуществляется в промышленных масштабах, а к 2028 году таких проектов в мире должно быть несколько, с общей мощностью около 5 млн т

³⁷⁴ CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market // IEA. – 2023. – 121 p. – URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).

CO₂ в год³⁷⁵. Доля мощностей по улавливанию CO₂ из атмосферы (DAC) в общей структуре к 2030 году, согласно оценкам экспертов, может достичь 15 %³⁷⁶. Активное развитие улавливание углекислого газа также получит на мощностях по производству водорода и аммиака, электроэнергии, а также в биоэнергетике, однако последнее, по мнению автора, – вопрос более долгосрочный, чем предыдущие.

Хранение углекислого газа

Действующие мировые мощности по хранению углекислого газа сопоставимы с мощностями улавливания – около 40-50 млн т CO₂ в год, из которых примерно в 75 % случаев CO₂ закачивается в пласты для повышения нефтеотдачи (CO₂-EOR), что позволяет компенсировать хотя бы часть затрат на УХУ, и только в 25 % случаев закачивается в геологические хранилища для перманентного хранения (англ. dedicated storage)³⁷⁷. Второй вариант на сегодня является сложным для реализации, так как доходная часть для покрытия даже части затрат, по сути, отсутствует, а существующего уровня государственного регулирования и институциональных условий недостаточно для жизнеспособности таких моделей в большей части стран и регионов мира. Вместе с тем, следует отметить, что в течение последних двух лет значительно ускорилась разработка специализированных геологических хранилищ для размещения CO₂. В целом, можно охарактеризовать эту тенденцию как положительную, так как данный факт указывает на укрепление роли УХУ в общей карте декарбонизации через создание и совершенствование соответствующих институциональных условий в рамках реализации политики низкоуглеродного развития, так как потенциал использования углекислого газа ограничен.

³⁷⁵ Углеродно-нейтральные энергоемкие отрасли промышленности. Технологический обзор // UNECE. – 2023. – 24 p. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_RU_draft_1.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

³⁷⁶ CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market // IEA. – 2023. – 121 p. – URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).

³⁷⁷ Там же.

Тенденция постепенного перехода от хранения через решения CO₂-EOR к геологическому хранению CO₂ является признаком усиления на всех уровнях действий по достижению углеродной нейтральности. Если первоначально стимулом к хранению углекислого газа через CO₂-EOR выступали возможные коммерческие выгоды, и ряд инструментов государственной политики был направлен именно на стимулирование спроса на CO₂ со стороны нефтегазовых компаний (например, рассмотренный ранее “45Q” в США), то сейчас на первый план выходят взятые отдельными странами обязательства по снижению выбросов ПГ, выражающиеся в проводимой государственной политике в этой области. Решения CO₂-EOR как самый доступный способ использования углекислого газа долгое время признавались обязательной частью реализации проектов на коммерческой основе. Однако проекты CO₂-EOR имеют ограниченный потенциал развития в силу территориальной «привязки» проектов к нефтегазовым месторождениям, отсутствием «реального» спроса на CO₂ со стороны нефтегазовых компаний, ограниченными совокупными объёмами закачки газа для повышения нефтеотдачи и пр. Так, из 26-ти проектов на стадии строительства с вводом в эксплуатацию в ближайшие 3-5 лет более 20-ти базируются на геологическом хранении, далее эта тенденция будет только укрепляться³⁷⁸. Эксперты прогнозируют, что к 2030 году хранение углекислого газа через CO₂-EOR будет занимать порядка 10 % от общего объема мощностей хранения по миру, тогда как 90 % будет реализовываться через специализированные геологические хранилища³⁷⁹. Это, в свою очередь, приведет к постепенному ослаблению роли нефтегазовых компаний в реализации технологических цепочек УХУ.

Транспортировка углекислого газа

Транспортировка углекислого газа является необходимым этапом для реализации практически всех технологических цепочек УХУ. Как отмечалось,

³⁷⁸ Global Status of CCS 2023 // Global CCS Institute. – 2023. – 97 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf> (дата обращения: 01.05.2023).

³⁷⁹ CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market // IEA. – 2023. – 121 p. – URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).

основным способом транспортировки CO₂ являются трубопроводы, и развитие таких транспортных сетей по миру происходит достаточно активно. Согласно оценкам экспертов, по миру на разных стадиях разработки находится порядка 15 тыс. км трубопроводов для транспортировки CO₂³⁸⁰. Ряд крупных проектов по строительству таких трубопроводов реализуется в США и Европе. Следует отметить, что в США зафиксированы случаи общественного противодействия новым проектам по строительству трубопроводов. Так, проект Heartland Greenway был отменен после отказа в выдаче разрешения на строительство. Европейские проекты по большей части являются трансграничными и нацелены на обеспечение доступа к ресурсам хранения в Северном море.

В целом, взаимодействие с общественностью – отдельная группа вопросов, которая должна быть проработана при реализации таких инициатив. Негативное отношение общественности к проектам УХУ многократно сопровождало их реализацию по миру, и определяются оно в основном следующими опасениями общества³⁸¹:

- наличие риска для здоровья и безопасности вследствие возможного внезапного выброса CO₂;
- потенциальное снижение стоимости имущества и земли в регионе;
- нежелаемая общая «индустриализация» территории;
- изъятие земель сельскохозяйственного назначения и др.

Помимо трубопроводов, начинает развиваться и другой жизнеспособный способ транспортировки CO₂ – судоходство. Развитие данного способа происходит в основном как формирование части транспортной системы, обеспечивающей доступ к морским магистралям для отдельных эмитентов. Таким образом формируются так называемые «открытые» многопользовательские транспортные сети (англ. multi-user transport networks), оказывающие услуги предприятиям-эмитентам и ставшие основой тенденции по отделению проектов

³⁸⁰ Там же.

³⁸¹ Чвилева Т. А., Ильинова А. А. Особенности взаимодействия с заинтересованными лицами при реализации проектов секвестрации углекислого газа // Российский экономический интернет-журнал. – 2018. – №4. – URL: <https://www.e-rej.ru/Articles/2018/Chvileva.pdf> (дата обращения: 01.03.2023).

по улавливанию газа от комплекса работ по транспортировке и хранению. Такие транспортные сети могут поэтапно расширяться, и именно они признаются перспективной моделью реализации части технологических цепочек УХУ в будущем. Основные локации по развитию инфраструктуры для транспортировки CO₂ в рамках такой модели – регион Северного моря, Северная Америка и Азиатско-Тихоокеанский регион³⁸². В случае реализации заявленных планов в ближайшие 10 лет таких проектов будет насчитываться десятки по миру.

В целом, основные модельные преобразования конструкций улавливания и хранения углерода можно резюмировать следующим образом:

1) диверсификация областей применения технологий улавливания, которая выражается в вовлечении все новых отраслей и секторов;

2) смещение фокуса от хранения через CO₂-EOR к специализированному геологическому хранению, определяющее постепенное ослабление роли нефтегазовых компаний в реализации технологических цепочек УХУ;

3) формирование новых моделей реализации УХУ, прежде всего, через создание «открытых» транспортных сетей для независимых эмитентов, определяющее постепенное появление тенденции по отделению проектов улавливания углекислого газа от проектов по и хранению и соответствующий рост спроса на услуги по транспортировке и хранению CO₂ по всему миру.

Модельные преобразования предполагают постепенную трансформацию и переход от конструкций первого поколения к конструкциям второго поколения. К первым можно отнести реализацию УХУ на мощностях по подготовке природного газа, на объектах энергетики, на мощностях по производству водорода и удобрений и других химических производствах. Вторые представлены реализацией УХУ в трудно декарбонизируемых секторах, на объектах биоэнергетики, а также прямым улавливанием CO₂ из атмосферы (DAC) и проектами по транспортировке и хранению газа (CO₂ Transport / Storage).

³⁸² CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market // IEA. – 2023. – 121 p. – URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).

Вместе с тем, развитие технологических цепочек УХУ в разных странах проходит по схожему пути: первые мощности обычно представлены конструкциями УХУ первого поколения и их элементами с ориентацией на улавливание газа на газоперерабатывающих комплексах, объектах энергетики и других уже ставших традиционными для УХУ мощностях, с возможной реализацией решений CO₂-EOR в рамках полной технологической цепочки.

Общая оценка перспектив развития конструкций УХУ в мире и возможностей их применения в России представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оценка перспектив развития в мире и применения в России конструкций УХУ

Конструкция	Применимость и тенденции развития в мире	Применимость в России
Подготовка природного газа	Актуальна к применению в странах и регионах с особыми свойствами природного газа (повышенным содержанием CO ₂). Постепенно доля конструкции в общем объеме мощностей УХУ будет снижаться.	Не актуальна к применению в текущий момент в силу того, что природный газ на российских месторождениях характеризуется, как правило, значительно меньшей концентрацией CO ₂ и его изъятие (улавливание) в больших объемах не требуется.
Производство СПГ	Актуальна к применению в странах и регионах, реализующих СПГ-проекты. Действующие в настоящее время проекты в большей части связаны с геологическим захоронением газа. Развитие конструкции подкрепляется целевыми ориентирами компаний на поставки углеродно-нейтрального СПГ.	Актуальна к применению на крупных мощностях СПГ, таких как: проекты «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ» компании ПАО «НОВАТЭК» на п-ове Ямал, проект «Сахалин-2» компании ООО «Сахалинская Энергия» на о-ве Сахалин, строящийся завод СПГ в порту «Усть-Луга» в Ленинградской области.

Продолжение таблицы 4.2

Конструкция	Применимость и тенденции развития в мире	Применимость в России
Производство азотных удобрений	<p>Конструкция интегрируется в производственный процесс.</p> <p>Зачастую небольшие объемы CO₂, образующиеся в результате промышленного процесса.</p> <p>Постепенно трансформируется в отдельный сектор по производству товарного водорода и аммиака с увеличением доли в общем объеме мощностей УХУ.</p>	<p>Может быть актуальной к применению на крупных заводах по производству азотных удобрений (мощности компаний ПАО «Акрон», АО «МХК «ЕвроХим», ПАО «ФОСАГРО» и др.).</p> <p>Вместе с тем, с учетом того, что деятельность производителей минеральных удобрений в целом не создаёт значительных объемов выбросов ПГ и серьезное давление на отрасль отсутствует, не следует ожидать активного развития мощностей УХУ на объектах отрасли в ближайшем будущем.</p>
Производство энергии (уголь)	<p>Актуальна к применению в странах и регионах с высокой долей угля в генерации электроэнергии.</p> <p>Постепенно доля конструкции в общем объеме мощностей УХУ будет увеличиваться за счет внедрения технологий на объектах в странах, сохраняющих ориентацию на уголь как источник энергии.</p>	<p>Актуальна к применению на угольных электростанциях.</p> <p>С учетом высокой доли угля в общем объеме производства электроэнергии в России и ограниченности набора опций декарбонизации угольных электростанций можно предположить, что данные конструкции будут одними из первых в России.</p>
Производство синтетического природного газа	<p>Действующие мощности сосредоточены в Китае.</p> <p>Актуальна к применению в странах и регионах с низкой степенью обеспеченности углеводородным сырьём.</p> <p>Требует высокого уровня развития технологий.</p> <p>Тенденция к развитию химических кластеров на базе данной конструкции.</p>	<p>Не актуальна к применению в текущий момент в силу высокой степени обеспеченности запасами природного газа.</p>
Химическое производство	<p>Актуальна к применению в странах и регионах с высоким уровнем развития химических технологий.</p> <p>Может реализовываться через создание кластеров.</p>	<p>Может быть актуальной к применению, однако требует соответствующего уровня развития технологий и серьезного давления на участвующие в процессах отрасли для активизации данного направления.</p> <p>Элементы конструкции могут развиваться на нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах.</p>

Продолжение таблицы 4.2

Конструкция	Применимость и тенденции развития в мире	Применимость в России
Производство чугуна и стали	Реализуются в трудно декарбонизируемых отраслях. Актуальны к применению в странах и регионах, где происходит переход от конструкций первого поколения к конструкциям второго. Постепенно доли конструкций в общем объеме мощностей УХУ будут увеличиваться.	Может быть актуальной к применению, однако с учетом сложностей адаптации мощностей УХУ, вероятно, не будут первыми мощностями-адаптерами УХУ, а будут реализованы позже как конструкции второго поколения.
Производство цемента		
Биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода	Мощности сосредоточены в США. Актуальны к применению в странах и регионах с высокой степенью обеспеченности земельными и водными ресурсами, удобрениями.	Может быть актуальной к применению, но в долгосрочной перспективе. Высокая степень обеспеченности традиционными источниками энергии сдерживает развитие данного направления.

Источник: составлено автором.

Таким образом, при моделировании развития технологических цепочек УХУ в России необходимо учитывать особенности выявленных конструкций, основные сопровождающие их развитие тенденции, а также особенности их реализации в российских условиях. Вероятно, развитие УХУ в России будет зарождаться в рамках конструкций первого поколения. Проведённая оценка применимости основных конструкций в России показала, что актуальными и возможными к реализации являются конструкции, ориентированные на интеграцию УХУ на СПГ-производствах, угольных электростанциях, а также нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах. С учетом того, что в России на сегодня функционирует четыре крупных СПГ-завода, масштабирование такой конструкции ограничено. Следует также отметить тенденцию к выстраиванию производственных цепочек с ориентацией на CO₂-EOR в рамках конструкций первого поколения. Данные выводы будут использованы при моделировании технологических цепочек УХУ с их последующей оценкой в следующей главе.

4.3 Стратегические факторы, определяющие развитие УХУ в России

Успешность решения глобальных климатических вопросов будет зависеть от уровня вовлеченности отдельных государств в ее решение. Вместе с тем, переход к низкоуглеродному развитию должен проводиться планомерно, с учетом национальных интересов и особенностей отдельных стран и регионов. Необходимость интеграции низкоуглеродного развития в общую траекторию социально-экономического развития РФ признано на государственном уровне. Это означает, прежде всего, необходимость учета традиционного характера системообразующих отраслей экономики, высокой роли добывающих и обрабатывающих производств в экономике страны, доминирования традиционных энергетических ресурсов и производственных мощностей, имеющегося значительного ресурсного потенциала. В этом контексте одним из важных направлений общей карты декарбонизации промышленности являются технологии, способные предотвращать выбросы ПГ без необходимости кардинального изменения энергетических и промышленных процессов и систем.

Перед промышленным и энергетическим секторами России стоит новая уникальная задача снижения выбросов ПГ без ущерба для их основной деятельности, требующая индивидуальных комплексных решений в каждом конкретном случае. Для России среди различных направлений и технологий, нацеленных на уменьшение выбросов, особое место занимают технологии УХУ. Именно они могут быть внедрены на промышленных и энергетических объектах России без существенной модернизации действующих систем. В условиях доминирующей роли ископаемых видов топлива в экономике и энергетике России, данный аргумент может рассматриваться как критически значимый. УХУ способны «продлить жизнь» традиционным ископаемым видам топлива и промышленным отраслям, а его внедрение может оказаться более перспективным и менее затратным вариантом декарбонизации по сравнению с другими опциями, например ВИЭ. На сегодня УХУ рассматриваются как одни

из ключевых для декарбонизации энергоёмких отраслей промышленности, снижение выбросов в которых на мировом уровне признается приоритетной задачей при движении к углеродной нейтральности³⁸³. Следует отметить, что декарбонизация таких отраслей, как производство цемента, чугуна и стали, химических производств, является технологически сложной задачей, а в некоторых случаях она невозможна. Энергоёмкие отрасли промышленности в основе своих технологических цепочек требуют высоких температур и таких химических процессов, которые при текущем уровне развития технологий наиболее эффективно достигаются при сжигании ископаемого топлива³⁸⁴. Кроме того, выбросы CO₂ также связаны с процессами получения энергии и часто являются побочным продуктом деятельности таких производств.

Также следует отметить, что именно комплекс технологий УХУ лежит в основе развивающейся циркуляционной углеродной экономики, ориентированной на улавливание и использование углекислого газа, а также в основе решений по прямому удалению углерода из атмосферы в будущем для компенсации остаточных выбросов. Однако, как было обозначено ранее, на сегодня в России информация о действующих в промышленных масштабах проектах УХУ отсутствует.

Проведённые к данному шагу исследования позволили вывести следующие тезисы, характеризующие текущее состояние развития УХУ в мире и перспективы развития отрасли в России.

1) В странах и регионах, добившихся определённых успехов в реализации жизнеспособных технологических цепочек УХУ, главными условиями для их развития является комплексная государственная политика, прежде всего, регулирование выбросов и поддержка таких инициатив на всех стадиях. При этом более развиты такие проекты в странах с комплексным подходом к решению данного вопроса. Следует признать факт того, что в России уровень развития

³⁸³ Череповицына А. А., Дорожкина И. П., Костылева В. М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 473–487. – DOI: 10.17073/2072-1633-2022-4-473-487.

³⁸⁴ Углеродно-нейтральные энергоёмкие отрасли промышленности. Технологический обзор // UNECE. – 2023. – 24 p. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_RU_draft_1.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

УХУ и степень их внедрения в промышленности во многом будет зависеть от государства.

2) Текущие капитальные и часть эксплуатационных затрат проектов УХУ настолько высоки, что государственная поддержка в различных формах служит обязательным условием их жизнеспособности. Наиболее успешными все еще остаются проекты с использованием решений CO₂-EOR, так как условие потенциального приращения дохода только от сокращения выбросов, даже при соответствующем государственном регулировании и поддержке, пока рассматривается как недостаточное³⁸⁵. Основной доступный на сегодня финансовый стимул в виде доходов от дополнительной добычи и реализации нефти также будет «работать» только при наличии государственной поддержки компаний-операторов. В этой связи можно заключить, что развитие УХУ в России целесообразно начать с выстраивания технологических цепочек на базе или при участии крупных нефтегазовых компаний с максимально возможной реализацией решений CO₂-EOR и использованием доступных мер государственной поддержки (когда это станет применимо).

3) Текущие финансовые риски технологической цепочки УХУ таковы, что реализация крупномасштабных проектов происходит фазами³⁸⁶, риски, как правило, разделяются между крупными компаниями-участниками, а укрупнение организационных форм реализации с ориентацией на критерии территориальной близости – текущая тенденция в мировом масштабе. Это приводит к выводу о том, что формирование межотраслевых цепочек УХУ в России целесообразно осуществлять в нефтегазоносных регионах при участии крупных компаний-эмитентов ПГ и нефтегазовых компаний с применением элементов кластерного подхода к выстраиванию технологических цепочек.

4) Высокие затраты на УХУ остаются главной причиной их медленного распространения. Серьезным препятствием это является и для условий России,

³⁸⁵ Bechara C. A., Alnouri S. Y. Energy assessment strategies in carbon-constrained industrial clusters // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – Vol. 254. – P. 115204. – DOI: 10.1016/j.enconman.2021.115204.

³⁸⁶ Manioudis M., Angelakis A. Creative Economy and Sustainable Regional Growth: Lessons from the Implementation of Entrepreneurial Discovery. Process at the Regional Level // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 15 (9). – DOI: 10.3390/su15097681.

где углеродное регулирование находится на этапе становления, и экономия на налогах на выбросы не может рассматриваться как потенциальное приращение дохода. В связи с этим, актуальным направлением исследований остается поиск дополнительных способов снижения стоимости таких проектов в России.

5) Активное финансирование инициатив и проектов УХУ на всех стадиях в мире будет постепенно приводить к снижению уровня затрат. В долгосрочной перспективе, когда такие технологии и решения будут масштабироваться, реализация УХУ может привести к повышению устойчивости компаний-участников, модернизации энергетики и промышленности, возникновению новых производств и рабочих мест, дополнительным общественным эффектам и пр., что представляется важным для экономики и общества в целом. Вместе с тем, на сегодня это требует больших вложений как государственных средств, так и частных. Все это характерно и для условий России.

Степень распространённости технологий улавливания и хранения углерода в промышленном и энергетическом секторах в будущем крайне неопределённа. Обозначенный ранее серьезный разрыв между существующими на сегодня и планируемыми в будущем мощностями УХУ подтверждает данное утверждение. Перспективы использования и масштабирования УХУ во всех странах, в том числе и в России, зависят от множества факторов, включая уровень развития (и, как следствие, стоимость) технологий, прежде всего, улавливания, наличие трубопроводных сетей и мощностей для хранения углекислого газа, проводимой на разных уровнях государственной политики, а также от уровня развития других технологий «чистой» энергии, которые могут повлиять на спрос на УХУ.

Вместе с тем, можно обозначить те стратегические факторы, которые определяют будущее развитие УХУ в России (см. рисунок 4.1). При этом можно говорить о зарождении и развитии целой отрасли УХУ как совокупности предприятий, участвующих в реализации всей технологической цепочки³⁸⁷.

³⁸⁷ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181



Рисунок 4.1 – Стратегические факторы, определяющие развитие УХУ в России

Источник: составлено автором.

Стоимость улавливания углекислого газа

Как было определено ранее, стоимость улавливания углекислого газа составляет основную часть стоимости всей технологической цепочки. Снижение затрат на данном этапе является важным фактором внедрения УХУ в будущем и будет напрямую влиять на решения, которые компании будут готовы принимать касательно использования этой технологии или участия в технологической цепочке УХУ. Снижение затрат на улавливание может произойти по двум основным причинам: 1) как результат накопления опыта (эффект обучаемости и накопления опыта); 2) в результате исследований и разработок по поиску более дешёвых способов улавливания.

Самые первые мощности улавливания углекислого газа в России будут самыми дорогими. По мере того как все больше установок будет проектироваться и вводиться в работу, затраты будут снижаться, поскольку опыт первых (в том числе пилотных, демонстрационных) проектов обеспечивает следующие объекты

знаниями о том, как улучшить все процессы – от концепции до вывода мощностей улавливания на полную мощность³⁸⁸.

В целом, в России существует ряд наработок по различным решениям в области улавливания. Так, на уровне НИОКР и в промышленном секторе достаточно хорошо развиты абсорбционные методы разделения CO₂, накоплен опыт в области подслащивания природного газа и переработки аммиачного синтез-газа с использованием алканоламиновых растворителей с уровнем готовности технологии (Technology Readiness Level, TRL) 7-9 и других областях, но многие технологии требуют соответствующей доработки и развития. В России также накоплен опыт в области мембранных технологий улавливания углекислого газа с различными уровнями TRL (3-8), в Объединенном институте высоких температур РАН разрабатываются технологии в области кислородного сжигания топлива (TRL 3-4)³⁸⁹. Вместе с тем, технологии не используются в промышленных масштабах, не масштабированы и энергозатратны. Главная цель с этой точки зрения – совершенствование известных решений и обеспечение их применения в промышленных масштабах, что станет возможным, в том числе, благодаря повышению их энергоэффективности. Для активизации в области УХУ в промышленном секторе России критически необходимо развитие данного направления³⁹⁰.

Транспортная инфраструктура

Очевидно, что транспортная инфраструктура является неотъемлемой частью функционирования всей технологической цепочки, так как связывает источник CO₂ с местами его использования/хранения. Самым вероятным способом транспортировки газа в условиях России является трубопровод. Инвестиции, необходимые для создания сети транспортировки CO₂, согласно мировому опыту, оцениваются в несколько миллиардов долларов для регионального уровня и в несколько сотен миллиардов долларов

³⁸⁸ Там же.

³⁸⁹ Bazhenov S., Chuboksarov V., Maximov A., Zhdaneev O. Technical and economic prospects of CCUS projects in Russia // Sustainable Materials and Technologies. – 2022. – Vol. 33. – P. e00452. – DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00452.

³⁹⁰ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181

для национального³⁹¹. Так как строительство трубопроводов зачастую связано с большим объёмом капитальных затрат, стоимость является ключевым фактором, определяющим объём мощностей, которые будут введены в эксплуатацию в перспективе. При моделировании транспортных сетей в России следует учитывать следующие положения:

1) необходимо фокусироваться на тех регионах, где УХУ потенциально может использоваться чаще всего (масштабироваться) и существует возможность последующего введения в эксплуатацию дополнительных объектов улавливания газа с минимальными затратами;

2) следует оценивать стоимость строительства новых трубопроводных сетей, а не перепрофилирования существующих, так как пригодность существующих для транспортировки углекислого газа все еще ставится под сомнение и изучается во всем мире;

3) проектируемые трубопроводы должны быть сопоставлены по мощности с потенциалом по улавливанию и последующему хранению газа в конкретных локациях, при этом в некоторых исследованиях подтверждается целесообразность создания некоторых избыточных транспортных мощностей, которые со временем будут полностью задействованы, по мере ввода в эксплуатацию дополнительных объектов улавливания газа³⁹².

Перепрофилирование трубопровода для транспортировки CO₂ может значительно снизить общую стоимость всей технологической цепочки УХУ. Чаще всего при использовании существующего трубопровода предполагается изменение направления потока, и его повторное использование возможно тогда, когда первоначальная конструкция трубопровода может поддерживать давление, объём, состав и другие рабочие параметры (с учетом имеющейся степени износа), необходимые для транспортировки углекислого газа. Существующие трубопроводы обычно используются в двух областях – на шельфе, где стоимость

³⁹¹ Carbon Capture and Storage in the United States // Congressional Budget Office. – 2023. – 31 p. –

URL: <https://www.cbo.gov/system/files/2023-12/59345-carboncapture-storage.pdf> (дата обращения: 05.08.2023).

³⁹² Abramson E. Transport Infrastructure for Carbon Capture and Storage. Whitepaper on Regional Infrastructure for Midcentury Decarbonization / E. Abramson, D. McFarlane, J. Brown // Great Plains Institute. – 2020. – 41 p. –

URL: https://www.betterenergy.org/wp-content/uploads/2020/06/GPI_RegionalCO2Whitepaper.pdf (дата обращения: 01.03.2024).

строительства трубопроводов очень высока, и при повторной закачке кислого газа (смесь CO₂ и H₂S закачивается в истощённый газовый резервуар). По общим оценкам экспертов, стоимость строительства трубопровода в России составляет до 1 млн долл./км³⁹³. Проведённые в рамках данной работы исследования показали, что стоимость строительства трубопровода в России может быть конкурентоспособной и составляет порядка 10-50 млн руб./км для разных мощностей и условий³⁹⁴.

Инфраструктура хранения

Инфраструктура хранения, ее доступность и изученность – одна из главных составляющих при реализации технологических цепочек УХУ. По заявлениям экспертов, Россия обладает огромным потенциалом по хранению CO₂, и данный аспект рассматривается как серьёзная благоприятная предпосылка для развития УХУ в стране³⁹⁵.

В России уже сегодня разрабатываются первые нормативно-правовые документы, регламентирующие вопросы хранения углекислого газа. В 2023 г. в России был утвержден проект Методических рекомендаций по обоснованию пригодности участков недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, с целью размещения углекислого газа³⁹⁶. Методические рекомендации устанавливают «единые для Российской Федерации принципы выбора, геологического изучения и обоснования возможности использования участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых, при размещении в пластах горных пород углекислого газа, с учетом природоохранных и других ограничений в соответствии с действующим законодательством».

³⁹³ Bazhenov S., Chubokсарov V., Maximov A., Zhdaneev O. Technical and economic prospects of CCUS projects in Russia // Sustainable Materials and Technologies. – 2022. – Vol. 33. – P. e00452. – DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00452.

³⁹⁴ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181

³⁹⁵ Там же.

³⁹⁶ Методические рекомендации по обоснованию пригодности участков недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, с целью размещения углекислого газа // Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых: официальный сайт. – 2023. – URL: https://gkz-rf.ru/sites/default/files/docs/mr_po_vyboru_uchastkov_so2.pdf?ysclid=ls1vp2p8ea789587638 (дата обращения: 01.03.2024).

В предыдущих разделах были обозначены основные виды хранилищ, которые могут быть использованы для размещения углекислого газа, и примерные затраты на его хранение. Вместе с тем, с практической точки зрения наиболее перспективными и понятными для целей долгосрочного хранения газа являются уже существующие подземные хранилища газа (ПХГ), которые в будущем могут быть перепрофилированы, и выработанные месторождения углеводородов³⁹⁷.

Следует отметить, что оценки касательно пригодных для размещения газа хранилищ по России существенно разнятся, но все они превышают любой вероятный объем CO₂, который может улавливаться в рамках цепочек УХУ в стране, и предполагают значительный объем «свободных» мощностей хранения в будущем при соответствующем уровне их изученности. Наибольший потенциал, по приблизительным оценкам, в рамках проектов CO₂-EOR имеют Приволжский и Центральный федеральные округа, который оценивается в 720 Мт, а также Уральский федеральный округ – порядка 470 Мт. Общая емкость хранилищ CO₂ в российских месторождениях оценивается на уровне 305 Гт CO₂³⁹⁸. По последним, более реалистичным оценкам Госкомиссии по запасам полезных ископаемых, Россия может хранить до 4,6 Гт CO₂. Европейская экономическая комиссия ООН (UNECE) оценивает потенциал для хранения CO₂ на российских нефтяных месторождениях в 56 Гт.

Вместе с тем, для более точной оценки пригодности и емкости потенциальных хранилищ необходимо проведение серьезного комплекса трудоёмких и дорогостоящих работ. Оценки касательно примерной стоимости такого хранения и обеспечения перманентного мониторинга также будут зависеть от степени изученности и наличия соответствующей разноплановой информации по определённым хранилищам. Для развития данного направления необходимы

³⁹⁷ Новиков Д. А., Дульцев Ф. Ф., Юрчик И. И., Садыкова Я. В., Деркачев А. С., Черных А. В., Максимова А. А. Региональный прогноз перспектив реализации проектов CCUS на территории Российской Федерации / Материалы XVIII международной научной конференции Интерэкспо ГЕО-Сибирь – «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология», 18-20 мая 2022 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГУГиТ, 2022. – Т. 2. – №. 1 – С. 248-255.

³⁹⁸ Cherepovitsyn A., Fedoseev S., Tsvetkov P., Sidorova K., Kraslawski A. Potential of Russian Regions to Implement CO₂-Enhanced Oil Recovery // *Energies*. – 2018. – Vol. 11 (6). – P. 1528. – DOI: 10.3390/en11061528.

специальные государственные программы. Глубокому изучению должны подвергаться как потенциальные хранилища, так и сам процесс секвестрации больших объемов углекислого газа под землей с последующей оценкой его безопасности и стоимости³⁹⁹.

Государственное регулирование

Как было отмечено ранее, государственное регулирование является базовым условием для развития УХУ, что подтверждается мировым опытом. В перспективе все будет зависеть от того, насколько направление УХУ будет признано на государственном уровне, какие решения на данном уровне будут приняты. Все это может достаточно серьезно сдерживать или ускорять развитие комплекса технологий.

Также необходимо отметить, что законодательная база для инициатив и проектов УХУ в мире не сформирована, а в России она находится на самых начальных этапах развития. В этой связи, как в мире, так и в России планирование и реализация УХУ может столкнуться с множеством неопределённостей и спорных моментов, в том числе с юридической точки зрения. Особое внимание в данном контексте должно быть уделено вопросам безопасной транспортировки и долгосрочного хранения CO₂ под землей.

На развитие УХУ в будущем также могут влиять и другие факторы. Например, альтернативные технологии декарбонизации (низкоуглеродные источники энергии, прорывные решения в области повышения энергоэффективности, прочее) могут «затормозить» их развитию, но для условий России данный сценарий рассматривается автором как маловероятный. С другой стороны, если будет активизирована деятельность в области изучения геологических хранилищ и их соответствующей сертификации, будут развиваться известные и открываться все новые способы улавливания и полезного использования углекислого газа, степень развития и внедрения УХУ в реальном секторе экономики России может быть значительной. В качестве примера можно

³⁹⁹ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181

привести возможности использования уловленного углекислого газа для производства строительных материалов – в частности, его использование в качестве отвердителя для бетона. Данный пример может рассматриваться как альтернативный способ секвестрирования (не геологического) – хранение CO₂ в отвердевшей массе. Этот тип секвестрации и другие способы использования углекислого газа при соответствующем развитии технологических решений будут связаны с возможностью получения дополнительного дохода, способного компенсировать часть затрат на УХУ⁴⁰⁰.

4.4 Концептуальное представление развития УХУ в условиях России

Существует множество причин отсутствия как пилотных, так и коммерческих проектов УХУ в России. На сегодня известно лишь об одном проекте на ранних этапах разработки – Ямал СПГ CCS компании ПАО «НОВАТЭК». Вместе с тем, этот комплекс технологий вызывает интерес как со стороны промышленного сектора, так и на государственном уровне. Известно об опыте реализации на территории России пилотных проектов УХУ на нефтегазовых месторождениях, где CO₂ использовался для увеличения нефтеотдачи пластов⁴⁰¹. Ряд российских нефтегазовых компаний рассматривает возможность использования подземных хранилищ и собственных выработанных месторождений для проектов УХУ – например, упомянутое касательно этого вопроса ранее ПАО НК «Роснефть». Как отмечалось, Россия обладает серьезным потенциалом для реализации УХУ с организационно-экономической точки зрения⁴⁰².

Россия является одним из крупнейших мировых эмитентов ПГ, с долей порядка 4 % от суммарных выбросов, что обуславливает повышенное внимание

⁴⁰⁰ Там же.

⁴⁰¹ Сидорова К. И. Разработка технико-экономической модели улавливания CO₂ для энергетического сектора // Экология и промышленность России. – 2014. – № 12. – С. 20-25. – DOI: 10.18412/1816-0395-2014-12-20-25.

⁴⁰² Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181

к стране на глобальном уровне. Так, в 2020-2021 гг. суммарные выбросы ПГ в России составили около 2,1-2,2 млрд т CO₂-экв., из которых около 75-80 % – углекислый газ⁴⁰³. Уровень компенсации выбросов за счет землепользования и лесного хозяйства оценивается в России примерно на уровне трети от суммарных выбросов ПГ. Это определяет высокую степень заинтересованности в различных решениях на уровне страны и отдельных промышленных компаний по снижению выбросов ПГ, в том числе посредством улавливания углекислого газа с его последующим захоронением или использованием⁴⁰⁴.

На рисунке 4.2 представлена динамика выбросов ПГ в России и в мире в 2017-2021 гг.

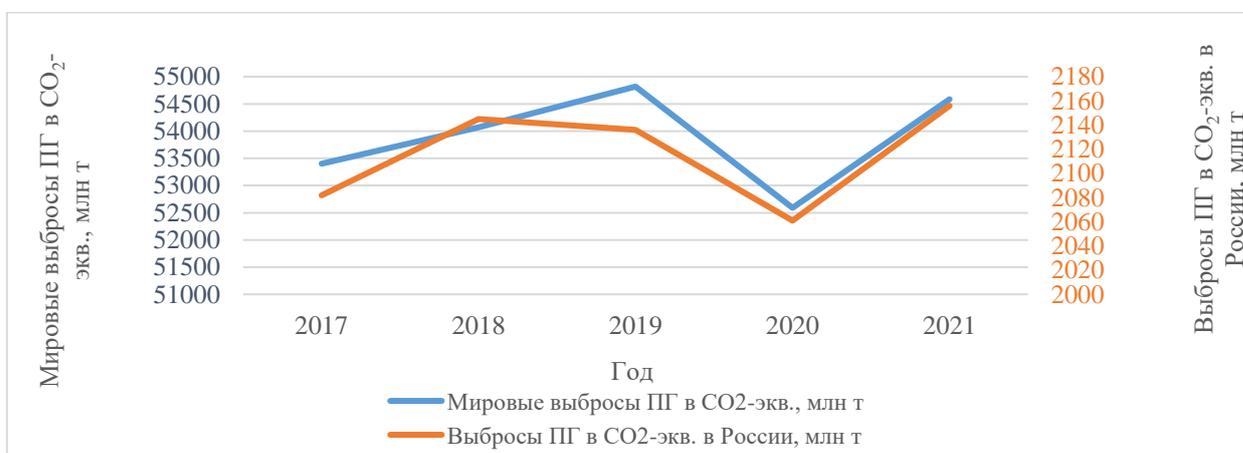


Рисунок 4.2 – Динамика выбросов ПГ за 2017-2021 гг. (мир и Россия)

Источник: составлено автором, данные с:

Greenhouse gas emissions // Our World in Date. – 2020. – URL:

<https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions> (дата обращения: 05.04.2023);

Greenhouse Gas Inventory Data. GHG Profiles. Annex 1 // United Nations. Climate Change. – 2022. –

URL: https://di.unfccc.int/ghg_profile_annex1?_gl=1*1ww4b6z*_ga*NzI1MDEzODk5LjE2OTc4MTMzMtA.*_ga_7ZZWT14N79*MTY5NzgxMzM1NC4xLjEuMTY5NzgxMzQ2MS4wLjAuMA (дата обращения: 05.04.2023).

Наибольшая доля выбросов в России приходится на энергетический сектор, включая сжигание топлива, технологические выбросы от добычи твердых топлив

⁴⁰³ Охрана окружающей среды в России: статистический сборник / редкол.: И. В. Васильев. – М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2022. – 115 с. –

URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ochрана_okruj_sredi_2022.pdf (дата обращения: 27.03.2023).

⁴⁰⁴ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.

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. (см. рисунок 4.3).

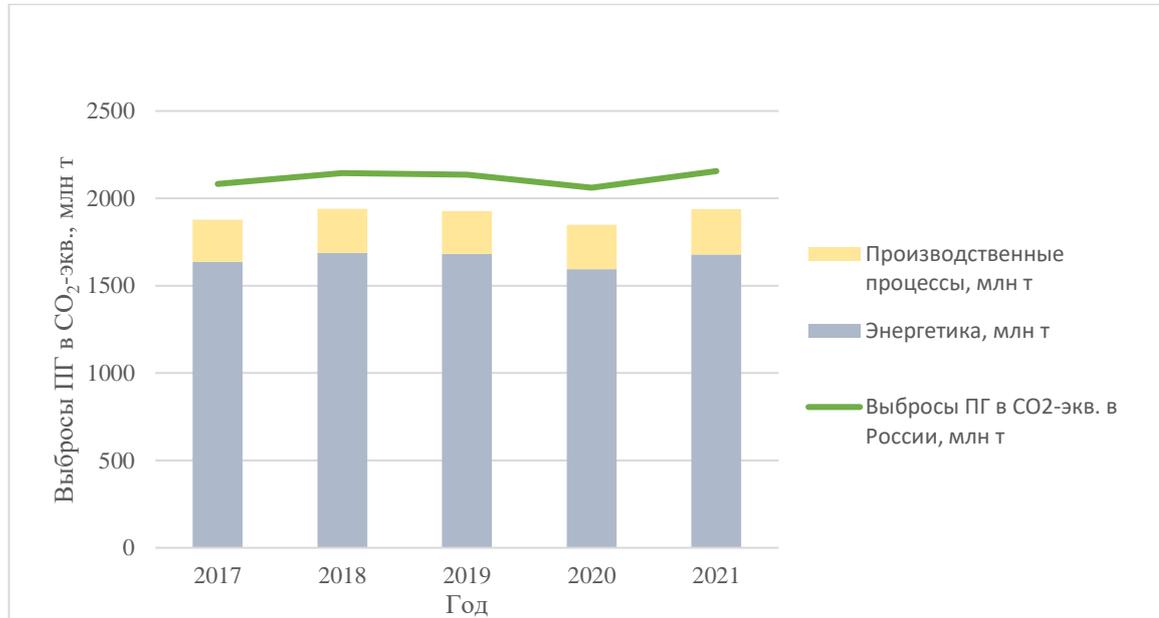


Рисунок 4.3 – Структура выбросов ПГ в России за 2017-2021 гг.

Источник: составлено автором, данные с:

Greenhouse gas emissions // Our World in Date. – 2020. – URL:

<https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions> (дата обращения: 05.04.2023);

Greenhouse Gas Inventory Data. GHG Profiles. Annex 1 // United Nations. Climate Change. – 2022. –

URL: https://di.unfccc.int/ghg_profile_annex1?_gl=1*1ww4b6z*_ga*NzI1MDEzODk5LjE2OTc4MTMzMtA.*_ga_7ZZWT14N79*MTY5NzgxMzM1NC4xLjEuMTY5NzgxMzQ2MS4wLjAuMA (дата обращения: 05.04.2023).

Так, уровень суммарных антропогенных выбросов ПГ в России в 2021 г. был примерно равен уровню совокупных выбросов всех стран Европы⁴⁰⁵. Тем не менее, за последние годы выбросы ПГ в России растут (за исключением периода пандемии), и эта проблема требует решения.

Наибольшая концентрация промышленных объектов-эмитентов ПГ характерна для территорий Уральского, Центрального, Приволжского

⁴⁰⁵ Global Energy Review 2021. Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021 // IEA. – 2021. – 32 p. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0031107-401d-4a2f-a48b-9eed19457335/GlobalEnergyReview2021.pdf> (дата обращения: 10.10.2023).

федеральных округов. Перечисленные регионы могут рассматриваться как потенциальные кластеры улавливания углекислого газа⁴⁰⁶.

По различным оценкам, представленным в работе ранее, теоретическая емкость российских хранилищ углекислого газа значительно превышает потенциал остальных стран. Инфраструктура хранения, ее доступность и изученность – одна из главных составляющих при реализации технологий УХУ. Это является еще одним благоприятным фактором стратегического характера для реализации УХУ в России. Ряд отечественных исследований посвящен оценке возможностей захоронения и использования CO₂ в России. По мнению российских ученых, Россия, наравне с США, Канадой, Ближним Востоком и Северной Африкой, обладает значительным потенциалом для захоронения CO₂, а потенциально большие резервуары могут располагаться в крупнейших нефтегазовых провинциях, в частности Волго-Уральской, Западно-Сибирской и Северо-Кавказской^{407,408}. По последним оценкам Госкомиссии по запасам полезных ископаемых, Россия может хранить до 4,6 Гт CO₂. Вместе с тем, данный вопрос требует основательного комплексного подхода к его развитию и решению – вопросы безопасного хранения CO₂ под землей требуют выделения данного направления в отдельный вектор государственной политики низкоуглеродного развития⁴⁰⁹. Трудоемкость и высокие затраты по данному направлению требуют создания особых организационно-экономических механизмов, позволяющих создавать пригодные для хранения CO₂ мощности и постепенно вводить их в эксплуатацию.

На сегодня, по оценке Госкомиссии по запасам полезных ископаемых, срок от начальных этапов (скрининг потенциальных участков недр) до получения

⁴⁰⁶ 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.

⁴⁰⁷ 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. – DOI: 10.17353/2070-5379/47_2013.

⁴⁰⁸ 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.

⁴⁰⁹ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181.

разрешения на закачку и запуска проекта в рамках его жизненного цикла составляет примерно 3-5 лет без стадии опытно-промышленной эксплуатации (ОПЭ) и 6-8 лет с ОПЭ⁴¹⁰.

Россия обладает одной из самых развитых газотранспортных систем в мире, и возможность ее использования при реализации УХУ также потенциально является предпосылкой для реализации таких инициатив. Развитая нефтегазовая отрасль определяет пул накопленных компетенций по обращению с углекислым газом на этапах транспортировки, использования (EOR) и хранения, а также потенциальный спрос на CO₂ со стороны нефтегазовых компаний, а значительные запасы и доминирующая роль ископаемого топлива, традиционный характер энергетических и промышленных отраслей повышает степень заинтересованности именно в опциях УХУ как решениях, работающих с предотвращением уже образовавшихся выбросов без существенных изменений существующих процессов.

В таблице 4.3 обобщена оценка базовых организационно-экономических условий развития инициатив и проектов УХУ в России.

Вместе с тем, таких базовых предпосылок недостаточно для развития и масштабирования технологий в условиях России. Развитие капиталоемких проектов УХУ требует особых условий и среды для того, чтобы быть экономически жизнеспособными⁴¹¹. Ключевые характеристики потенциальных проектов – межотраслевых комплексов УХУ в России представлены в таблице 4.4.

⁴¹⁰ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181.

⁴¹¹ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.

Таблица 4.3 – Оценка базовых условий для развития УХУ в России

Параметр	Значение	Направление развития
Существенные объемы выбросов ПГ (2,1-2,2 млрд т CO ₂ -экв. на 2020-2021 гг., из них энергетический сектор – 78 %, промышленность – 12 %)	Определяют высокую степень заинтересованности в решениях по сокращению / предотвращению выбросов ПГ, в том числе в части УХУ.	Необходимо создание национальной базы крупных эмитентов CO ₂ с соответствующей классификацией источников выбросов по категориям, а также совершенствование механизмов инвентаризации объемов выбросов ПГ в субъектах РФ.
Большие объёмы доступных для размещения CO ₂ хранилищ (по последним оценкам Госкомиссии по запасам полезных ископаемых, до 4,6 Гт CO ₂)	Определяют благоприятные потенциальные условия для реализации УХУ с точки зрения обеспечения долгосрочного хранения углекислого газа под землей.	Необходимо проведение комплекса масштабных, дорогостоящих работ по изучению потенциальных хранилищ, а также создание национальной базы месторождений на поздних стадиях / истощённых, подходящих для долгосрочного хранения CO ₂ .
Традиционный характер энергетических и промышленных мощностей	Определяет высокую степень заинтересованности в решениях по снижению выбросов ПГ, доступных для внедрения без ущерба для их основной деятельности.	Необходимо создание площадок для диалога между эмитентами, потребителями CO ₂ , поставщиками услуг, а также разработка организационно-экономических механизмов для интеграции УХУ в действующие и новые добывающие и перерабатывающие производства, энергетические объекты и выстраивание межотраслевых взаимодействий в реальном секторе экономики.
Доминирующая роль ископаемых видов топлива в экономике	Определяет высокую степень заинтересованности в решениях по снижению выбросов ПГ, позволяющих «продлить жизнь» традиционным источникам энергии.	Необходимо выстраивание технологических цепочек УХУ при участии / на базе нефтегазовых компаний и производств с развитием и совершенствованием форм реализации технологической цепочки и договорных отношений.
Развитая нефтегазовая отрасль	Определяет пул накопленных компетенций по обращению с углекислым газом на этапах транспортировки, использования (CO ₂ -EOR) и хранения, а также потенциальный спрос на CO ₂ со стороны нефтегазовых компаний и доступ к необходимой инфраструктуре.	Необходимо выстраивание технологических цепочек УХУ при участии / на базе нефтегазовых компаний и производств с развитием и совершенствованием форм реализации технологической цепочки и договорных отношений.

Источник: Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81).– С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181.

Таблица 4.4 – Ключевые характеристики проектов – межотраслевых комплексов УХУ

Параметр	Характеристика	Значение
Общая характеристика проектов	Масштабные инфраструктурные проекты, «жёстко» привязанные к источникам выбросов и местам хранения/использования CO ₂ .	Определяет высокие капитальные затраты, особый подход к выбору локации для реализации и выстраивания всей технологической цепочки, а также необходимость участия компаний различных отраслей.
Ключевые потенциальные проекты в России	Ямал СПГ CCS ПАО «НОВАТЭК» – единственный зарегистрированный в базе Глобального института CCS проект на ранних этапах разработки. О планах по УХУ заявил ряд крупных нефтегазовых компаний.	Определяет начальную степень развития УХУ в России, а также потенциальный интерес со стороны промышленного сектора. Для активизации развития требуется соответствующая государственная политика.
Условия экономической жизнеспособности проектов	Государственное регулирование, участие крупных промышленных компаний, реализация CO ₂ -EOR, управление факторами потенциала сокращения затрат.	Определяет ведущую роль регулятора для обеспечения жизнеспособности таких проектов, а также критическую важность участия крупных промышленных компаний и максимального использования потенциала сокращения затрат по этапам технологической цепочки.
Модели и локации для реализации	Межотраслевые комплексы с элементами кластерного подхода с реализацией в развитых промышленных и нефтегазоносных регионах.	Определяет важную роль планирования и обоснования наиболее целесообразных вариантов реализации технологической цепочки, а также необходимость выстраивания межотраслевых связей, участия нефтегазовых компаний.

Источник: составлено автором.

При этом стоит заметить, что потенциальная отрасль УХУ будет состоять из проектов – межотраслевых комплексов УХУ, которые, в свою очередь, будут состоять из участвующих в работе технологических цепочек таких комплексов предприятий. Это несколько противоречит классическому пониманию отрасли и является особенностью реализации данного комплекса технологий. Концептуальное видение развития потенциальной отрасли УХУ в России представлено в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Концептуальное видение развития потенциальной отрасли УХУ

Параметр	Характеристика	Значение
Стадия жизненного цикла	Зарождение (начальный этап концептуализация)	Определяет медленный рост (в России пока практически отсутствует), высокие затраты и риски.
Стратегические факторы, определяющие будущее развитие отрасли	Стоимость улавливания Транспортная инфраструктура Инфраструктура хранения Государственное регулирование	Развитие по данным направлениям определяет будущий уровень «развёртывания» УХУ в России, но, в свою очередь, требует особых мер государственной поддержки.
Потенциальные драйверы развития отрасли	Ужесточение государственного регулирования в части выбросов ПГ, значительная прямая государственная поддержка УХУ, новые способы улавливания и полезного использования CO ₂ .	Определяет ведущую роль регулятора для интенсификации развития таких инициатив, а также необходимость стимулирования поисков новых способов улавливания и использования CO ₂ .
Потенциальные сдерживающие факторы развития отрасли	Развитие других альтернативных способов декарбонизации / достижения углеродной нейтральности. Заменители ископаемого топлива	Данный сценарий рассматривается автором как маловероятный.
Барьеры входа в отрасль	Высокие барьеры входа в отрасль	Определяют необходимость консолидации значительных финансовых ресурсов и участия ряда крупных компаний для разделения затрат и рисков.
Потенциал улавливания	До 1,1 Гт CO ₂ в год на предприятиях электрогенерации и промышленности (VYGON Consulting, 2021).	Потенциальные мощности улавливания примерно сопоставимы с половиной текущих выбросов в России. Необходимы проведение серьёзного комплекса НИОКР по технологиям улавливания и разработка специальных государственных программ развития этого направления.
Потенциал захоронения	До 4,6 Гт CO ₂ (Госкомиссия по запасам полезных ископаемых, 2023).	Потенциальные мощности хранения превышают любой вероятный объем CO ₂ , который может улавливаться в рамках цепочек УХУ в России. Необходимы проведение серьёзного комплекса трудоёмких и дорогостоящих работ по изучению хранилищ и разработка специальных государственных программ развития этого направления.

Продолжение таблицы 4.5

Параметр	Характеристика	Значение
Транспортная инфраструктура	Система трубопроводов, новые мощности в совокупности с частичным перепрофилированием существующей инфраструктуры	Стоимость строительства трубопровода в России может быть конкурентоспособной и составляет порядка 10-50 млн руб./км для разных мощностей и условий.
Потенциальные участники отрасли (технологических цепочек УХУ)	Нефтегазовые компании Промышленные компании – крупные эмитенты ПГ Объекты энергетической системы Нефтегазотранспортные компании	Определяет высокую степень интеграции инициатив УХУ в реальный сектор экономики России, потенциальное разделение затрат и рисков.
Узкие места для масштабирования технологий и развития отрасли	Технологии улавливания Высокая стоимость улавливания и всей технологической цепи Организационно-экономические основы формирования цепочек Отсутствие государственного регулирования	Определяет необходимость разработки и внедрения ряда регуляторных мер, направленных на совершенствование технологических, организационных и экономических аспектов развития проектов.
Организационно-экономические механизмы снижения затрат	Эффект обучаемости и накопления опыта Эффект масштаба	Определяет необходимость накопления опыта и его передачи при «развертывании» технологических цепочек в России.

Источник: составлено автором.

Как отмечалось, в России уже сегодня предпринимаются попытки разработки нормативно-правовой базы, «закрепляются» идеи развития элементов системы торговли углеродными единицами. Признание необходимости декарбонизации на уровне промышленных, в том числе нефтегазовых, компаний может трактоваться как фундаментальное переформатирование ценностей, и уже сегодня это можно наблюдать в России. Однако точечные механизмы развития и инструменты поддержки УХУ отсутствуют. В России с учетом опыта других стран необходимо применять комплексный подход к выстраиванию всей системы. Как уже отмечено, применение общих и специфических механизмов, таких как налоговые льготы, кредиты, субсидии, грантовые программы, с одновременным усилением нормативно-правовой базы, применением элементов «жесткого» регулирования, стимулированием развития углеродного рынка является наиболее эффективным решением. Реализация таких мер может осуществляться как

на национальном, так и региональном уровне, согласно примерам США и Канады, которые добились значительного прогресса в развитии УХУ⁴¹². В России, в рамках актуализации информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям, устанавливаются так называемые индикативные показатели выбросов ПГ (бенчмарки)⁴¹³. Особенность подхода состоит в том, что показатели устанавливаются на двух уровнях: верхнем – для применения «жестких» мер и нижнем, более прогрессивном – для стимулирования сокращения выбросов CO₂. Нижние уровни отраслевых показателей выбросов ПГ уже используются как критерии экспертной оценки «зеленых» проектов⁴¹⁴.

В России уже сегодня вводятся элементы «жесткого» регулирования на Сахалине. Однако опыт Китая показывает, что функционирование систем квотирования выбросов без точечных механизмов поддержки УХУ – например, таких, как мера “45Q” в США – не приводит к желаемому уровню и темпу их развития. Более подробно это будет исследовано и доказано и на примере России в следующей главе. В этом плане опыт других стран с системами торговли выбросами, в особенности опыт Великобритании и Нидерландов, реализующих также ряд специфических программ и инструментов, является более успешным. Показателен также опыт Норвегии и Канады, стран с большими запасами и высоким уровнем добычи нефти. Высокие цены на углерод, устанавливаемые в рамках национальных систем налогообложения, позволяют перенаправлять финансовые потоки на поддержку УХУ и других низкоуглеродных технологий. Следует признать, что закрепление положений о ценообразовании на углерод на законодательном уровне может способствовать коммерциализации технологий УХУ, но цены должны быть высокими, что для условий России в текущих реалиях не представляется возможным.

⁴¹² Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.

⁴¹³ Доброхотова М. В., Матушанский А. В. Применение концепции наилучших доступных технологий в целях технологической трансформации промышленности в условиях энергетического перехода // Экономика устойчивого развития. – 2022. – № 2 (50). – С. 63–68.

⁴¹⁴ Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зелёного) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе зелёного) развития в Российской Федерации: Постановление Правительства Российской Федерации от 21.09.2021 г. № 1587 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 04.10.2021 г.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

В рамках работы было выявлено, что в мировой практике сложился ряд конструкций реализации технологических цепочек УХУ, которые формируются под воздействием таких факторов, как источник CO_2 , особенности промышленных и энергетических процессов, развитие новых технологий и бизнес-моделей, а также рост возможностей по утилизации и захоронению углекислого газа. При этом развитие и масштабирование УХУ в глобальном масштабе связано с рядом модельных преобразований, которые выражаются в постепенной диверсификации областей применения технологий улавливания углекислого газа, характеризуются тенденцией к планомерному переходу от хранения углекислого газа в нефтяных месторождениях (CO_2 -EOR) к хранению в специализированных геологических хранилищах, появлением новых и совершенствованием действующих моделей реализации решений и ведения бизнеса по обращению с углекислым газом. Обозначенные модельные преобразования приводят к постепенной трансформации и переходу от конструкций первого поколения к конструкциям второго поколения. При этом развитие УХУ в рамках одной страны обычно происходит по такому же сценарию. Первые мощности представлены, как правило, конструкциями первого поколения или их элементами. Затем, по аналогии с глобальным масштабом, происходит ряд модельных преобразований и переход к конструкциям второго поколения. Такие базовые выводы могут быть использованы при моделировании развития УХУ в условиях России. Проведённая оценка применимости основных конструкций к условиям России показала, что актуальными и возможными к реализации являются конструкции, ориентированные на интеграцию УХУ на объектах энергетики, а именно на угольных электростанциях, а также в нефтегазовом комплексе – на месторождениях в виде опции CO_2 -EOR и нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах как источниках выбросов.

Перспективы развития и масштабирования УХУ как в мире, так и в России являются крайне неопределёнными. Они зависят от множества факторов, включая

уровень развития технологий, наличие мощностей для хранения углекислого газа, проводимой на разных уровнях государственной политики, а также от степени интеграции различных стран в решение климатических задач, развития других низкоуглеродных технологий. В рамках общей оценки перспектив развития УХУ в России можно обозначить четыре группы стратегических факторов, которые определяют их будущее развитие, – это стоимость улавливания углекислого газа, уровень развития транспортной инфраструктуры и инфраструктуры хранения, государственная политика в данной области. Все эти факторы, в конечном счёте, будут определять перспективы реализации цепочек улавливания и хранения углерода в промышленном секторе России. Очевидно, что факторы являются зависимыми: например, государственная политика в данной области будет существенно влиять на все остальные группы.

Россия обладает рядом благоприятных предпосылок для внедрения УХУ в промышленности. России необходимо внедрять накопленный опыт других стран в области развития и масштабирования УХУ с учетом национальных интересов и приоритетов. «Развертывание» технологических цепочек УХУ целесообразно осуществлять на территориях, приближенных к крупным промышленным объектам, а также вблизи развитой инфраструктуры. На начальных этапах развития УХУ в России следует ориентироваться на возможности реализации CO₂-EOR. Россия обладает одной из самых развитых газотранспортных систем, и возможность ее частичного использования при реализации УХУ также потенциально является организационно-экономической предпосылкой для реализации таких инициатив.

При подготовке данной главы диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования (1-6), а также иные публикации (7):

1. Череповицына А. А. Снижение выбросов парниковых газов: от глобального контекста к стоимостной оценке улавливания углекислого газа в

Арктике // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2025. – № 2. – С. 148–163. – DOI: 10.37614/2220-802X.2.2025.88.010.

2. Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181.

3. Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – Т. 1. – №. 57. – С. 169-174.

4. Череповицына А. А., Череповицын А. Е., Кузнецова Е. А. Проекты улавливания, хранения и использования CO₂ и их экономическая целесообразность // ЭКО. – 2024. – Т. 54. – № 1. – С. 117-131. – DOI: 10.30680/ESCO0131-7652-2024-1-117-131.

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. – DOI: 10.3390/en16083575.

6. Череповицына А. А., Дорожкина И. П., Костылева В. М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 473–487. – DOI: 10.17073/2072-1633-2022-4-473-487.

7. Череповицына А. А. Улавливание и использование углекислого газа: экономика проектов в условиях России // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия «Экономика». – 2025. – Т. 1. – № 51. – С. 40–48. – DOI: 10.17122/2541-8904-2025-1-51-40-48.

ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ УХУ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В РОССИИ

5.1 Оценка затрат на внедрение технологии улавливания углекислого газа на угольной ТЭЦ (на примере Апатитской ТЭЦ в Мурманской области)

Климатический вопрос в настоящее время стоит достаточно остро во всём мире, но наиболее уязвимым, согласно общепринятому мнению экспертов, представляется Арктический регион. По данным наблюдений Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, темпы роста среднегодовой температуры воздуха на территории России за последние 50 лет примерно в 2,8 раза превышают темпы роста такой температуры в глобальном масштабе: средний рост на $0,51^{\circ}\text{C}$ за 10 лет в России против $0,18^{\circ}\text{C}$ за 10 лет по миру. При этом такой показатель для Арктической зоны РФ (АЗРФ) почти в 4 раза превышает темпы роста средней глобальной температуры – $0,71^{\circ}\text{C}$ за 10 лет⁴¹⁵.

Так, регионы Арктики наиболее чувствительны к глобальному потеплению, а климатические изменения на этих территориях часто рассматривают как индикатор происходящих процессов. С одной стороны, глобальное потепление ускоряет таяние арктических льдов и удлиняет время, доступное для движения по Северному морскому пути, что способствует расширению экономических возможностей для российской Арктики. К потенциальным «плюсам» такого процесса также можно отнести смягчение климата, что обеспечит более благоприятные условия для промышленной деятельности, улучшение условий

⁴¹⁵ Об утверждении рекомендаций «круглого стола» Комитета Государственной Думы по энергетике на тему «Роль топливно-энергетического комплекса в реализации новой климатической политики Российской Федерации. Наилучшие корпоративные практики»: Решение Комитета Государственной Думы по энергетике от 21 февраля 2024 г. № 325-5/101 // Комитет Государственной Думы по энергетике: официальный сайт. – URL: <http://komitet-energo.duma.gov.ru/storage/f11e63e3-91e7-42ea-bb26-8bb1c3bfc7ec/documents/342a33fa-0e19-4753-8dab-3194ba5ce81d/f0be6d74-2582-4feb-a84c-436e67cddf7a.pdf> (дата обращения: 20.03.2024).

для сельского хозяйства на северных территориях и ряд других⁴¹⁶. Вместе с тем, «разбалансировка» климата приведёт к серьёзным проблемам, в том числе к высвобождению огромных объёмов метана (еще более вредного ПГ, чем CO₂), а также возможному повреждению уже существующей промышленной инфраструктуры в результате таяния вечной мерзлоты.

Экономическое развитие АЗРФ осуществляется преимущественно за счет промышленного производства⁴¹⁷, объекты которого являются крупными источниками выбросов ПГ. С учетом сложившейся экономической структуры региона декарбонизацию промышленности на этих территориях следует осуществлять с ориентацией на доступные решения, которые могут быть интегрированы в технологические процессы традиционных действующих и новых энергетических и производственных мощностей.

Энергетические объекты по всему миру в совокупности являются крупнейшими стационарными источниками выбросов ПГ⁴¹⁸, а теплоэлектростанции, работающие на угле, ответственны примерно за 40-45 % от общей массы выбросов, связанных с энергетикой⁴¹⁹. Учитывая ведущую роль ископаемого топлива для получения энергии, традиционный характер всей энергетической системы и необходимость обеспечения разумной, плавной декарбонизации с фокусом на национальные интересы, наиболее вероятным сценарием для многих стран, включая Россию, остаётся вариант ориентации на традиционные источники энергии и применение решений по снижению выбросов ПГ, способных «работать» без существенной перестройки существующей системы, в частности решений УХУ. На угольные электростанции приходится порядка 14 % от общего объёма производства электроэнергии

⁴¹⁶ Никоноров С. М. Специфика современных социально-экономических процессов и экологических проблем регионов АЗРФ // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. – 2023. – № 4 (75). – С. 20–25. – DOI: 10.52897/2411-4588-2023-4-20-25.

⁴¹⁷ Скуфына Т.П., Баранов С.В., Самарина В.П. Анализ документов прогнозирования социально-экономического развития российской Арктики // Арктика и Север. – 2022. – № 48. – С. 57–74. – DOI: 10.37482/issn2221-2698.2022.48.57.

⁴¹⁸ IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC. – 2005. – 442 p. – URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf (дата обращения: 06.04.2023).

⁴¹⁹ Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021. Global emissions rebound sharply to highest ever level // IEA. – 2021. – 14 p. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf> (дата обращения: 03.07.2022).

в России⁴²⁰, и зачастую такие мощности являются единственным источником электроэнергии в отдалённых регионах, в частности арктических. Интеграция опций УХУ в данном случае может быть единственным вариантом для снижения выбросов ПГ на таких объектах⁴²¹. Вышесказанное подтверждается и мировым опытом: объекты энергетики являются одними из наиболее перспективных, но дорогих мощностей-адаптеров УХУ, а при переходе от конструкций первого поколения к конструкциям второго их доля будет существенно увеличена. В то время как другие промышленные отрасли имеют потенциал использования иных опций декарбонизации, отдельные действующие электростанции на ископаемом топливе не обладают подобной гибкостью ввиду зрелости и сложности изменения технологических процессов, традиционного характера выпускаемой продукции и критической необходимости обеспечения ее стабильных поставок.

Несмотря на аргументы в пользу внедрения решений УХУ на угольных электростанциях, экономическая жизнеспособность подобных проектов находится под серьёзным сомнением. Для оценки уровня таких затрат при интеграции мощностей улавливания углекислого газа на действующей теплоэлектростанции (ТЭЦ) автором была проведена соответствующая работа по моделированию ситуации, сбору необходимых данных и расчету затрат при внедрении технологии на действующей угольной ТЭЦ в арктическом регионе. В качестве модельного объекта для оценки затрат на улавливание была выбрана Апатитская ТЭЦ в Мурманской области.

Апатитская ТЭЦ – единственный поставщик тепла в городах Апатиты и Кировск Мурманской области, в том числе для крупного промышленного предприятия АО «Апатит». ТЭЦ работает на привозном топливе – угле, в режиме комбинированной выработки электрической и тепловой энергии. Установленная электрическая мощность станции – 230 МВт, тепловая — 535 Гкал/ч⁴²².

⁴²⁰ Electricity Data Explorer // Ember. – 2022. – URL: <https://ember-climate.org/data/data-explorer/> (дата обращения: 24.09.2022).

⁴²¹ Лицзюань Ч., Пономаренко Т. В., Сидоров Д. В. Оценка чистых угольных технологий с применением технологии улавливания, утилизации и хранения углерода в угольной промышленности Китая // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 2. – С. 105-128. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_2_0_105.

⁴²² Апатитская ТЭЦ // ТГК-1. – 2023. – URL: <https://www.tgc1.ru/?id=165> (дата обращения: 22.10.2023).

По своему технологическому устройству ТЭЦ относится к пылеугольному типу. В данном случае перед сжиганием энергетический уголь размалывается в специальных мельницах до пылевидного состояния. Такой тип угольных электростанций является доминирующим по миру, и их деятельность связана с повышенными выбросами загрязняющих веществ в атмосферу по сравнению с другими опциями – сжиганием угля в псевдоожиженном слое и его газификация⁴²³.

Способ улавливания, который обычно реализуется на подобных объектах, – улавливание «после сжигания» (англ. post-combustion capture) с использованием химических растворителей⁴²⁴. Такой подход является наиболее приемлемым для улавливания газа на существующих энергетических объектах, так как влечёт за собой необходимость минимальных изменений существующих процессов и реконструкции мощностей, что, в конечном счёте, приводит к меньшим общим капитальным и операционным затратам⁴²⁵. В целом, улавливание «после сжигания» является наиболее широко применяемой группой методов по всему миру: несколько десятков лет такой подход используется в промышленных целях при производстве химикатов и для очистки природного газа и других газовых потоков. В частности, абсорбция CO₂ после сжигания с использованием алканоломинов признана одной из самых зрелых и готовых к использованию в промышленных масштабах технологий.

Стоимостная оценка была основана на расчёте увеличения нормированной стоимости энергии (LCOE) при внедрении системы улавливания CO₂. Подробно данный подход был рассмотрен в главе 3 (раздел 3.3) в рамках трех методов оценки затрат на 1 т предотвращённых выбросов при использовании УХУ.

⁴²³ Characterizing the U.S. Industrial Base for Coal-Powered Electricity / C. Samaras, J. A. Drezner, H. H. Willis, E. Bloom. – Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2011. – 157 p.

⁴²⁴ Kearns D. Technology readiness and costs of CCS / D. Kearns, H. Liu, C. Consoli // Global CCS Institute. – 2021. – 49 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf> (дата обращения: 12.03.2023).

⁴²⁵ Kheirnik M., Ahmed S., Rahmanian N. Comparative techno-economic analysis of carbon capture processes: Pre-combustion, post-combustion, and oxy-fuel combustion operations // Sustainability. – 2021. – Vol. 13 (24). – P. 13567. – DOI: 10.3390/su132413567.

Известно, что годовая выработка электроэнергии на Апатитской ТЭЦ составляет 449,6 млн кВт·ч⁴²⁶. Основными объектами-аналогами для проведения расчетов выступили упомянутые ранее угольные электростанции-адаптеры технологий УХУ – мощности Boundary Dam (Канада) и Petra Nova CCS (США, Техас).

Электростанция в Канаде, расположенная в угледобывающей провинции Саскачеван, была модернизирована в 2014 году для улавливания порядка 1 млн т CO₂ в год и действует до сих пор. Этот объект стал первой в мире электростанцией, успешно использующей УХУ.

На объекте Petra Nova CCS в США улавливание углекислого газа осуществлялось с 2017 года. Проект рассчитан на улавливание порядка 90 % CO₂ из отходящих потоков дымовых газов с ежегодным объемом примерно 1,4 млн т CO₂. Уловленный CO₂ транспортировался по трубопроводу на расстояние порядка 130 км на действующее нефтяное месторождение, где он использовался для повышения нефтеотдачи. В 2020 году функционирование системы улавливания было приостановлено, что связывают с высокими затратами на УХУ, присущими данному сектору, и волатильностью цен на нефть.

Средняя норма выбросов была рассчитана для используемого на Апатитской ТЭЦ каменного угля из Кузнецкого бассейна⁴²⁷, при принятом КПД для угольных электростанций данного типа – 36 %, и составила порядка 1,28 кг/кВт·ч. Следовательно, можно говорить о годовом объеме выбросов CO₂ в 575 тыс. т в год. При коэффициенте улавливания порядка 90 % годовой объем улавливания составит около 518 тыс. т CO₂.

Основные исходные и расчётные данные для проведения оценки по предлагаемому моделируемому кейсу 1 представлены в таблице 5.1.

Срок реализации проекта принят 30 годам (средний срок службы установки улавливания). Расчет проведён при ставке дисконтирования, равной 12 %.

⁴²⁶ Апатитская ТЭЦ // ТГК-1. – 2023. – URL: <https://www.tgc1.ru/?id=165> (дата обращения: 22.10.2023).

⁴²⁷ Росляков П. В., Скобелев Д. О., Доброхотова М. В., Гусева Т. В. Оценка показателей выбросов парниковых газов для угольных теплоэлектростанций в контексте развития углеродного регулирования в Российской Федерации // Уголь. – 2023. – №9 (1171). – DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-84-89.

Таблица 5.1 – Данные для оценки затрат по моделируемому кейсу 1 (Апатитская ТЭЦ)

Показатель	Ед. изм.	Значение	Источник
Установленная мощность ТЭЦ	МВт	230	428
Годовая выходная мощность – выработка электроэнергии (э/э)	млн кВт·ч	449,6	
Средняя норма выбросов	кг/кВт·ч	1,28	Расчётное значение с ориентацией на 429
Годовой объем выбросов	тыс. т /год	575	Расчётное значение
Способ улавливания	-	«после сжигания»	430
Коэффициент улавливания	%	90	431
Масса предотвращённых выбросов	тыс. т /год	518	Расчётное значение
Потребление э/э установкой улавливания	кВт·ч/кг CO ₂	0,31	432
Конечный выпуск э/э	млн кВт·ч	289	Расчётное значение
Цена угля	руб./т	1875	433
Цена электричества	руб./МВт·ч	758,7	434

Источник: составлено автором.

Для определения капитальных затрат использовалась формула Ленца (см. формулу 3.6). Она отражает нелинейную связь между ростом мощности установок и величиной капитальных вложений^{435,436}.

Определяя среднюю величину капитальных затрат на установку улавливания мощностью 1 400 тыс. т CO₂ в год в размере 1 000 млн долл.⁴³⁷ (данные по объекту-аналогу Petra Nova CCS), можно предположить, что согласно

⁴²⁸ Производство электрической энергии // ТГК-1. – 2022. – URL: <https://www.tgc1.ru/production/electricity-production/> (дата обращения: 22.10.2022).

⁴²⁹ Росляков П. В., Скобелев Д. О., Доброхотова М. В., Гусева Т. В. Оценка показателей выбросов парниковых газов для угольных теплоэлектростанций в контексте развития углеродного регулирования в Российской Федерации // Уголь. – 2023. – №9 (1171). – DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-84-89.

⁴³⁰ Kearns D. Technology readiness and costs of CCS / D. Kearns, H. Liu, C. Consoli // Global CCS Institute. – 2021. – 49 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf> (дата обращения: 12.03.2023).

⁴³¹ Lockwood T. A review of cost estimates for carbon capture and storage in the power sector // International Centre for Sustainable Carbon. – 2021. – 72 p. – URL: <https://www.sustainable-carbon.org/report/a-review-of-cost-estimates-for-carbon-capture-and-storage-in-the-power-sector/> (дата обращения: 24.10.2022).

⁴³² Grol E. Carbon Capture Retrofit. Analyses // National Energy Technology Laboratory. – 2017. – 32 p. – URL: https://www.netl.doe.gov/projects/files/CarbonCaptureRetrofitAnalysisPresentation_080917.pdf (дата обращения: 24.10.2022).

⁴³³ Мировой и российский рынок энергетического угля // Neft Research. – 2023. – 8 с. – URL: <https://neftresearch.ru/wp-content/uploads/2024/01/5neft-research.-global-and-russian-coal-markets.-forecast.pdf> (дата обращения: 25.10.2023).

⁴³⁴ О внесении изменений в постановление Комитета по тарифному регулированию Мурманской области от 18.11.2022 № 44/66 в связи с корректировкой тарифов, ранее установленных ПАО "ТГК-1" на 2024 год: Постановление Комитета по тарифному регулированию Мурманской области от 18.12.2023 № 49/13 // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/5101202312200009?index=8> (дата обращения: 22.12.2023).

⁴³⁵ Там же.

⁴³⁶ Tribe M. A., Alpine R. L. W. Scale economies and the «0.6 rule» // Engineering Costs and Production Economics. – 1986. – Vol. 10. – Is. 4. – P. 271-278. – DOI: 10.1016/0167-188X(86)90053-4.

⁴³⁷ Meeting the Dual Challenge. A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture Use and Storage // National Petroleum Council. – 2019. – URL: <https://dualchallenge.npc.org/> (дата обращения: 24.09.2022).

формуле (3.6) для станции мощностью 518 тыс. т CO₂ в год величина капитальных затрат составит порядка 498 млн долл. (42 430 млн руб.⁴³⁸).

С учетом того, что улавливание углекислого газа – как отмечалось, энергозатратный технологический процесс, операционные затраты по улавливанию принято делить на энергетические и неэнергетические. Неэнергетические затраты для угольной электростанции предполагаются на уровне 4 % от капитальных вложений⁴³⁹ – 19,9 млн долл. (1 695 млн руб.) в год. Энергетические затраты можно рассчитать через норму потребления энергетических ресурсов на 1 тонну CO₂, уловленного на угольных электростанциях. В натуральном выражении это 0,16 МВт·ч электричества и 0,094 тонн угля⁴⁴⁰. Таким образом, затраты на электричество и уголь для рассматриваемой электростанции составляют ориентировочно 1,42 и 2,07 тыс. долл. на 1 тонну CO₂ соответственно. Итого годовая величина энергетических затрат составляет порядка 1,81 млн долл. (154 млн руб.) в год на весь объем улавливаемого на объекте газа. Следовательно, годовые операционные затраты составят 21,7 млн долл. (1 849 млн руб.).

Далее рассчитывается показатель нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) по формуле, представленной в главе 3 (раздел 3.3). Показатель рассчитывается как отношение всех затрат на строительство и поддержание работы мощностей улавливания к мощности электростанции. Таким образом, в соответствии с формулой (3.2) увеличение показателя LCOE составит 0,32 долл. на производство 1 кВт·ч электроэнергии, что определяется, как 27,2 руб. Полученные результаты примерно сопоставимы с оценками, приведёнными в докладе, подготовленном Центром энергетической политики Университета штата Виктория (Австралия)⁴⁴¹. Согласно приведённым значениям, модернизация действующей угольной электростанции и адаптация модуля УХУ

⁴³⁸ Перевод осуществлен в соответствии со среднегодовым валютным курсом за 2023 г. в соотношении 1 долл.=85,2 руб.

⁴³⁹ Там же.

⁴⁴⁰ Там же.

⁴⁴¹ Mountain B. R. A review of the evidence on the carbon capture and storage applied to electricity generation in Australia // Victoria Energy Policy Centre, Victoria University. – 2020. – 15 p. – URL: https://d3n8a8pro7vhm.cloudfront.net/auscon/pages/18314/attachments/original/1607381522/Bruce_Mountain_CC_S_report_Dec_2020.pdf?1607381522 (дата обращения: 24.09.2023).

повысит стоимость вырабатываемой электроэнергии на 0,09-0,125 долл. за 1 кВт·ч (в ценах 2017 года).

Однако электроэнергия – не единственный продукт Апатитской ТЭЦ. Значительный объем поставок приходится на тепловую энергию, учет которой в расчете может значительно снизить удельные затраты. Учитывая также тепловую энергию (1 515 тыс. Гкал), получаем, что годовая выработка ТЭЦ составляет 2 051 млн кВт·ч-экв. В таком случае увеличение показателя LCOE составит 0,05 долл. (3,89 руб.) на производство 1 кВт·ч-экв. энергии.

Так, стоимость производства 1 кВт·ч-экв. энергии увеличилась на 3,89 руб. после внедрения системы улавливания при текущей ориентировочной стоимости электроэнергии 2-4 руб./кВт·ч для населения и 5-6 руб./кВт·ч для предприятий в регионе, что не позволяет включить возникшие дополнительные затраты в стоимость электроэнергии. Возвращаясь к тепловой энергии, увеличение составляет 4 526 руб./Гкал (переводной коэффициент – 1163 кВт·ч/Гкал) при цене на тепловую энергию 772,67 руб./Гкал⁴⁴².

При расчете затрат только на улавливание углекислого газа актуальным становится показатель затрат на 1 тонну уловленного CO₂, так как именно он позволяет примерно сравнить его значение с рыночной ценой, другими опциями декарбонизации и оценить, в конечном счете, экономическую целесообразность и жизнеспособность проекта⁴⁴³. Суть подхода была описана в главе 3 (раздел 3.3) и заключается в сравнении себестоимости производства на объекте с использованием УХУ и такого же производства на объекте без УХУ с последующим определением стоимости секвестрации на 1 тонну углекислого газа.

Количество выбросов CO₂ на единицу продукции без УХУ составляет 0,26 кг/кВт·ч-экв.; с учетом остаточных после улавливания выбросов в размере

⁴⁴² О внесении изменений в постановление Комитета по тарифному регулированию Мурманской области от 18.11.2022 г. 44/66 в связи с корректировкой тарифов, ранее установленных ПАО "ТГК-1" на 2024 год: Постановление Комитета по тарифному регулированию Мурманской области от 18.12.2023 № 49/13 // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/5101202312200009?index=8> (дата обращения: 22.12.2023).

⁴⁴³ 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

58 тыс. т в год и уменьшенного конечного объема вырабатываемой электроэнергии количество выбросов CO₂ на единицу продукции с УХУ составит 0,03 кг/кВт·ч-экв. Таким образом, стоимость 1 тонны уловленного CO₂ для рассматриваемого проекта составит 197 долл. на тонну, что определяется, как 16 775 руб.

Как было сказано, до настоящего времени в мире было реализовано два коммерческих проекта улавливания углекислого газа на угольных электростанциях – Boundary Dam и Petra Nova CCS. Согласно данным, представленным МЭА⁴⁴⁴, стоимость улавливания по миру по таким проектам снижается. Так, в 2014 году по проекту Boundary Dam стоимость улавливания составляла 110 долл. за 1 тонну, а в 2017 году по проекту Petra Nova она составляла уже 65 долл. за 1 тонну (см. рисунок 5.1).

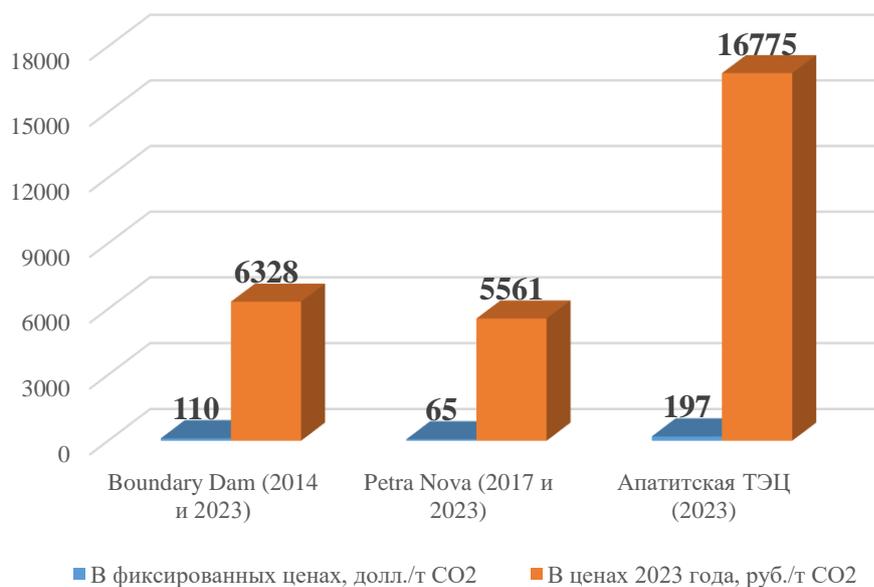


Рисунок 5.1 – Стоимость улавливания CO₂ на Апатитской ТЭЦ и объектах-аналогах в фиксированных ценах и ценах 2023 года

Источник: составлено автором.

⁴⁴⁴ Baylin-Stern A. Is carbon capture too expensive? / A. Baylin-Stern, N. Berghout // IEA. – 2021. – URL: <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive> (дата обращения: 24.09.2022).

Следует отметить, что доходная часть данных двух проектов формируется за счёт продажи CO₂ нефтегазовым компаниям для операций CO₂-EOR по цене 10-35 долл. за тонну⁴⁴⁵, а также за счёт действующих в данных странах налоговых режимов, подразумевающих действие налоговых кредитов и льгот.

Согласно представленным данным, расчётный показатель для Апатитской ТЭЦ составляет около 197 долл. за 1 тонну (16 775 руб.), что можно охарактеризовать как высокий уровень затрат. Это связано с относительно высокими удельными выбросами данного типа угля, высокими капитальными затратами, отсутствием эффекта масштаба (установки малой мощности), высоким энергопотреблением установки (более 25 % для установок данного типа), отсутствием возможностей дальнейшего использования углекислого газа для компенсации части затрат. Следует также отметить, что операционные затраты в моделируемой ситуации складываются преимущественно из стоимости топлива для работы установок улавливания. Стоимость электроэнергии и угля является относительно дешёвой в рассматриваемом регионе, однако подобные преимущества все еще являются недостаточными, чтобы проект был жизнеспособным и конкурентоспособным по сравнению с мировыми аналогами.

Вместе с тем, следует отметить, что в мире ведётся разработка около 50 проектов по улавливанию CO₂ на объектах энергетики⁴⁴⁶, что подтверждает возможную жизнеспособность такой конструкции и актуальность развития мер по их поддержке.

⁴⁴⁵ Policy priorities to intensive large scale deployment of CCS // Global CCS Institute. – 2019. – 31 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/04/TL-Report-Policy-priorities-to-incentivise-the-large-scale-deployment-of-CCS-digital-final-2019-1.pdf> (дата обращения: 24.09.2022).

⁴⁴⁶ Global Status of CCS 2023 // Global CCS Institute. – 2023. – 97 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf> (дата обращения: 01.05.2023).

5.2 Экономическое обоснование формирования межотраслевой технологической цепочки УХУ с использованием CO₂ для повышения нефтеотдачи

С учетом того, что единичные проекты улавливания в регионе, где отсутствует возможность дальнейшего использования уловленного CO₂, представляются на сегодня трудно реализуемыми, так как определяют очень высокую стоимость 1 тонны предотвращённых выбросов CO₂, в данном разделе предпринята попытка моделирования межотраслевой цепочки УХУ с использованием уловленного CO₂ для повышения нефтеотдачи (EOR) и применением элементов кластерного подхода к ее организации.

В теоретических исследованиях принято считать, что кластерный подход позволяет снижать экономическую нагрузку на отдельные компании-участники. Практика реализации УХУ также подтверждает эту гипотезу: например, в Великобритании развитие УХУ сконцентрировано в 6 промышленных кластерах⁴⁴⁷.

Однако следует подвергнуть критике данный подход и заметить, что жизнеспособность УХУ в России будет зависеть не только от кластерной организации всей технологической цепи, а, прежде всего, от множества других факторов, в частности конкретных производственных, технологических, географических, инфраструктурных, институциональных и экономических условий. Также следует отметить, что построение межотраслевых цепочек УХУ, в функционирование которых вовлечены различные субъекты хозяйственной деятельности, подразумевает изменение и усложнение организационных моделей реализации. В рамках конструкций технологических цепочек УХУ возникают межотраслевые взаимодействия, которые для российской действительности являются новыми.

⁴⁴⁷ Bataille C. G. F. Physical and policy pathways to net-zero emissions industry // Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change. – 2020. – Vol. 11. – Is. 2. – DOI: 10.1002/wcc.633.

Вместе с тем, при прочих равных условиях кластерный подход, безусловно, связан с возникновением потенциальных эффектов, которые могут появиться в результате совместного использования инфраструктуры, ресурсов, накопленного опыта и др. и существенно повлиять на экономику УХУ. В данном разделе проведена укрупнённая экономическая оценка функционирования полной технологической цепочки УХУ с двумя эмитентами и нефтегазовой компанией, применяющей углекислый газ для повышения нефтеотдачи, с ориентацией на зарубежные аналоги при существующих в данный момент в России условиях.

Следует отметить, что кластерный подход является реалистичным к реализации в промышленном секторе России, так как многие промышленные и энергетические объекты с интенсивными выбросами уже расположены в тесных географических границах. Территории, где имеются высокая концентрация крупных промышленных предприятий-эмитентов и близлежащие мощности, которые могут быть задействованы для использования и хранения газа, считаются самыми подходящими местами для создания кластеров УХУ⁴⁴⁸. Для моделирования такого кластера – технологической цепочки УХУ в России – необходимо определить перспективные регионы с точки зрения наличия хранилищ, а также крупных предприятий-источников выбросов. Предполагается, что взаимодействие в рамках работы такой технологической цепочки позволит предприятиям-эмитентам предотвратить выбросы CO₂ в атмосферу без непосредственного их участия в процессах дальнейшего обращения с углекислым газом (процессах утилизации), а нефтегазовым компаниям – получить возможность для реализации решений CO₂-EOR на своих месторождениях.

Как уже было сказано, оценки относительно общих объемов пригодных для размещения углекислого газа хранилищ в России существенно разнятся, а точные оценки касательно конкретных мощностей, их расположения, уровня концентрации на одной территории, потенциального объема конкретной залежи

⁴⁴⁸ Fernández-Canteli Álvarez P., García Crespo J., Martínez Orío R., Mediato Arribas J. F., Ramos A., Berrezueta E. Techno-economic evaluation of regional CCUS implementation: The STRATEGY CCUS project in the Ebro Basin (Spain) // Greenhouse Gases: Science and Technology. – 2022. – Vol. 13. – Is. 2. – P. 197-215. – DOI: 10.1002/ghg.2193.

и вовсе отсутствуют⁴⁴⁹. Руководствуясь логикой о том, что потенциально перспективным и наиболее доступным из всех имеющихся решений по использованию CO₂ на сегодня является его закачка для повышения нефтеотдачи на месторождениях, можно предположить, что более вероятным является сценарий размещения CO₂ в хранилищах на территории основных нефтегазоносных провинций. В целом, для пространственного распределения мощностей хранения с последующим определением предела возможностей по предотвращению выбросов за счет перманентного размещения CO₂ под землей на определённой территории, в регионе или в стране необходимо проведение серьёзного комплекса трудоёмких и дорогостоящих геологоразведочных и оценочных работ. По результатам укрупненной оценки, проведенной Европейской экономической комиссией ООН, можно говорить о том, что наиболее перспективные территории для хранения CO₂ соотносятся с основными нефтегазоносными провинциями России⁴⁵⁰ – Тимано-Печорская, Западно-Сибирская, Волго-Уральская и Северо-Кавказская⁴⁵¹.

Точные количественные данные об объемах выбросов по регионам России отсутствуют. Однако, ориентируясь на результаты исследований российских ученых⁴⁵², можно говорить о том, что наибольшие объемы выбросов приходятся на следующие регионы: Вологодская, Костромская, Липецкая, Белгородская, Астраханская, Оренбургская, Челябинская, Кемеровская, Свердловская области, а также Республика Башкортостан и Пермский край.

Сопоставив общие оценки, становится возможным выделить перспективные регионы для реализации технологической цепочки УХУ – это Западная Сибирь и Приволжье. Однако большинство нефтегазовых месторождений Западной Сибири

⁴⁴⁹ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181.

⁴⁵⁰ Геологическое хранение CO₂ в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии: первичный анализ потенциала и политики // UNECE. – 2021. – 35 p. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2021-04/Geologic%20CO2%20storage%20report_final_RU.pdf (дата обращения: 10.07.2023).

⁴⁵¹ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181.

⁴⁵² Сидорова К. И. Экономическая оценка использования технологии утилизации углекислого газа в нефтяных месторождениях для повышения нефтеотдачи: дис... канд. эк. наук: 08.00.05. – СПб., 2016. – 155 с.

расположены в районах, удаленных от основных источников выбросов CO₂. Наиболее привлекательной с точки зрения наличия зрелых и истощенных месторождений и крупных эмитентов представляется Волго-Уральская нефтегазоносная провинция. Близость скопления крупных промышленных предприятий в регионе к месторождениям нефти на поздней стадии разработки делает этот регион наиболее подходящим для создания кластера⁴⁵³⁴⁵⁴. Специалисты “Vygon Consulting” также отмечают, что данный регион включает в себя ряд нефтяных месторождений с высокой степенью выработанности запасов, и в регионе расположено большое количество промышленных мощностей в доступных географических границах (15-300 км)⁴⁵⁵.

Для проведения расчетов было выбрано нефтегазовое месторождение, вблизи которого присутствуют три газоперерабатывающих завода (ГПЗ), а также располагаются нефтеперерабатывающий завод (НПЗ) и газовая электростанция (ГРЭС). Определение месторождения как пригодного для внедрения CO₂-EOR происходило посредством анализа геолого-промысловых и инфраструктурных условий. В общем виде проведенные оценки подтвердили возможность использования газовых методов увеличения нефтеотдачи (МУН). Потенциальными объектами улавливания стали ГРЭС, ГПЗ и НПЗ. Однако ГПЗ были исключены из потенциальной технологической цепочки в силу низкого содержания CO₂ в потоке отходящих дымовых газов.

Таким образом, предполагается, что улавливание газа в рамках моделируемого кейса 2 осуществляется на объекте энергетики (ГРЭС) и промышленном объекте (НПЗ); после улавливания газ транспортируется

⁴⁵³ Cherepovitsyn A., Ilinova A. Ecological, economic and social issues of implementing carbon dioxide sequestration technologies in the oil and gas industry in Russia // Journal of ecological engineering. – 2016. – Vol. 17. – Is. 2. – P. 19–23. – DOI: 10.12911/22998993/62281.

⁴⁵⁴ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181.

⁴⁵⁵ Клубков С. CCUS: монетизация выбросов CO₂ / С. Клубков, К. Емельянов, Н. Зотов // VYGON Consulting. – 2021. – 47 с. – URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/967/jzgy572b7ome167wi4dbao9fnsqsfj13/vygon_consulting_CCUS.pdf (дата обращения: 01.03.2023).

на расстояние порядка 160 км и закачивается в пласт на месторождении⁴⁵⁶ (см. рисунок 5.2). Регион имеет развитую инфраструктуру, в том числе энергетическую (сеть газопроводов, автодороги, железную дорогу и ж/д станции, электрические сети и пр.).

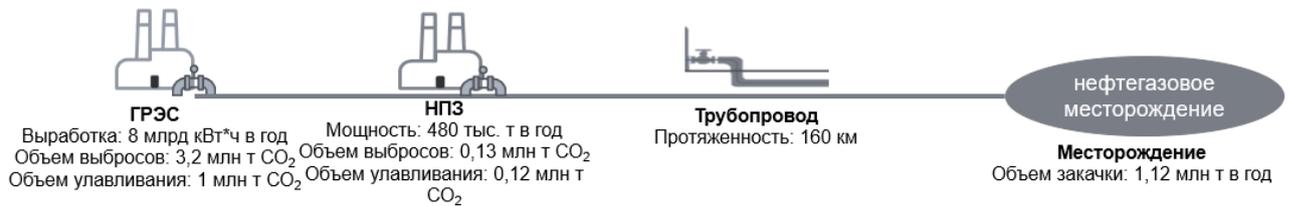


Рисунок 5.2 – Межотраслевая цепочка УХУ по моделируемому кейсу 2

Источник: Череповицына А., Череповицын А., Кузнецова Е. Проекты улавливания, хранения и использования CO₂ и их экономическая целесообразность // Журнал «ЭКО». – 2024. – Т. 54. – № 1. – С. 117–131. – DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2024-1-117-131.

Для определения мощности проекта проведена оценка примерной годовой массы выбросов в расчете от годовой выработки продукции на объектах. Средний уровень выбросов составляет около 0,4 кг CO₂/кВт·ч для газовых электростанций⁴⁵⁷ и около 0,27 т CO₂ на 1 тонну переработанной нефти для НПЗ⁴⁵⁸. Приняв во внимание коэффициент улавливания при работе установок «после сжигания» (порядка 90 %), получена масса максимально доступных для улавливания выбросов – 2,89 млн т CO₂ в год для ГРЭС и 0,12 млн т CO₂ в год для НПЗ. В связи с высокой зависимостью капитальных затрат от мощности установок, а также высокой нормой потребления электроэнергии на 1 т CO₂

⁴⁵⁶ Череповицына А., Череповицын А., Кузнецова Е. Проекты улавливания, хранения и использования CO₂ и их экономическая целесообразность // Журнал «ЭКО». – 2024. – Т. 54. – № 1. – С. 117–131. – DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2024-1-117-131.

⁴⁵⁷ Steen M. Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuel Fired Power Generation Systems // European Commission Joint Research Center. – 2017. – 61 p. – URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/221658dd-9556-4591-86ea-51544346a8f7> (дата обращения: 10.07.2023).

⁴⁵⁸ Van Straelen J., Geuzebroek F., Goodchild N., Protopapas G., Mahony L. CO₂ capture for refineries, a practical approach // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2009. – Vol. 4. – Is. 2. – P. 316–320. – DOI: 10.1016/j.egypro.2009.01.026.

для условий модели предлагается суммарное улавливание в объеме 1,12 млн т CO_2 в год⁴⁵⁹.

При организации такой цепи необходимо понимание принципов взаимодействия участников, а также обеспечения потенциального дохода и выгод от участия в инициативах УХУ. Улавливание является наиболее дорогостоящим процессом и требует большого объема капитальных вложений, а также существенных эксплуатационных затрат. В текущих условиях основным доступным источником дохода может стать прибыль от продажи дополнительно добытой нефти, получение которой происходит на этапе закачки, т.е. в зоне ответственности компании-недропользователя. В связи с этим представляется, что наиболее оптимальной организационной формой для реализации такой технологической цепочки УХУ является консорциум.

Величина капитальных затрат на установки улавливания, строительство газокompрессорной станции, организацию транспортной инфраструктуры, в том числе строительство трубопроводов, энергетических мощностей, обустройство месторождения к применению МУН вычислялась по объектам-аналогам с использованием формулы Ленца, представленной выше (см. формулу 3.6).

Для ГРЭС аналогом послужил зарубежный проект улавливания на электростанции Petra Nova, который был использован в предыдущем разделе. НПЗ как объект улавливания углекислого газа характеризуется серьезными отличиями в концентрации CO_2 в потоке исходящих газов на точечных источниках выбросов, что определяет широкие диапазоны при определении капитальных затрат для каждого конкретного случая. В связи с этим, в качестве аналоговой стоимости капитальных вложений на установку улавливания на НПЗ было взято среднее значение, рассчитанное “National Petroleum Council”, – 150 млн долл. на проект, предполагающий улавливание 374 тыс. тонн CO_2

⁴⁵⁹ Череповицына А., Череповицын А., Кузнецова Е. Проекты улавливания, хранения и использования CO_2 и их экономическая целесообразность // Журнал «ЭКО». – 2024. – Т. 54. – № 1. – С. 117–131. – DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2024-1-117-131.

в год⁴⁶⁰. Итого капитальные затраты на этап улавливания составили 70 185 млн руб.

Величина эксплуатационных затрат определялась из расчета средней цены газа в регионе – 6,78 руб./м³ ⁴⁶¹, цены электроэнергии – 4,68 руб./кВт·ч⁴⁶². Эксплуатационные затраты были разделены на энергетические и неэнергетические⁴⁶³. Расчет показал, что годовые эксплуатационные затраты на улавливание равны 4 567 и 331 млн руб. для ГРЭС и НПЗ соответственно.

Расстояние от месторождения до ГРЭС составляет 160 км, а НПЗ находится между этими двумя точками. За основу расчета капитальных вложений на оборудование и инфраструктуру для транспортировки и закачки использованы данные проекта-аналога, который предполагает транспортировку 2 млн т CO₂ на 200 км и его последующую закачку. Расчетные капитальные вложения на этап транспортировки составили 6 611 млн руб. Эксплуатационные затраты рассчитаны как 10 % от капитальных и составили 661 млн руб. в год.

Проект предполагает строительство/переоборудование 4-х нагнетательных скважин для закачки углекислого газа (~345 млн руб./шт.), а также строительство 2-х скважин для проведения мониторинга (~400 млн руб./шт.). Затраты на геологоразведку приняты равными нулю в связи с высокой изученностью месторождения. Затраты на эксплуатацию и обслуживание скважин, а также мониторинг приняты равными 10 % от стоимости скважин.

Ставка дисконтирования принята равной 7,5 % из расчета на поддержку экологических проектов со стороны государства. Капитальные вложения осуществляются частично за счет заемных средств.

Для точной оценки эффективности воздействия избранного МУН на повышение нефтедобычи необходимо проведение комплексного гидродинамического моделирования. Для целей укрупненной оценки приняты

⁴⁶⁰ Meeting the Dual Challenge. A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture Use and Storage // National Petroleum Council. – 2019. – URL: <https://dualchallenge.npc.org/> (дата обращения: 24.09.2022).

⁴⁶¹ Цены и тарифы // Газпром трансгаз Казань. – 2023. – URL: <https://kazan-tr.gazprom.ru/about/agreement/tseny-i-tarify/> (дата обращения: 29.03.2023).

⁴⁶² Электроснабжение. Тарифы и нормативы // Татэнергообл. – 2023. – URL: <https://tatenergobyl.ru/supply/tarifs/> (дата обращения: 29.03.2023).

⁴⁶³ Meeting the Dual Challenge. A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture Use and Storage // National Petroleum Council. – 2019. – URL: <https://dualchallenge.npc.org/> (дата обращения: 24.09.2022).

средние показатели эффективности при данном виде воздействия: от 0,28 до 0,35 т нефти на 1 т CO₂. Расчет проведен по двум вариантам эффективности увеличения нефтеотдачи: 1) минимальном – 0,28 (min) и 2) максимальном – 0,35 (max) (см. рисунок 5.3).

Расчет показал, что при заданных параметрах эффективности метода рассматриваемый проект не окупается.

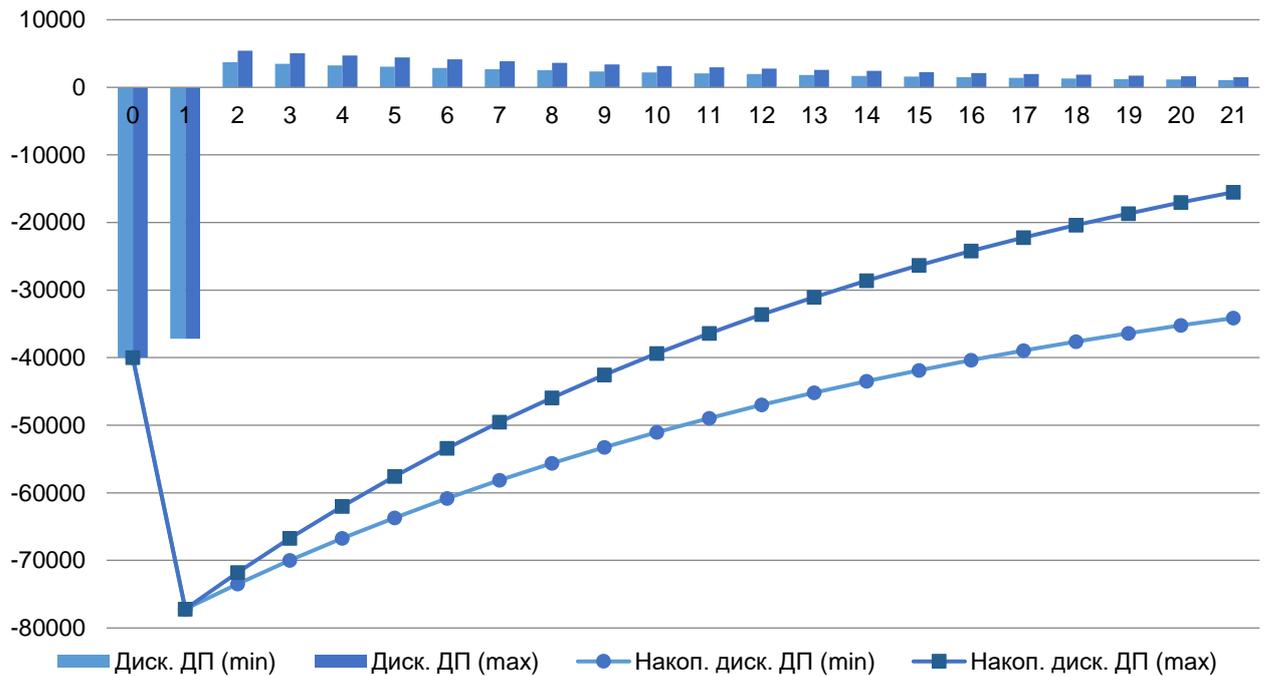


Рисунок 5.3 – Дисконтированный денежный поток при сценариях «min» и «max» (минимальной и максимальной эффективности МУН)

Источник: составлено автором.

Проведённый анализ чувствительности свидетельствует о том, что проект наиболее восприимчив к изменению цены на нефть и величине капитальных затрат (см. рисунок 5.4).

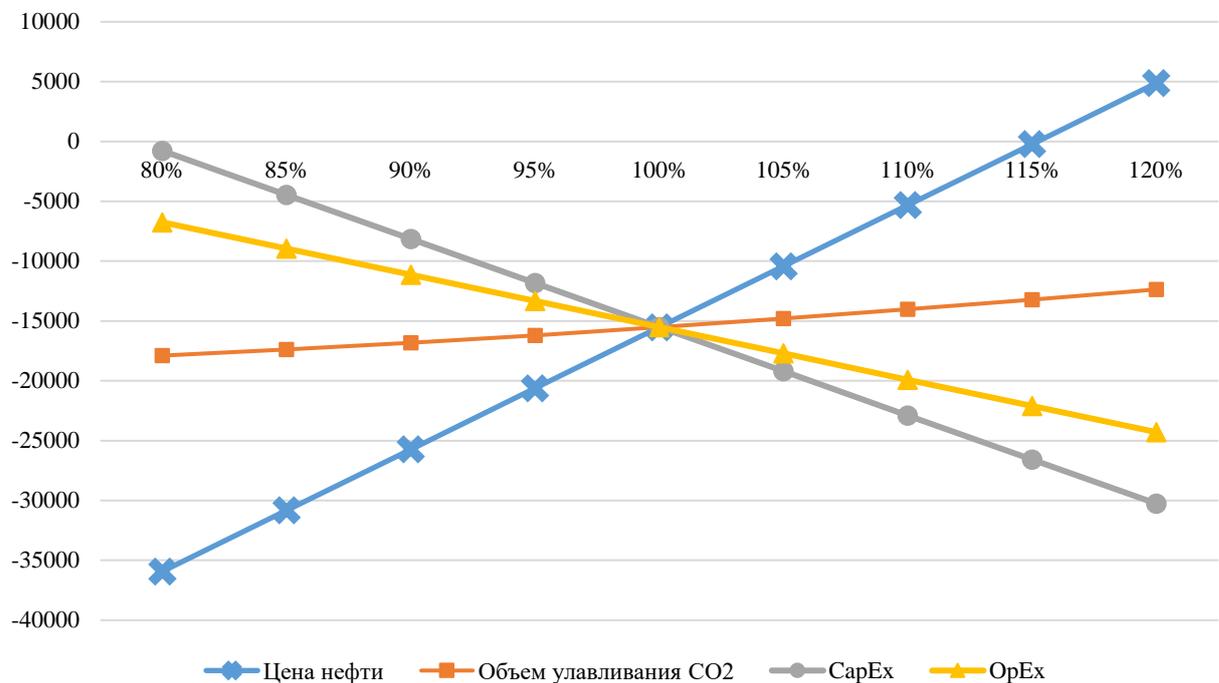


Рисунок 5.4 – Анализ чувствительности проекта при сценарии «max»

Источник: составлено автором.

При увеличении цены на нефть на 15 % и более проект окупается, но данный фактор является неуправляемым. Снижение же цены на нефть даже на 10 % существенно ухудшает показатели проекта. Таким образом, проект является высокочувствительным к данному параметру. Для обеспечения минимальной окупаемости проекта необходимо снижать затраты, особенно капитальные, которые преимущественно состоят из стоимости установки улавливания CO₂. Но снижение должно быть существенным – по капитальным затратам 20 % и более, чтобы проект приблизился к окупаемости, что требует развития технологий, ввода ряда объектов для накопления опыта и пр. Проект является чуть менее чувствительным к изменению эксплуатационных затрат и является чувствительным к объему улавливания CO₂ в минимальной степени из всех рассмотренных параметров.

5.3 Предложения по обеспечению экономической жизнеспособности УХУ в России

Проведённые исследования подтвердили, что проекты УХУ не являются экономически эффективными в текущих условиях. Для характеристики желаемого состояния таких проектов вводится понятие экономической жизнеспособности проектов УХУ. Жизнеспособность в данном случае означает способность системы сохранять свои основные функции и характеристики в заданных условиях или выживать в конкретной ситуации. Под экономической жизнеспособностью понимается способность проекта существовать, «выживать» в текущих экономических условиях, функционировать на основе самокупаемости.

Экономическая жизнеспособность проектов УХУ – это способность конкретного проекта по улавливанию и хранению углерода обеспечивать минимальную окупаемость. При этом следует заметить, что такая экономическая жизнеспособность необходима для того, чтобы проект мог существовать на основе коммерческой логики, при этом основным является фокус таких проектов на достижение целей декарбонизации путем предотвращения выбросов ПГ.

Предложения и рекомендации по обеспечению экономической жизнеспособности проектов УХУ представлены в таблице 5.2. По каждому варианту представлены возможные решения: для рассмотренной в работе модели 1 – внедрение технологии улавливания на Апатитской ТЭЦ, для модели 2 – реализация полной технологической цепочки УХУ с использованием углекислого газа для повышения нефтеотдачи пластов.

Таблица 5.2 – Варианты обеспечения экономической жизнеспособности проектов УХУ

Вариант	Статус для модели 1	Статус для модели 2	Рекомендации для развития в России
Снижение уровня капитальных затрат	Невозможно; в силу отсутствия действующих проектов использованы данные объектов-аналогов и расчётные данные.		Развитие технологий улавливания Модуляризация Применение технологий улавливания на объектах БОльшей мощности Накопление опыта
Включение затрат на улавливание CO ₂ в цену основной продукции	Невозможно, так как затраты на улавливание (3,89 руб./кВт·ч) приведут к повышению цены на э/э примерно в 2 раза.	Не применимо.	Развитие технологий, позволяющих снижать уровень затрат на установки улавливания и их энергообеспечение Развитие инструментов, позволяющих «выравнивать» затраты, – например, «контракты на разницу» и «льготные тарифы»
Продажа уловленного CO ₂	Отсутствие спроса Отсутствие транспортных сетей Отсутствие нефтегазовых месторождений в регионе (для CO ₂ -EOR)	Не применимо – используется форма организации консорциума.	Стимулирование спроса на CO ₂ со стороны нефтегазовых компаний (например, аналог “45Q”) Развитие «открытых» транспортных сетей CO ₂ Улавливание газа на энергетических и промышленных объектах, приближенных к нефтегазовым месторождениям
Экономия по налогу на выбросы	Недоступно в настоящее время; может быть учтено в условиях модели.		Планомерное развитие и введение углеродного регулирования с количественными ограничениями на выбросы ПГ, включая систему санкций и рыночный компонент
Участие в углеродном рынке	Недоступно в настоящее время; может быть учтено в условиях модели.		Планомерное развитие и введение системы торговли выбросами (ETS) в качестве экономического механизма развития УХУ (возможно, с распространением действия на угольные и газовые электростанции)
Получение господдержки	Недоступно в настоящее время; может быть учтено в условиях модели.		Развитие системы мер государственной поддержки УХУ на всех стадиях

Источник: составлено автором.

Варианты обеспечения экономической жизнеспособности модели 1

Сегодня в мире, как представлено в главе 2 (раздел 2.4), действует ряд механизмов государственной поддержки низкоуглеродных инициатив, в том числе УХУ. Наиболее распространёнными инструментами общего характера выступает налог на выбросы, специфического характера применительно к объектам электроэнергетики – «контракты на разницу» (CfD) и «льготные тарифы» (FIT).

«Контракты на разницу» в контексте реализации УХУ представляют собой инструмент, направленный на компенсацию разницы между стоимостью электроэнергии, произведенной на мощностях с применением технологии улавливания, и стоимостью «традиционной» электроэнергии – электроэнергии, произведённой на тех же мощностях без улавливания углерода. Так, можно сказать, что размер компенсации равен увеличению стоимости электроэнергии, которая ранее рассчитана как LCOE. Реализация такого инструмента на практике может происходить посредством государственной субсидии, надбавки к цене, которые, в конечном счете, «выравнивают» стоимость электроэнергии, полученной на объекте с применением технологии улавливания, для потребителя. «Льготные тарифы» подразумевают предоставление гарантированной цены выше рыночной для производителей «нетрадиционной» энергии, в том числе полученной с применением УХУ, по долгосрочным контрактам. В целом, принцип действия таких мер схожий, в этой связи остановимся на механизме «контракты на разницу».

Применение такого механизма требует серьёзных вложений со стороны государства. На примере моделируемой в данном исследовании ситуации на Апатитской ТЭЦ можно оценить, что реализация механизма «контракты на разницу» только для одной станции будет обходиться государству в 7,9 млрд руб.

В 2023 году общая выработка электроэнергии по РФ составила 1151,6 млрд кВт·ч.⁴⁶⁴ С ориентацией на долю угольной генерации на уровне порядка 13 %⁴⁶⁵, можно предположить, что выработка электроэнергии в России на угольных электростанциях составляет около 150 млрд кВт·ч с общим объёмом выбросов 192 млн т в год. Укрупнённо можно оценить, что необходимый объём субсидирования угольных электростанций-адаптеров УХУ в России будет примерно 583 млрд руб. с объёмом предотвращённых выбросов 172 млн т в год – это около 6 % выбросов от общероссийских.

⁴⁶⁴ Энергопотребление в России в 2023 году составило 1,14 трлн кВт·ч // ТАСС. – 2024. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/19814169> (дата обращения: 29.03.2023).

⁴⁶⁵ Милькин В. В России к 2050 году доля угля в генерации энергии может вырасти / В. Милькин, А. Волобуев // Ведомости. – 2023. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/08/25/991818-v-rossii-k-2050-godu-dolya-uglya-v-generatsii-energii-mozhet-virasti> (дата обращения: 29.03.2023).

Следующий расчет был проведен с ориентацией на действие налога на выбросы (ставка 1000 руб./т⁴⁶⁶). Данный налоговый инструмент сейчас действует в экспериментальном режиме на территории Сахалина. В условиях применения данного налога к уловленным на рассматриваемом объекте выбросам при текущей ставке изменение удельных затрат на улавливание углекислого газа будет незначительным (см. рисунок 5.5).

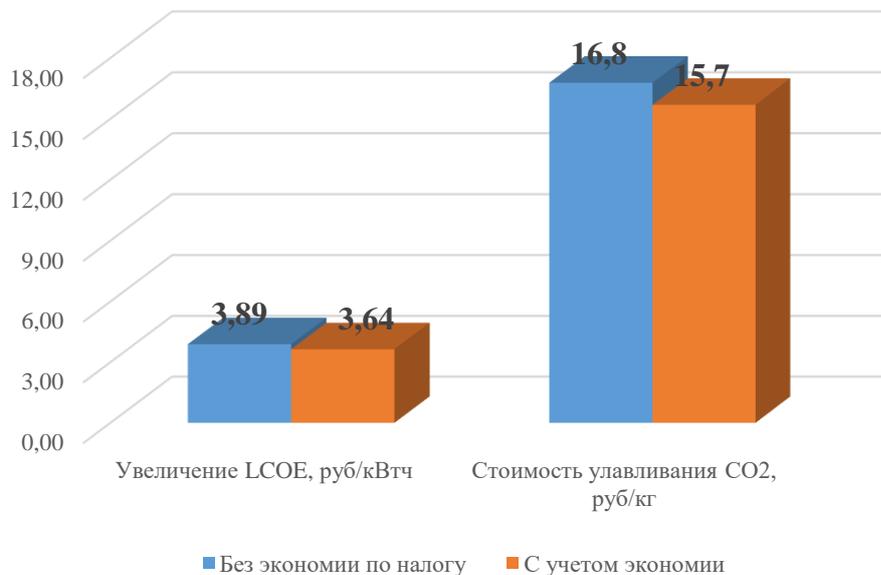


Рисунок 5.5 – Изменение стоимости улавливания CO₂ на Апатитской ТЭЦ при экономии по налогу на выбросы ПГ

Источник: составлено автором.

Изменение затрат за счет экономии на налоге будет незначительным: LCOE снизится с 3,89 до 3,64 руб./кВт·ч, стоимость 1 т предотвращенных выбросов – с 16 775 до 15 867 руб., что не позволяет определить эту меру в разряд действенных. Для окупаемости проекта ставка налога на выбросы ПГ должна вырасти до 16,8 тыс. руб. за 1 т CO₂, что не представляется возможным. Кроме того, в реальности налогом на выбросы ПГ облагаются не все выбросы

⁴⁶⁶ О ставке платы за превышение квоты выбросов парниковых газов в рамках проведения эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов на территории Сахалинской области: Постановление Правительства Российской Федерации от 18.08.2022 г. № 1441 // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208190038> (дата обращения: 20.03.2024).

предприятия, а только объемы сверх квоты, расчет которой проводится в индивидуальном порядке для каждого предприятия в конкретном регионе. В случае модели 1 расчёт проведён для всей массы выбросов CO₂, без учета действия квоты. В этой связи влияние данной меры в реальности будет еще менее существенным, точнее – ничтожно малым.

Таким образом, «контракты на разницу» могут обеспечить экономическую жизнеспособность УХУ, но требуют существенных затрат государства, а действие налога на выбросы ПГ при ставке 1000 руб./т не способно существенно повлиять на экономику проектов УХУ.

Варианты обеспечения экономической жизнеспособности модели 2

Аналогичный расчет с учетом возможного действия налога на выбросы ПГ был проведён к модели 2 (полная технологическая цепочка УХУ с CO₂-EOR) при среднем отношении массы дополнительной добычи нефти к закачиваемому CO₂. Данный вариант расчета представлен как сценарий «налог» и учитывает влияние возможной потенциальной экономии по налогу на выбросы ПГ с действующей на Сахалине ставкой в 1000 руб./т на весь объем уловленных выбросов при средней эффективности МУН. Расчёт показал, что потенциальная экономия на налоге не позволит стать проекту окупаемым. В связи с этим, был также рассмотрен сценарий «45Q», предполагающий реализацию модели при действии на рассматриваемой территории налоговой льготы “45Q”. Мера представляет собой определенную сумму налоговой льготы за тот объем CO₂, который улавливается и затем отправляется на геологическое захоронение и/или используется, в том числе для увеличения нефтеотдачи пластов. Для расчёта принята действующая в настоящий момент в США ставка в размере 60 долл./т на улавливание, хранение и использование CO₂, включая повышение нефтеотдачи пластов (EOR). Компании, которые улавливают и хранят или используют CO₂, имеют право на налоговую льготу за каждую тонну предотвращённых выбросов.

Результаты расчета по сценариям «налог» и «45Q» представлены на рисунке 5.6.

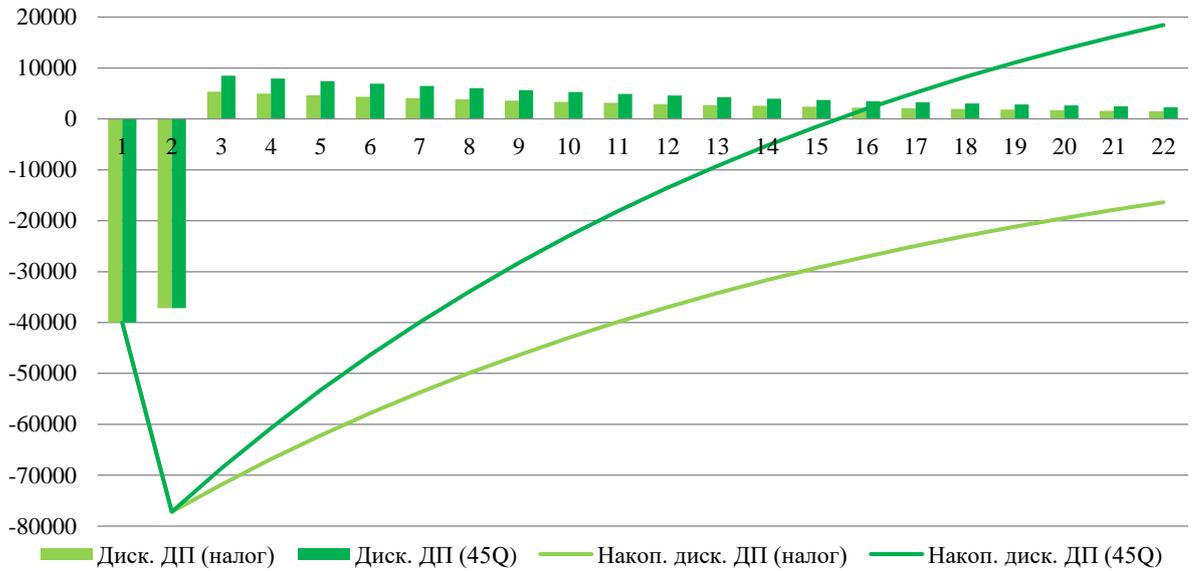


Рисунок 5.6 – Дисконтированный денежный поток при сценариях «налог» и «45Q»

Источник: составлено автором.

Применение налоговой льготы “45Q” с действующей в настоящий момент в США ставкой в 60 долл. за 1 тонну CO₂, уловленного и применяемого в целях CO₂-EOR, значительно улучшает экономические показатели проекта. Вместе с тем, при уменьшении ставки на 43 % (2934 руб./т, или 34,4 долл./т) проект перестаёт быть окупаемым (см. рисунок 5.7).

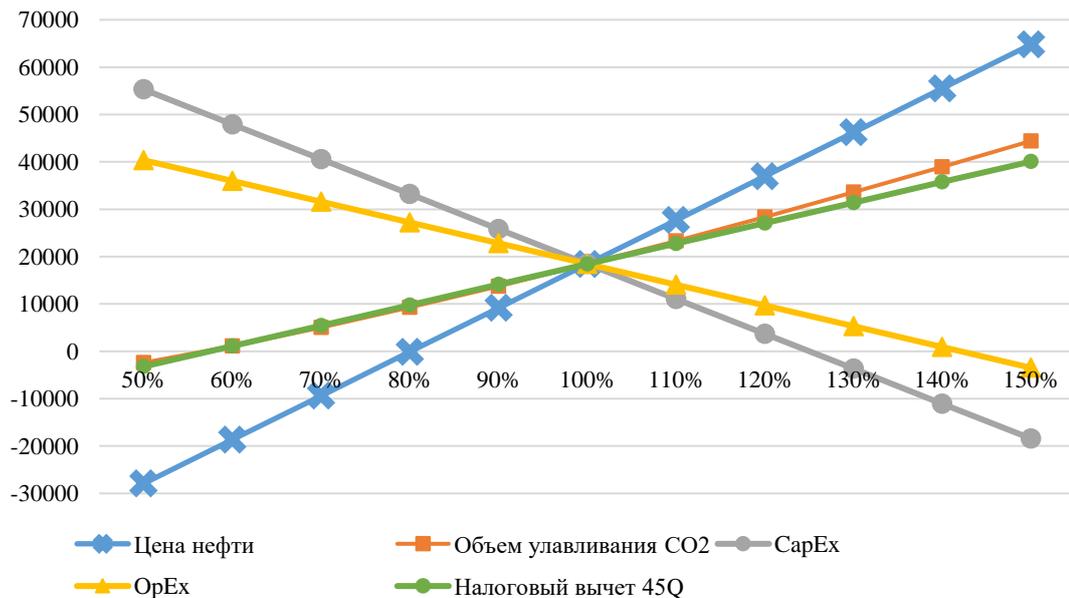


Рисунок 5.7 – Анализ чувствительности проекта при применении “45Q”

Источник: составлено автором.

Применение меры-аналога “45Q” даже по минимальной ставке приведёт к затратам бюджета государства в 3 275 млн руб. в год, или 65 500 млн руб. за 20 лет реализации проекта. Учитывая маловероятность применения подобных мер, можно сделать вывод о необходимости комплексного развития политики низкоуглеродного развития в данном направлении с применением общих и специфических механизмов как на национальном, так и региональном уровнях.

5.4 Рекомендации по развитию мер государственного регулирования, планированию и внедрению технологических цепочек УХУ в России

С учетом того, что проблема изменения климата уже не является экологической, а представляет собой комплексную проблему глобального характера, для решения которой необходимы согласованные действия на уровне всех государств, основополагающую роль в данном процессе занимает формирование соответствующей государственной политики и создание институциональных условий в разных странах и регионах. При этом важным представляется такая направленность действий, которая соответствует достижению провозглашённых на уровне ООН глобальных ЦУР, а также национальным интересам отдельных стран, особенностям регионов и конкретных компаний.

В данном разделе представлены рекомендации по развитию мер государственного регулирования в области климатической и экологической промышленной политики в России, планированию и внедрению технологических цепочек УХУ в промышленности, а также уделено внимание совокупной ценности и долгосрочному развитию УХУ в более широком контексте.

5.4.1 Рекомендации по развитию мер государственного регулирования

Рекомендации по уточнению понятийного аппарата

При совершенствовании климатической и экологической промышленной политики в России целесообразно уточнить понятие декарбонизации как «комплекса мер по сокращению выбросов ПГ в атмосферу посредством реализации мероприятий, направленных на предотвращение попадания уже образовавшегося углекислого газа в атмосферу (предотвращение выбросов) и/или «отказ» от образования выбросов ПГ («избегание» выбросов)». Такой подход позволит закрепить понимание декарбонизации как комплекса конкретных видов деятельности на уровне промышленной системы (обычно – компании, а также промышленного объекта, проекта, комплекса), направленных непосредственно на сокращение выбросов ПГ, отделив декарбонизационные процессы от деятельности по удалению углерода напрямую из атмосферы с целью снижения концентрации в ней углекислого газа (технологии DAC, поглощение CO₂ из атмосферы естественным путём) и компенсационной деятельности (природные проекты, операции на рынке углеродных единиц). Кроме того, для упорядочивания различного рода действий по декарбонизации промышленных систем необходимо уточнить специфику применения, значение и смысловую нагрузку таких понятий, как «направление декарбонизации», «группа опций декарбонизации», «опции декарбонизации», «методы декарбонизации», «технологии декарбонизации» с ориентацией на предложенные в работе основы терминологической систематики. Так, направление декарбонизации представляет собой наиболее общий ориентир по выстраиванию деятельности по снижению выбросов ПГ – например, работа по совершенствованию операционной деятельности компании. Группа опций декарбонизации направлена на решение конкретной задачи в рамках декарбонизационных процессов по выбранному направлению декарбонизации – например, повышение энергоэффективности в рамках совершенствования операционной деятельности компании. Опции (методы) декарбонизации призваны решать частные задачи: например, конкретная опция декарбонизации –

модернизация и увеличение доли энергоэффективного оборудования в производственной деятельности компании, а технологии (техники) декарбонизации – установка конкретной единицы энергоэффективного оборудования на определённом этапе технологического процесса (например, при очистке природного газа)⁴⁶⁷. Закрепление таких основ и понятий в соответствующих документах (например, в Методических рекомендациях по планированию и реализации декарбонизационной деятельности промышленных компаний) позволит улучшить процессы планирования, повысить эффективность и прозрачность видов деятельности на уровне конкретных компаний, направленных на снижение выбросов ПГ.

Рекомендации по совершенствованию политики низкоуглеродного развития в России в части УХУ

Как показано в работе, в странах, реализующих на практике технологические цепочки УХУ, проводимая на государственном уровне политика в данной области является комплексной. Система поддержки низкоуглеродных технологий, в том числе УХУ, обычно является многоуровневой и разнонаправленной по своему действию, опирается на распределение затрат и рисков между государством и частным сектором и нацелена, в конечном счете, на повышение ценности технологии для различных заинтересованных сторон. Безусловно, планомерная работа по выстраиванию такой системы поддержки в России является базисом для зарождения и развития проектов по улавливанию и хранению углерода в промышленности. В целом, согласно видению автора, рекомендации по совершенствованию климатической и экологической промышленной политики можно разделить на несколько групп.

Группа 1 – закрепление общего вектора и конкретных показателей по развитию мощностей УХУ на государственном уровне. Так, на уровне государства может быть обозначена долгосрочная приверженность конкретным инструментам по снижению выбросов ПГ в промышленном секторе, например

⁴⁶⁷ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

УХУ. В нормативно-правовых документах по реализации Стратегии с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 года УХУ может быть обозначено как одно из приоритетных направлений с фиксированным значением развития мощностей к определённому году. Это могут быть либо общие значения, либо значения с указанием конкретных приоритетных секторов или отраслей для адаптации УХУ, в абсолютных или относительных значениях по разным метрикам. Например, целевой ориентир может формулироваться по-разному, возможны следующие варианты:

- «развитие общих мощностей по улавливанию и хранению углерода в России до 10 млн т к 2035 году»;
- «оснащение не менее 20 % действующих угольных электростанций в России установками улавливания углерода с объёмом предотвращаемых выбросов на каждом объекте не менее 50 % от совокупных в срок до 2040 года»;
- «обеспечение долгосрочного геологического хранения углерода в подземных хранилищах на территории России в объёме не менее 50 млн т в год к 2050 году».

Такие целевые ориентиры государства на стратегическом уровне призваны повышать заинтересованность бизнеса и стимулировать долгосрочные инвестиции в развитие УХУ на всех стадиях. В настоящее время такие закреплённые ориентиры в части УХУ на государственном уровне в России отсутствуют.

Группа 2 – создание и развитие нормативной и правовой базы для реализации УХУ, в том числе в части легитимного и безопасного хранения CO_2 под землей. Данная группа возможных мер, как правило, не стимулирует развитие УХУ, а обеспечивает основу для их функционирования. В случае отсутствия действующих мер по данному направлению реализация УХУ может оказаться невозможной. Особого внимания требует создание правовых основ для размещения и долгосрочного хранения CO_2 в подземных хранилищах. Уже отмечались первые предпринимаемые шаги в России по данному направлению. Это утверждённый в 2023 году проект Методических рекомендаций

по обоснованию пригодности участков недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, с целью размещения углекислого газа, которые устанавливают «единые для РФ принципы выбора, геологического изучения и обоснования возможности использования участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых, при размещении в пластах горных пород углекислого газа, с учетом природоохранных и других ограничений в соответствии с действующим законодательством»⁴⁶⁸. С 2022 года в России также действует отдельная лицензия на строительство и эксплуатацию ПСРУГ.

Геологическое изучение участка недр и оценка его пригодности для строительства и эксплуатации ПСРУГ также разрешены в рамках лицензий на геологическое изучение, разведку и добычу полезных ископаемых. С 2024 года уже существует возможность строительства и эксплуатации ПСРУГ в рамках таких лицензий⁴⁶⁹. Вместе с тем, данное направление требует существенного развития. Так, вопросы мониторинга долгосрочного хранения CO₂ под землей на постоянной основе должны быть закреплены на государственном уровне, в том числе в части распределения ответственности и рисков. Кроме того, все вопросы геологического хранения CO₂ являются, как показывает мировой опыт, критически значимыми по многим аспектам, а отсутствие или неготовность хранилищ для размещения существенного объема CO₂ вскоре может стать серьёзным сдерживающим фактором для развития УХУ. Целесообразно выделить данное направление в отдельную государственную программу по формированию реестра геологических хранилищ для долгосрочного размещения углекислого газа под землей.

Группа 3 – разработка мер по регулированию промышленной деятельности в части выбросов ПГ. Такая группа мер работает, чаще всего, посредством внедрения углеродного регулирования выбросов ПГ, которые при таком

⁴⁶⁸ Методические рекомендации по обоснованию выбора участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – 2023. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115498> (дата обращения: 13.10.2023).

⁴⁶⁹ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181

регулировании становятся «платными», путем применения различных мер – либо через установление налогов на выбросы, либо с использованием систем квотирования выбросов, в том числе с рыночной компонентой. Установление цены на углерод в целом побуждает компании к развитию низкоуглеродных технологий и видов деятельности. Вместе с тем, цена на углерод должна быть существенной для того, чтобы стать стимулом для компаний к развитию УХУ как достаточно «дорогой» опции декарбонизации. Следует отметить, что ценообразование на углерод является, в большей степени, элементом реализации климатической политики в более широком контексте, а не направленным действием в сторону развития конкретных решений, в том числе УХУ. Низкие и нестабильные цены на углерод не являются достаточным стимулом для развития дорогостоящих технологий улавливания и хранения углерода⁴⁷⁰. Данный вывод подкрепляется результатами расчётов, полученных в данной работе при моделировании, оценке затрат на улавливание углекислого газа на Апатитской ТЭЦ и экономическом обосновании функционирования полной технологической цепочки УХУ с CO₂-EOR. Эффект от действия налога на выбросы даже в случае его применения ко всему объёму выбросов ПГ по рассматриваемым объектам (пренебрегая системой квотирования) практически не влияет на значение затрат на улавливание и экономические показатели функционирования технологической цепочки УХУ. Для того чтобы данное направление было действенным по отношению к стимулированию развития именно УХУ, необходимо подключение мер из иных групп, прежде всего, следующей, что доказано и в рамках данного исследования.

Группа 4 – разработка мер по снижению затрат и поддержке доходной части проектов УХУ. Данная группа представляет собой уже более специфичные и направленные по своему действию механизмы для снижения капитальных и операционных затрат на УХУ, а также поддержке доходов там, где это необходимо. Снижению затрат способствуют: 1) все виды грантового

⁴⁷⁰ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.

финансирования, которое особенно результативно на этапах НИОКР, технико-экономического обоснования, 2) кредитная поддержка в части льготных процентных ставок и других мер, 3) налоговые льготы, нацеленные на снижение затрат. Для поддержки и «выравнивания» доходов при реализации УХУ целесообразно использовать уже упомянутые и применённые к рассматриваемым в данной работе моделям механизмы: контракты на разницу (CfD), льготные тарифы (FIT) и ряд новых, применяемых в некоторых странах. Данная группа мер является самой распространённой и действенной для поддержки УХУ, что подтверждено расчетами в рамках данного исследования. Такие меры применяются во всех странах с действующими проектами УХУ, и именно такие механизмы смогут задать вектор на появление и развитие технологических цепочек улавливания и хранения углерода в промышленном секторе России.

Группа 5 – развитие механизмов государственно-частного партнёрства. Привлечение к реализации технологических цепочек УХУ государственных предприятий позволит обеспечить разделение затрат и рисков между частным сектором и государством, что является обязательным условием развития инициатив УХУ, особенно на начальных этапах.

Можно подытожить, что основными группами мер, которые следует развивать для начала реализации цепочек УХУ в промышленном секторе России, являются меры, направленные на создание и развитие нормативной базы, обеспечивающей правовую основу реализации технологических цепочек УХУ, и меры по снижению затрат и поддержке доходной части проектов. В свете зарождающегося низкоуглеродного регулирования в России для развития УХУ необходимо, прежде всего, планомерное совершенствование этих двух направлений. Создание и развитие нормативной базы, обеспечивающей правовую основу реализации технологических цепочек УХУ, находится вне фокуса данной работы, тогда как мерам по снижению затрат и поддержке доходной части проектов УХУ в части рекомендации по их развитию будет уделено внимание.

Государственную политику низкоуглеродного развития целесообразно формировать с ориентацией, прежде всего, на налоговые льготы, уже доказавшие

свою эффективность в части УХУ, а также контракты на разницу, которые являются новыми, но уже подтвердившими свою действенность инструментами поддержки реализации УХУ в энергетике.

Действие налоговых льгот целесообразно разграничивать для компаний, занимающихся: 1) улавливанием и геологическим захоронением CO₂, 2) улавливанием, хранением и использованием CO₂, включая повышение нефтеотдачи пластов, 3) прямым улавливанием углекислого газа из атмосферы с его последующим захоронением или использованием. Внедрение контрактов на разницу в случае России целесообразно осуществлять применительно к угольным электростанциям с УХУ. Это позволит сделать внедрение систем улавливания углерода на таких объектах жизнеспособным путем «выравнивания» стоимости вырабатываемой электроэнергии.

Целесообразно рассмотреть возможность комбинации различных мер государственной поддержки: например, применение общих обязательных мер – налог на выбросы ПГ с действующей на Сахалине ставкой – и налоговых льгот в виде “45Q” для нефтяных компаний или контрактов на разницу для объектов энергетики. При этом развитие государственной политики по данным направлениям целесообразно интегрировать в отраслевые системы регулирования деятельности промышленных компаний: например, положения о налоговых льготах в виде “45Q” для нефтяных компаний – в отраслевую систему нормативных и правовых актов развития нефтегазового комплекса страны⁴⁷¹. В таком случае общие обязательные меры определяют минимальную ответственность по управлению выбросами ПГ, поддерживая реализацию климатической политики в более широком контексте, а специфические меры по снижению затрат и поддержке доходной части проектов УХУ стимулируют развитие именно этого направления. Такой комплексный подход часто имеет динамический эффект: минимальный обязательный стандарт может постепенно ужесточаться (налог на выбросы), а специфические меры поддержки (в данном

⁴⁷¹ Мелехин Е. С. О совершенствовании институциональной среды развития нефтегазового комплекса России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2023. – № 1(180). – С. 53–56.

случае – налоговые льготы, контракты на разницу) постепенно «доводят» внедрение технологий до такого уровня, чтобы ужесточающийся стандарт был приемлемым. Такая схема может быть подходящей и для развития УХУ.

Следует также отметить, что формирование государственной политики низкоуглеродного развития требует понимания специфики затрат на УХУ в разных отраслях, чему было уделено отдельное внимание в данной работе. Меры государственной поддержки будут по-разному воздействовать на проекты, реализуемые в разных областях, и могут быть существенным стимулом для реализации проектов УХУ в более «дешёвых» отраслях (например, переработка природного газа) и потребовать усиления для стимулирования УХУ в более «дорогих» отраслях (производство электроэнергии, цемента, стали). Количество действующих направлений и механизмов по обеспечению поддержки УХУ должно увеличиваться для вовлечения в данный вид деятельности более «дорогих» отраслей.

Возвращаясь к предложению выше по формированию отдельных государственных программ по развитию УХУ, следует отметить, что целесообразным видится два направления, которые позволят значительно усилить компетенции и преодолеть «узкие места». Первая предлагаемая государственная программа – по формированию реестра геологических хранилищ для долгосрочного размещения углекислого газа – позволит постепенно создавать возможности для его захоронения, а также осуществить проработку вопросов мониторинга и контроля захоронения CO_2 на длительных горизонтах как ключевого элемента реализации УХУ. Подтверждение пригодности потенциального места для хранения – трудоёмкий и дорогостоящий процесс. Компаниям обычно необходимо несколько лет на соблюдение различных технических критериев, чтобы убедиться, что изучаемые участки позволят безопасно хранить углекислый газ на постоянной основе. В рамках второй отдельной государственной программы целесообразно предложить программу по развитию технологий улавливания CO_2 . Именно отсутствие таких технологий, готовых к полномасштабному промышленному использованию, и их стоимость

являются основными барьерами для реализации первого и основного этапа всего процесса, без которого реализация технологической цепочки УХУ невозможна.

5.4.2 Рекомендации по планированию и внедрению технологических цепочек УХУ в России

Рекомендации по управлению межотраслевыми цепочками УХУ

Технологические цепочки УХУ носят, как было доказано в работе, межотраслевой характер, что определяет особые подходы к организации и управлению ими. Они представляют собой особый объект управления, подходы к которому отличаются от подходов, используемых на уровне предприятия или проекта. При организации деятельности таких систем целесообразно выделять понятие «инициатор проекта», который является автором идеи проекта, подготовившим предложение по осуществлению проекта и его предварительное обоснование. Инициатор может выступать в роли заказчика проекта или не принимать в нём никакого участия. В дальнейшем целесообразно выделять понятие «оператор проекта» в рамках функционирования технологической цепочки УХУ, который будет являться субъектом управления. Оператором проекта целесообразно выбирать одну из промышленных компаний, участвующих в полной технологической цепочке.

Сложные технологические цепочки УХУ требуют выстраивания соответствующих межотраслевых связей и договорных отношений. Договорные отношения при построении первых технологических цепочек УХУ в России целесообразно формировать на основе двух подходов, представленных ниже:

1) создание консорциума как временного объединения нескольких организаций для осуществления скоординированных совместных действий и реализации проекта. Как известно, в российском законодательстве такая форма

отсутствует. Вместе с тем, такая форма является действенной при реализации проектов УХУ в промышленности;

2) установление договорных отношений по покупке уловленного CO₂ между предприятием-эмитентом и компанией, осуществляющей транспорт, зачку, использование углекислого газа. Такая форма подразумевает отдельную реализацию проектов по улавливанию CO₂ и дальнейшему обращению с ним, при этом каждая компания для успешного построения договорных отношений должна иметь собственные стимулы для реализации отдельного этапа технологической цепочки УХУ.

В каждом конкретном случае промышленные комплексы УХУ являются уникальными, что должно учитываться при планировании и реализации полномасштабных проектов в России.

Планирование развития УХУ в России: общие аспекты

На этапе планирования УХУ компаниям необходимо уделять внимание тем факторам, которые значительно влияют на уровень затрат. Например, следует избегать небольших масштабов установок по улавливанию, так как в этом случае технологические процессы улавливания становятся значительно дороже, а также предварительно планировать и моделировать создание всей технологической цепочки с более эффективными вариантами ее реализации⁴⁷². При планировании проектов УХУ в части затрат целесообразно ориентироваться на предложенную в работе систему факторов по управлению затратами по этапам технологической цепочки.

Высока вероятность того, что развитие УХУ в России будет зарождаться в рамках конструкций первого поколения, представленных и обоснованных в данной работе. Проведённая в исследовании оценка применимости основных конструкций в России показала, что актуальными и возможными к реализации являются конструкции, ориентированные на интеграцию УХУ на СПГ-производствах, угольных электростанциях, а также нефтеперерабатывающих и

⁴⁷² 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

нефтехимических заводах, но масштабирование первого варианта ограничено. В этой связи можно предположить, что в России нефтегазовый и энергетический сектора станут первыми отраслями, внедряющими УХУ, с тенденцией на начальных этапах к выстраиванию цепочек с ориентацией на CO₂-EOR. Именно данные отрасли, прежде всего, должны быть объектами государственной поддержки в части УХУ в России.

Признание необходимости декарбонизации на уровне промышленных, в том числе нефтегазовых, компаний может трактоваться как фундаментальное переформатирование ценностей, и уже сегодня это можно наблюдать в России⁴⁷³. Имиджевая составляющая может быть также важным элементом развития УХУ в промышленности. Следует подкреплять две упомянутые тенденции на уровне государства. Так, при реализации УХУ у нефтегазовых компаний появляется возможность заявлять о добыче некоторого объёма углеродно-нейтральной нефти (при реализации CO₂-EOR) или производстве углеродно-нейтрального СПГ (при реализации проектов по геологическому захоронению / использованию углекислого газа, уловленного на таких мощностях). Участие в углеродно-нейтральных схемах поставок может быть серьёзным стимулом для бизнеса к реализации УХУ там, где это наиболее целесообразно, и представляется важным поддерживать эти устремления на уровне государства.

Необходимость учета «комбинированной ценности» УХУ: экологические и общественные эффекты

Для реализации сложных технологических цепочек УХУ крайне важна не только государственная поддержка, но и учет возникающих взаимодействий и эффектов в системе «проекты УХУ – общество». Большая часть научных исследований и практических мероприятий в рамках данной системы реализуются в области общественного восприятия УХУ. Подчёркивается важность коммуникации и взаимодействия с обществом, направленных

⁴⁷³ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.

на увеличение поддержки таких проектов и повышение необходимого общественного признания.

Вместе с тем, реализация УХУ в долгосрочной перспективе связана с экологическими и различными общественными эффектами, так как способна внести вклад в защиту здоровья человека и окружающей среды. В этом случае полный жизненный цикл технологических цепочек УХУ должен рассматриваться в контексте общего общественного эффекта, который они могут создать. Учитывая вышесказанное, в предыдущих работах автора было определено и доказано двунаправленное взаимодействие между УХУ и обществом, включая общественное восприятие проектов и связанные с ним аспекты, а также общественные эффекты (см. рисунок 5.8).



Рисунок 5.8 – Двунаправленное взаимодействие в системе «проекты УХУ – общество»

Источник: составлено автором.

В свете такого расширенного восприятия УХУ государству и компаниям следует рассматривать их более широко, в первую очередь, с точки зрения общественного эффекта и дополнительной ценности для бизнеса и общества, которую они могут создать в долгосрочной перспективе. В исследовании автора настоящей работы⁴⁷⁴ такая рекомендация подкреплена предложенной системой индикаторов для оценки общественных эффектов УХУ, а также подходом VAS (value-at-stake analysis) для определения общей «совокупной ценности» УХУ.

⁴⁷⁴ Ilinova A., Romasheva N., Cherepovitsyn A. CC(U)S Initiatives: Public Effects and “Combined Value” Performance // Resources. – 2021. – Vol. 10 (6). – P. 61. – DOI: 10.3390/resources10060061.

Использование предлагаемых инструментов направлено на то, чтобы рассматривать подобные инициативы более широко, а не только как опцию сокращения выбросов CO₂. Если обратить внимание на то, как такие проекты могут повлиять на общество и другие отрасли, их ценность возрастает. Проекты следует рассматривать в связке с такими эффектами, как создание новых рабочих мест, поддержание функционирования традиционных промышленных и энергетических мощностей, развитие территорий наряду с целями по снижению выбросов ПГ. Кроме того, они могут внести вклад в формирование экологического сознания и соответствующих ценностей в обществе. Не только безопасность УХУ, но и потенциальные общественные эффекты и другие ценности должны быть в центре внимания при их популяризации. Такая информация должна быть представлена на сайтах государственных структур, компаний и проектов, а также донесена до бизнеса и общества другими способами (на конференциях, образовательных курсах и семинарах и т.д.).

Восприятие УХУ в более широком контексте играет важную роль при принятии решений, позволяет более объективно оценивать инвестиции в УХУ. Известно, что интересы бизнеса часто не коррелируют с экологическими инициативами. Тем не менее, растущие требования к экологической и социальной ответственности бизнеса обязывают учитывать такие факторы, как воздействие на окружающую среду и здоровье человека.

Общий ориентир по развитию УХУ в России можно сформулировать следующим образом: обеспечение экономической жизнеспособности проектов по улавливанию и хранению углерода для достижения экологических и сопутствующих общественных эффектов, а также накопление опыта в области реализации полных технологических цепочек для последующей потенциальной готовности промышленных компаний к реализации вклада в сокращение выбросов ПГ и решение климатических задач.

5.4.3 Развитие УХУ: широкий контекст

УХУ и циркулярные производственные цепочки

Развитие УХУ станет существенным вкладом в формирование циркулярных производственных цепочек, направленных на повторное использование и переработку материалов и ресурсов по всей цепочке создания стоимости. В данном случае речь идёт о циркулярности процессов обращения с CO₂. Уровень развития технологий на сегодня не позволяет говорить о том, что такие цепочки формируются; вместе с тем, вся деятельность по развитию этого направления, в конечном счёте, может привести к их постепенному появлению. Практически все технологические решения по утилизации CO₂ находятся на зарождающейся стадии, и сегодня, когда часть технологий уже доказала свою готовность к использованию в лабораторных условиях, внедрение таких решений в промышленных масштабах является дорогостоящим по сравнению с традиционными методами производства. Для развития технологий утилизации углекислого газа, которые могут внести вклад в циркулярность в этой области, нужна серьёзная государственная поддержка, исследования и разработки⁴⁷⁵. Вместе с тем, в научной литературе и экспертных материалах по теме уже встречается понятие «циркулярной углеродной экономики», основанной на улавливании и повторном использовании углерода в сочетании с промышленным кластерным подходом, которую связывают с «созданием устойчивых рабочих мест и обеспечением низкоуглеродного стимула для экономики»⁴⁷⁶.

Перспективы производства продукции на основе CO₂

Концептуально технологии утилизации углекислого газа уже сегодня рассматриваются как основа формирования циркулярной углеродной экономики. Вместе с тем, при более глубоком взгляде на проблему такие положения частично

⁴⁷⁵ Кузнецова Е. А., Череповицына А. А. Утилизация углекислого газа и циркулярная экономика: мир, Россия, Арктика // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2021. – № 4. – С.42-55. – DOI: 10.37614/2220-802X.4.2021.74.004.

⁴⁷⁶ Углеродно-нейтральные энергоёмкие отрасли промышленности. Технологический обзор // UNECE. – 2023. – 24 p. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_RU_draft_1.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

можно подвергнуть критике по причине того, что утилизация CO₂ по большинству направлений не приводит к изоляции углекислого газа от земного углеродного цикла. В большей степени это связано с коротким жизненным циклом продукции на основе CO₂, а также с источником используемого CO₂ и энергообеспечением всего процесса. Последнее зачастую связывают с возможностью использования и стоимостью ВИЭ, что должно учитываться при прогнозах и оценках относительно развития производства продукции на основе CO₂ в будущем.

Очевидно, что интерес компаний к проектам полезного использования CO₂ сегодня зависит от их экономической жизнеспособности. Укрупненная экономическая оценка потенциального проекта по производству метанола на основе CO₂ как варианта связанной диверсификации нефтегазовой компании показала, что минимальная цена продажи такого метанола должна быть порядка 1 200 долл./т для окупаемости проекта при средней цене традиционного метанола около 400 долл./т, что в текущих условиях делает продукт крайне неконкурентоспособным⁴⁷⁷. При этом в моделируемом в работе автора кейсе продукт представляется углеродно-нейтральным, так как выбросы CO₂ при сжигании метанола могут компенсироваться улавливанием CO₂. Такой подход предполагает полную независимость и экономическую окупаемость нового низкоуглеродного бизнеса, которая в текущий момент достижима только в случае, если потенциальные покупатели готовы платить больше за низкоуглеродные аналоги. Действующие сегодня меры регулирования неспособны оказать значительного влияния на экономику таких проектов. Очевидным становится потребность в снижении затрат по основным статьям – стоимости производства водорода, которая напрямую зависит от стоимости производства электроэнергии с ВИЭ и стоимости установки улавливания⁴⁷⁸. Для развития подобных технологий в таких странах, как Россия, в первую очередь необходимо «научиться» улавливать CO₂ с затратами, соответствующими

⁴⁷⁷ Cherepovitsyna A., Kuznetsova E., Popov A., Skobelev D. Carbon Capture and Utilization Projects Run by Oil and Gas Companies: A Case Study from Russia // Sustainability. – 2024. – Vol. 16. – P. 6221. – DOI: 10.3390/su16146221.

⁴⁷⁸ Там же.

мировым практикам, а также продолжать работу над снижением стоимости ВИЭ. В настоящее время отсутствуют меры по стимулированию спроса для создания рынков продукции с низким уровнем выбросов ПГ не только в России, но и в мире. Спрос на такие продукты может внести существенный вклад в формирование коммерческой основы реализации таких инициатив и создаст возможности для продажи продукции, например, топлива, цемента, железа и стали с низким уровнем выбросов ПГ, с премией.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5

Энергетические объекты являются крупнейшими стационарными источниками выбросов ПГ в мире, а теплоэлектростанции, работающие на угле, ответственны почти за половину общих выбросов энергетики. В России около 14 % от общего объёма производства электроэнергии приходится на угольные электростанции. Такие объекты во многих регионах играют критическую роль для энергообеспечения, и любой другой альтернативы в ближайшем будущем не предвидится. В таких случаях адаптация мощностей улавливания углекислого газа может быть единственным доступным направлением для снижения выбросов ПГ. В качестве модельного объекта для оценки затрат на улавливание была выбрана Апатитская ТЭЦ в Мурманской области. Ряд расчётов был проведён с использованием разработанного автором программного продукта⁴⁷⁹.

Стоимостная оценка была основана на расчёте увеличения нормированной стоимости энергии (LCOE) при внедрении системы улавливания CO₂ на электростанции, а также стоимости 1 т предотвращённых выбросов. Проведённые в рамках работы расчеты показали, что в текущих условиях

⁴⁷⁹ Патент № RU 2022684000. Программа для оценки удельных затрат на секвестрацию углекислого газа по стадиям технологического цикла (с учетом требуемой нормы доходности): № 2022683584: заявл. 01.12.2022; опубл. 09.12.2022. Бюл. № 12 / Череповицына А. А., Кузнецова Е. А., Усиков Д. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН). – Python, 257 МБ.

при отсутствии мер государственной поддержки улавливание углекислого газа на Апатитской ТЭЦ увеличит стоимость электроэнергии практически в два раза, а стоимость 1 т предотвращённых выбросов является крайне высокой – почти 17 000 руб. Расчётная стоимость 1 т предотвращённых выбросов на Апатитской ТЭЦ в России в три и более раз выше, чем на действующих объектах-аналогах по миру, в ценах 2023 года. Это связано, прежде всего, с существенными капитальными затратами на установку улавливания, малой мощностью объекта, высоким энергопотреблением установки и более высокими удельными выбросами CO_2 от углей кузнецкого бассейна по сравнению со среднемировыми значениями. В целом, единичные проекты улавливания в регионе без последующего использования CO_2 характеризуются существенным увеличением стоимости электроэнергии на объекте и высокой стоимостью 1 т предотвращённых выбросов. В модели также учтено возможное действие налога на выбросы ПГ, которое показало, что изменение затрат за счет экономии на налоге будет незначительным – около 7 %. Применение механизма «контракты на разницу» требует существенных затрат со стороны государства.

Моделирование межотраслевой цепочки УХУ с использованием уловленного CO_2 для повышения нефтеотдачи (EOR) и применением элементов кластерного подхода к ее организации с последующей оценкой экономической эффективности ее функционирования показало, что такой проект не является экономически эффективным. Расчёт показал, что потенциальная экономия на налоге на выбросы ПГ в случае его действия также не позволит проекту стать окупаемым. Применение налоговой льготы “45Q” с действующей в настоящий момент в США ставкой в 60 долл. за 1 т CO_2 , уловленного и применяемого в целях CO_2 -EOR, значительно улучшает экономические показатели проекта, но требует существенных затрат со стороны государства, как и предыдущая мера поддержки.

Успешность УХУ как опции декарбонизации, связанной с существенными затратами и пока еще имеющей серьёзные препятствия для развития, во многом зависит от государства, что было показано на примере стран-лидеров в данной

работе. В странах-лидерах по развитию УХУ проводимая политика отличается комплексностью. В России основными группами мер, которые следует развивать для начала реализации цепочек УХУ в промышленном секторе, являются меры, направленные на создание и развитие нормативной базы, обеспечивающей правовую основу реализации технологических цепочек УХУ, и меры по снижению затрат и поддержке доходной части проектов. Особого внимания заслуживают такие механизмы, как налоговые льготы и контракты на разницу, что обосновано в рамках работы.

В целом, важной является поддержка таких инициатив на разных уровнях, развитие технологий улавливания, создание типовых установок улавливания, реализация проектов в рамках кластеров и хабов, что, в конечном счете, будет влиять на улучшение их экономических показателей. На сегодняшний день именно экономические причины являются основными препятствиями на пути активного масштабирования УХУ. Для увеличения темпов развития технологических цепочек улавливания и хранения углерода необходимо системное совершенствование государственного регулирования и скоординированные действия всех участников процесса.

При подготовке данной главы диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования (1-9), а также иные публикации (10):

1. Череповицына А. А. Снижение выбросов парниковых газов: от глобального контекста к стоимостной оценке улавливания углекислого газа в Арктике // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2025. – № 2. – С. 148–163. – DOI: 10.37614/2220-802X.2.2025.88.010.

2. Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81).– С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181.

3. Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – Т. 1. – №. 57. – С. 169-174.
4. Череповицына А. А., Череповицын А. Е., Кузнецова Е. А. Проекты улавливания, хранения и использования CO₂ и их экономическая целесообразность // ЭКО. – 2024. – Т. 54. – № 1. – С. 117-131. – DOI: 10.30680/ЕСО0131-7652-2024-1-117-131.
5. Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.
6. Cherepovitsyna A., Kuznetsova E., Guseva T. The costs of CC(U)S adaptation: The case of Russian power industry // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9 (1). – P. 704-710. – DOI: 10.1016/j.egyр.2022.11.104.
7. 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. – DOI: 10.3390/en16083575.
8. Pinova A., Romasheva N., Cherepovitsyn A. CC(U)S initiatives: Public effects and “combined value” performance // Resources. – 2021. – Vol. 10. – No. 6: 61. – 1-20 p. – DOI: 10.3390/resources10060061.
9. Ильинова А. А., Ромашева Н. В., Стройков Г. А. Перспективы и общественные эффекты проектов секвестрации и использования углекислого газа // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 493-502. – DOI: 10.31897/PMI.2020.4.12.
10. Череповицына А. А. Улавливание и использование углекислого газа: экономика проектов в условиях России // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия «Экономика». – 2025. – Т. 1. – № 51. – С. 40–48. – DOI: 10.17122/2541-8904-2025-1-51-40-48.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на сегодня концепция устойчивого развития стала комплексной категорией, заложившей основу для формирования новых направлений, моделей экономики, процессов и состояний развития различных систем. Одной из составляющих общей системы обеспечения устойчивого развития объектов различных уровней является деятельность по снижению выбросов ПГ, и промышленность в этом процессе играет ключевую роль. В результате проведённых исследований уточнено понятие декарбонизации промышленных систем, которая представляет собой планомерное снижение выбросов ПГ на уровне рассматриваемой системы (промышленного объекта, компании, комплекса) посредством реализации мер, направленных на предотвращение и/или «избегание» выбросов⁴⁸⁰. Обосновано, что деятельность по декарбонизации должна реализовываться посредством поиска, оценки, обоснования и внедрения конкретных доступных решений, направленных на снижение выбросов ПГ в атмосферу. При этом планирование деятельности по декарбонизации следует осуществлять с ориентацией на предложенную в работе терминологическую систематику иерархического характера с выделением таких категорий, как «направление декарбонизации», «группа опций декарбонизации», «опции декарбонизации», «технологии декарбонизации»⁴⁸¹. При этом направления и группы опций декарбонизации определяют общие цели и задачи по декарбонизации, а конкретные опции и технологии представляют собой средства для их достижения⁴⁸².

Деятельность по декарбонизации приводит к низкоуглеродной трансформации бизнеса на стратегическом и операционном уровнях. В работе

⁴⁸⁰ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

⁴⁸¹ Там же.

⁴⁸² Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310

исследованы ключевые положения такой низкоуглеродной трансформации на примере нефтегазовых компаний. Выявлено, что: 1) все компании на основе сформулированных стратегий делятся на три группы (традиционные нефтегазовые, энергетические и «зеленые»); 2) в зависимости от выбранной стратегии компании определяют цели декарбонизации, которые обычно получают отражение в рамках климатических целей, и определяют границы ответственности нефтегазового бизнеса; 3) компании определяют приоритетные направления декарбонизации, декларируют диверсификацию на различных уровнях как основной способ достижения целей декарбонизации, что реализуется, в конечном счёте, через портфель проектов декарбонизации. Примерами традиционных нефтегазовых компаний являются крупнейшие российские компании – ПАО «НК «Роснефть», ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Газпром нефть», а также американская компания “Occidental”. К энергетическим можно отнести ряд европейских и американских компаний, таких как “BP”, “Chevron”, “Repsol”, “Shell”, “Equinor” и др. Среди проанализированных компаний выявлена только одна «зеленая» – “Neste”. Так, все крупнейшие российские компании придерживаются стратегии традиционных нефтегазовых игроков, и именно их деятельность по декарбонизации явилась предметом дальнейших исследований.

Планирование деятельности по снижению выбросов ПГ традиционных нефтегазовых компаний необходимо реализовывать с ориентацией на предложенную систематизацию доступных опций декарбонизации, включающую четыре направления⁴⁸³: 1) совершенствование операционной деятельности; 2) переход на низкоуглеродные источники энергии; 3) работа с попутными компонентами и отходами производства; 4) использование способов корпоративного управления. Приоритетными опциями декарбонизации должны быть такие решения, которые позволяют сохранять ориентацию на традиционные виды деятельности с одновременным снижением выбросов ПГ. Одним из направлений, позволяющих реализовать такую комбинацию, являются

⁴⁸³ Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

технологии УХУ. С учетом межотраслевого характера проекты УХУ «работают» по направлению декарбонизации нефтегазовых компаний, а также компаний других отраслей промышленности. Следует подчеркнуть, что УХУ относятся к опциям декарбонизации, которые направлены на предотвращение попадания уже образовавшегося углекислого газа в атмосферу и позволяют двигаться к углеродной нейтральности постепенно, без радикальных изменений в промышленных и энергетических процессах. Обосновано, что с учетом специфики производственной деятельности и межотраслевого характера опций УХУ участие нефтегазовых компаний в таких проектах может осуществляться в рамках полного участия во всей технологической цепочке посредством создания консорциума либо в виде частичного участия с выделением этапа транспортировки и хранения в качестве независимого проекта, реализуемого нефтегазовой компанией, с установлением договорных отношений с предприятием-эмитентом.

В мире накоплены некоторые теоретические и практические знания об УХУ, что с научной точки зрения является предпосылкой для их технико-экономического обобщения. В работе предлагаются основы такого обобщения с выделением трёх групп признаков: 1) базовые; 2) технологические; 3) организационно-экономические. Такая разработка может служить основой для систематизации существующих и планируемых к реализации технологических цепочек УХУ, определения их основных характеристик, сравнения, а также призвана поддержать процессы принятия управленческих решений на различных стадиях.

Оценки относительно будущего развития УХУ являются крайне неопределёнными, при этом в экспертном сообществе им отводят одну из ключевых ролей при движении к углеродной нейтральности. На основе консенсус-прогноза определено, что доля УХУ в общей карте декарбонизации при условии достижения нулевых выбросов к 2050 году должна составить порядка 16 %, то есть необходимо существенное увеличение мощностей

улавливания и хранения углерода с текущих 40-50 Мт до 5,8 Гт CO₂ в год к 2050 году, что представляется трудно реализуемой задачей.

Проекты УХУ по своей сути лишь косвенно связаны с получением дохода, а в ряде случаев, когда предусмотрено только геологическое хранение, он отсутствует. Потенциальные доходы от повышения нефтеотдачи, как показывает мировой опыт, лишь частично могут компенсировать затраты на функционирование всей цепочки, а текущих мер государственного регулирования в большей части стран недостаточно для развития проектов на коммерческой основе. Ключевым сдерживающим фактором для развития УХУ является высокая стоимость всей технологической цепочки, что обуславливает необходимость исследования потенциала сокращения затрат.

Исследование подходов к оценке затрат, уровень затрат по этапам технологической цепочки по различным отраслям-адаптерам технологий позволили условно разделить отрасли на «дорогие» и «дешёвые». Доказано, что уровень затрат в различных отраслях и при разных вариантах построения технологической цепочки на каждом этапе определяется набором факторов, определяющих стоимость его реализации и потенциал сокращения издержек. Управление выявленными факторами потенциала сокращения затрат на УХУ, а также меры государственной поддержки комплексного характера в условиях ограниченного набора возможных вариантов получения дохода являются ключевыми условиями для экономической жизнеспособности проектов, что должно учитываться при планировании таких проектов. Все это обуславливает критическую роль формирования и развития соответствующей государственной политики в России для активизации деятельности в области УХУ.

Выявлено, что зачастую в реализации проектов УХУ задействованы компании двух и более отраслей промышленности, что позволяет сформулировать идею о том, что технологические цепочки УХУ могут функционировать в рамках уникальных межотраслевых комплексов, которые представляют собой особый объект управления. Развитие таких комплексов происходит под воздействием совокупности факторов, специфических для

каждого случая, а их функционирование осуществляется в рамках конструкций, формирующихся в основном в зависимости от особенностей промышленных и энергетических процессов, расположения мощностей, уровня развития технологий и прочих факторов. При этом при развитии и масштабировании УХУ в глобальном масштабе происходит переход от конструкций первого поколения к конструкциям второго поколения, обусловленный рядом модельных преобразований, идентифицированных в данной работе. Такие модельные преобразования и трансформации характерны как для глобального масштаба, так и при развитии УХУ в масштабе страны.

Вероятно, что развитие УХУ в России будет происходить в виде конструкций первого поколения и ее элементов. Проведённая оценка применимости основных конструкций к условиям России показала, что актуальными и возможными к реализации являются конструкции, ориентированные на интеграцию УХУ на объектах энергетики, а именно: на угольных электростанциях, а также в нефтегазовом комплексе – на месторождениях в виде опции CO₂-EOR и нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах как источниках выбросов. При этом стратегические компоненты, определяющие долгосрочное развитие УХУ в России, можно определить в четыре группы⁴⁸⁴ – это 1) стоимость улавливания углекислого газа, 2) транспортная инфраструктура, 3) инфраструктура хранения, 4) государственное регулирование. Важно, что в целом Россия обладает рядом благоприятных предпосылок для развития УХУ, но таких предпосылок недостаточно для реализации проектов. Основопологающим условием является формирование соответствующих мер и институциональной среды, способствующих легитимной и экономически жизнеспособной деятельности по улавливанию и хранению углерода в промышленном секторе России.

Объекты энергетики, вероятнее всего – угольные электростанции, а также нефтегазовые компании станут первыми мощностями-адаптерами УХУ в России.

⁴⁸⁴ Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81). – С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181

Реализацию технологических цепочек целесообразно осуществлять в виде создания кластеров в экономически развитых нефтепромышленных районах с возможностью улавливания углекислого газа из нескольких источников выбросов вблизи нефтегазовых месторождений и использовать его для повышения нефтеотдачи пластов для компенсации части затрат на УХУ. Вместе с тем, такие модели реализации УХУ могут быть экономически целесообразными только при развитии мер государственной политики комплексного характера, особенно в части мер, направленных на снижение затрат и поддержку доходов там, где это необходимо. Основными заслуживающими внимания и доказавшими свою эффективность являются налоговые льготы и контракты на разницу. На примере моделирования, оценки затрат на улавливание углекислого газа на Апатитской ТЭЦ и экономического обоснования полной технологической цепочки УХУ в Приволжье с использованием CO_2 для повышения нефтеотдачи показано, что общие меры, такие как налог на выбросы ПГ, не могут оказать существенного влияния на экономику проектов, тогда как налоговые льготы (аналог "45Q") и контракты на разницу (при применении к ценам на электроэнергию) могут стать существенными стимулами, так как способны сделать проекты окупаемыми. Вместе с тем, реализация таких мер требует существенных затрат со стороны государства.

В работе предложено рассматривать проекты УХУ более широко, а не только как опцию сокращения выбросов CO_2 . Если обратить внимание на то, как такие проекты могут повлиять на общество и другие отрасли, их ценность возрастает. Проекты следует рассматривать в связке с такими эффектами, как создание новых рабочих мест, поддержание функционирования традиционных промышленных и энергетических мощностей, развитие территорий наряду с целями по снижению выбросов ПГ. Кроме того, они могут внести вклад в формирование экологического сознания и соответствующих ценностей в обществе. Не только безопасность УХУ, но и потенциальные общественные эффекты должны быть в центре внимания при принятии решения, касающегося их реализации.

Общий ориентир по развитию УХУ в России можно сформулировать следующим образом: обеспечение экономической жизнеспособности проектов по улавливанию и хранению углерода для достижения экологических и сопутствующих общественных эффектов, а также накопление опыта в области реализации полных технологических цепочек для последующей потенциальной готовности промышленных компаний к реализации вклада в сокращение выбросов ПГ и решение климатических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апатитская ТЭЦ // ТГК-1. – 2023. – URL: <https://www.tgc1.ru/?id=165> (дата обращения: 22.10.2023).
2. Башмаков И. А., Башмаков В. И., Борисов К. Б., Дзедзичек М. Г., Лунин А. А., Мышак А. Д. Россия на траектории углеродной нейтральности // Центр энергоэффективности – XXI век (ЦЭНЭФ-XXI). – 2022. – 133 с. – URL: <https://www.skolkovo.ru/centres/senec/senec-research-russia-on-the-trajectory-of-carbon-neutrality/> (дата обращения: 05.06.2024).
3. Башмаков И. А. Декарбонизация глобальной и российской промышленности и низкоуглеродное регулирование / Семинар ИМЭМО РАН и ЦЭНЭФ-XXI «Декарбонизация глобальной и российской промышленности и низкоуглеродное регулирование». – 2022. – URL: https://cenef-xxi.ru/uploads/1_I_Bashmakov_Dekarbonizacziya_globalnoj_i_rossijskoj_promyshlennosti_887003ef32.pdf (дата обращения: 01.03.2023).
4. Бергфельдт Т. Сокращение углеродного следа в горнодобывающей и металлургической отрасли: как разработать стратегию и дорожную карту декарбонизации / Т. Бергфельдт, С. Брок // Золото и технологии. – 2021. – № 2 (52). – URL: https://zolteh.ru/technology_equipment/sokrashchenie_uglerodnogo_sleda_v_gornodobyvayushchey_i_metallurgicheskoy_otrasli_kak_razrabotat_str/?ysclid=lnbth15cej251197811 (дата обращения: 04.03.2023).
5. Бобылев С. Н. Экономика устойчивого развития: учебник. – М.: Кнорус, 2021. – 672 с.
6. Бобылев С. Н., Соловьева С. В., Ховавко И. Ю. Экологические конфликты в зеркале "цивилизации максимизации" // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Гуманитарные науки. – 2021. – Т. 14, № 7. – С. 956-965. – DOI: 10.17516/1997-1370-0775.
7. Ветрова М. А., Пахомова Н. В., Рихтер К. К. Стратегии развития российской энергетики в условиях климатических вызовов и геополитической

нестабильности // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2023. – Т. 39, № 4. – С. 439-469. – DOI: 10.21638/spbu05.2023.401.

8. Выбросы металлургической промышленности / Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. Том 3: Промышленные процессы и использование продуктов / Д. Маркс, Д. Любетски, Б. А. Штайнер и др. – Женева, 2006. – Гл. 4. – С. 4.1.-4.94. – URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/3_Volume3/V3_4_Ch4_Metal_Industry.pdf (дата обращения: 01.02.2024).

9. Геологическое хранение CO₂ в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии: первичный анализ потенциала и политики // UNECE. – 2021. – 35 с. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2021-04/Geologic%20CO2%20storage%20report_final_RU.pdf (дата обращения: 10.07.2023).

10. Глазьев С. Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития. – М.: ВладДар, 1993. – 310 с.

11. Гурьянова Д. А., Плотников В. А. Эффективность управления в условиях политико-экономической турбулентности // Вестник РГГУ. Серия Экономика. Управление. Право. – 2024 – №2. – С. 70-84. – DOI: [10.28995/2073-6304-2024-2-70-84](https://doi.org/10.28995/2073-6304-2024-2-70-84).

12. Данилин К. П., Череповицына А. А., Белошицкий А. В. Об отчетности нефтегазовых компаний о выбросах парниковых газов по сфере охвата 3 // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 5. – С. 139-144. – DOI: 10.24887/0028-2448-2023-5-139-144.

13. Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России // Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. – 2021. – 158 с. – URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Decarbonization_of_oil_and_gas_RU_22032021.pdf (дата обращения: 05.04.2023).

14. Добровольный национальный обзор хода осуществления Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года // Аналитический центр

при Правительстве Российской Федерации. – 2020. – 238 с. – URL: <https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/analitika/DNO.pdf> (дата обращения: 10.04.2023).

15. Доброхотова М. В., Матушанский А. В. Применение концепции наилучших доступных технологий в целях технологической трансформации промышленности в условиях энергетического перехода // Экономика устойчивого развития. – 2022. – № 2 (50). – С. 63–68.

16. Доброхотова М. В., Скобелев Д. О. Организационно-экономический механизм регулирования углеродоемкости в промышленности // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/26ECVN123.pdf>.

17. Дорожка 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.

18. Евсеева О. О., Ильинова А. А., Череповицын А. Е. Согласование интересов ключевых стейкхолдеров при реализации проектов секвестрации CO₂ // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2018. – Т. 4. – № 60. – С. 133-141. – DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.4.2018.60.133-141

19. Жукоцкая А. В., Черненькая С. В. Глобальные вызовы современности и духовный выбор // Вестник МГПУ. Серия «Философские науки». – 2023. – № 2 (46). – С. 23-31. – DOI: 10.25688/2078-9238.2023.46.2.2.

20. Зеленые проекты // Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики». – 2022. – 156 с. – URL: https://eipc.center/wp-content/themes/fgau/publics/eipc_green_case_31.pdf (дата обращения: 10.06.2024).

21. Ильинова А. А., Соловьева В. М. Стратегическое планирование и прогнозирование: изменение сущности и роли в условиях нестабильности энергетического сектора // Север и рынок: формирование экономического

порядка. – 2021. – Т. 24. – № 2 (72). – С. 56-68. – DOI: 10.37614/2220-802X.2.2021.72.005

22. Ильинский А. А., Калинина О. В., Хасанов М. М., Афанасьев М. В., Сайтова А. А. Декарбонизация нефтегазового комплекса: приоритеты и организационные модели развития // Север и рынок: формирования экономического порядка. – 2022. – № 1. – С. 33–46. – DOI: 10.37614/2220-802X.1.2022.75.003.

23. Калмацкий М. Россия продолжает последовательно идти к углеродной нейтральности // Российская газета. – 2023. – URL: <https://rg.ru/2023/10/16/umnozhenie-na-nol.html> (дата обращения: 05.06.2024).

24. Клубков С. CCUS: монетизация выбросов CO₂ / С. Клубков, К. Емельянов, Н. Зотов // VYGON Consulting. – 2021. – 47 с. – URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/967/jzgy572b7ome167wi4dbao9fnsqsfj13/vygon_consulting_CCUS.pdf (дата обращения: 01.03.2023).

25. Колпаков А. Ю. Энергоэффективность: роль в сдерживании выбросов углекислого газа и определяющие факторы // Проблемы прогнозирования. – 2020. – № 6. – С. 141-153. – DOI: 10.47711/0868-6351-183-141-153.

26. Кудрявцева О. В., Ситкина К. С., Барабошкина А. В. Индикаторы перехода России к низкоуглеродному развитию // География и природные ресурсы. – 2023. – Т. 44, № 3. – С. 144-155. – DOI: 10.15372/GIPR20230315.

27. Кузнецова Е. А., Рядинская А. П., Череповицына А. А. Аналитический обзор и систематизация доступных опций декарбонизации нефтегазового бизнеса // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2023. – Т. 18. – № 3. – С. 292–310. – DOI: 10.17072/1994-9960-2023-3-292-310.

28. Кузнецова Е. А., Череповицына А. А. Утилизация углекислого газа и циркулярная экономика: мир, Россия, Арктика // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2021. – № 4. – С.42-55. – DOI: 10.37614/2220-802X.4.2021.74.004.

29. Купцов Н. В., Самодуров М. С. Углеродно-нейтральный сжиженный природный газ — текущий статус, перспективы и методы снижения углеродного

следа // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2023. – Т. 8. – № 1. – С. 138-146. – DOI: 10.51890/2587-7399-2023-8-1-138-146.

30. Лицзюань Ч., Пономаренко Т. В., Сидоров Д. В. Оценка чистых угольных технологий с применением технологии улавливания, утилизации и хранения углерода в угольной промышленности Китая // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 2. – С. 105-128. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_2_0_105.

31. Макаров И. А. Сокращение выбросов парниковых газов и энергоэффективность российской экономики // Бюллетень «На пути к устойчивому развитию России». – 2014. – № 68. – С. 19-26.

32. Маликова О. И., Кирюшин П. А., Николаева А. В. Технологические детерминанты трансформации возобновляемой энергетики и государственной поддержки развития энергетической отрасли // Управленческие науки = Management Sciences in Russia. – 2021. – Т. 11(1). – С. 35-50. – DOI: 10.26794/2404-022X-2021-11-1-35-50.

33. Мелехин Е. С. О совершенствовании институциональной среды развития нефтегазового комплекса России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2023. – № 1(180). – С. 53–56.

34. Методические рекомендации по обоснованию выбора участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – 2023. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115498> (дата обращения: 13.10.2023).

35. Методические рекомендации по обоснованию пригодности участков недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, с целью размещения углекислого газа // Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых: официальный сайт. – 2023. – URL: https://gkz-rf.ru/sites/default/files/docs/mr_po_vyboru_uchastkov_so2.pdf?ysclid=ls1vp2p8ea789587638 (дата обращения: 01.03.2024).

36. Милькин В. В России к 2050 году доля угля в генерации энергии может вырасти / В. Милькин, А. Волобуев // Ведомости. – 2023. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/08/25/991818-v-rossii-k-2050-godu-dolya-uglya-v-generatsii-energii-mozhet-virasti> (дата обращения: 29.03.2023).
37. Мировой и российский рынок энергетического угля // Neft Research. – 2023. – 8 с. – URL: <https://neftresearch.ru/wp-content/uploads/2024/01/5neft-research.-global-and-russian-coal-markets.-forecast.pdf> (дата обращения: 25.10.2023).
38. Моделирование и прогнозирование мировой динамики / В. А. Садовничий, А. А. Акаев, А. В. Коротаев, С. Ю. Малков. – М.: ИСПИ РАН, 2012. – 359 с.
39. Никоноров С. М. Специфика современных социально-экономических процессов и экологических проблем регионов АЗРФ // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. – 2023. – № 4 (75). – С. 20–25. – DOI: 10.52897/2411-4588-2023-4-20-25.
40. Новиков Д. А., Дульцев Ф. Ф., Юрчик И. И., Садыкова Я. В., Деркачев А. С., Черных А. В., Максимова А. А. Региональный прогноз перспектив реализации проектов CCUS на территории Российской Федерации / Материалы XVIII международной научной конференции Интерэкспо ГЕО-Сибирь – «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология», 18-20 мая 2022 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГУГиТ, 2022. – Т. 2. – №. 1 – С. 248-255.
41. Об ограничении выбросов парниковых газов: Федеральный закон Российской Федерации от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 05.07.2021 г.
42. Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зелёного) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе зелёного) развития в Российской Федерации: Постановление Правительства Российской Федерации от 21.09.2021 г. № 1587 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 04.10.2021 г.

43. Об утверждении рекомендаций «круглого стола» Комитета Государственной Думы по энергетике на тему «Роль топливно-энергетического комплекса в реализации новой климатической политики Российской Федерации. Наилучшие корпоративные практики»: Решение Комитета Государственной Думы по энергетике от 21 февраля 2024 г. № 325-5/101 // Комитет Государственной Думы по энергетике: официальный сайт. – URL: <http://komitet-energo.duma.gov.ru/storage/f11e63e3-91e7-42ea-bb26-8bb1c3bfc7ec/documents/342a33fa-0e19-4753-8dab-3194ba5ce81d/f0be6d74-2582-4feb-a84c-436e67cddf7a.pdf> (дата обращения: 20.03.2024).

44. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2021 г. № 3052-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 08.11.2021 г.

45. Об утверждении целей и основных направлений устойчивого (в том числе зеленого) развития РФ: Распоряжение Правительства РФ от 14.07.2021 г. № 1912-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 26.07.2021 г.

46. О внесении изменений в постановление Комитета по тарифному регулированию Мурманской области от 18.11.2022 № 44/66 в связи с корректировкой тарифов, ранее установленных ПАО "ТГК-1" на 2024 год: Постановление Комитета по тарифному регулированию Мурманской области от 18.12.2023 г. № 49/13 // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/5101202312200009?index=8> (дата обращения: 22.12.2023).

47. Осипцов А. Технологии улавливания, полезного использования и хранения двуокси углерода (CCUS) / А. Осипцов, И. Гайда, Е. Грушевенко, С. Капитонов // Сколковский институт науки и технологий. – 2022. – 79 с. – URL: <https://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2022/11/CCUS-Skoltech-2022-11-10.pdf> (дата обращения: 12.10.2023).

48. О сокращении выбросов парниковых газов: Указ Президента Российской Федерации от 04.11.2020 г. № 666 // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL:

<http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102895994>

(дата обращения: 10.03.2023).

49. О ставке платы за превышение квоты выбросов парниковых газов в рамках проведения эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов на территории Сахалинской области: Постановление Правительства Российской Федерации от 18.08.2022 г. № 1441 // Официальный интернет-портал правовой информации. –

URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208190038>

(дата обращения: 20.03.2024).

50. Охрана окружающей среды в России: статистический сборник / редкол.: И. В. Васильев. – М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2022. – 115 с. –

URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ochрана_okruj_sredi_2022.pdf

(дата обращения: 27.03.2023).

51. Парижское соглашение к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата от 12 декабря 2015 г., ТIAS № 16-1104 // Организация Объединенных Наций. –

URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf (дата обращения: 04.04.2022).

52. Патент № RU 2022684000. Программа для оценки удельных затрат на секвестрацию углекислого газа по стадиям технологического цикла (с учетом требуемой нормы доходности): № 2022683584: заявл. 01.12.2022; опубл. 09.12.2022. Бюл. № 12 / Череповицына А. А., Кузнецова Е. А., Усиков Д. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН). – Python, 257 МБ.

53. Порфирьев Б. Н. Декарбонизация versus адаптация экономики к климатическим изменениям в стратегии устойчивого развития // Проблемы прогнозирования. – 2022. – №4. – С. 45-54. – DOI: 10.47711/0868-6351-193-45-54.

54. Порфирьев Б. Н., Широ́в А. А., Колпаков А. Ю. Стратегия низкоуглеродного развития: перспективы для экономики России // Мировая экономика и международные отношения. – 2020. – Т. 64. – № 9. – С. 15-25. – DOI: 10.20542/0131-2227-2020-64-9-15-25.

55. Порфирьев Б. Н., Широ́в А. А. Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов: сценарии и реалии для России // Вестник Российской академии наук. – 2022. – Т. 92. – № 5. – С. 415-423. – DOI: 10.31857/S086958732205005X.

56. Потравный И. М., Яшалова Н. Н. Эколого-экономическая оценка технологий захоронения выбросов парниковых газов в подземных геологических пространствах // Горный журнал. – 2022. – № 8. – С. 90-94. – DOI: 10.17580/gzh.2022.08.13.

57. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27 мая 2022 г. № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» // Официальный интернет-портал правовой информации. –

URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034>

(дата обращения: 01.03.2023).

58. Приказ Федеральной антимонопольной службы от 12 декабря 2022 г. № 969/22 «Об утверждении цен (тарифов) на электрическую энергию (мощность), поставляемую в ценовых зонах оптового рынка субъектами оптового рынка – производителями электрической энергии (мощности) по договорам, заключенным в соответствии с законодательством Российской Федерации с гарантирующими поставщиками (энергоснабжающими организациями, энергосбытовыми организациями, к числу покупателей электрической энергии (мощности) которых относятся население и (или) приравненные к нему категории потребителей), в целях обеспечения потребления электрической энергии населением и (или)

приравненными к нему категориями потребителей, а также с определенными Правительством Российской Федерации субъектами оптового рынка – покупателями электрической энергии (мощности), функционирующими в отдельных частях ценовых зон оптового рынка, для которых Правительством Российской Федерации установлены особенности функционирования оптового и розничных рынков, на 2023 год» // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202212210055> (дата обращения: 01.02.2024).

59. Проект Стратегии низкоуглеродного развития и позиция России к 26-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата в Глазго // Министерство экономики развития Российской Федерации. – 2021. – 22 с.

60. Производство электрической энергии // ТГК-1. – 2022. – URL: <https://www.tgc1.ru/production/electricity-production/> (дата обращения: 22.10.2022).

61. Работа Статистической комиссии, связанная с деятельностью по осуществлению Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года: резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей 6 июля 2017 года, A/RES/71/313 / Организация Объединенных Наций. – URL: <https://undocs.org/ru/A/RES/71/313> (дата обращения: 28.03.2023).

62. Рио-де-Жанейрская декларация по окружающей среде и развитию. Принята Конференцией ООН по окружающей среде и развитию, Рио-де-Жанейро, 3–14 июня 1992 года // Организация Объединенных Наций. – URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/decl_environment (дата обращения: 16.03.2023).

63. Ромашева Н. В., Ильинова А. А., Евсеева О. О. Государство как ключевой стейкхолдер в рамках перспектив реализации проектов СС(US) в России // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). Серия: Социально-экономические науки. – 2020. – Т. 13. – № 5. – С. 209–223. – DOI: 10.17213/2075-2067-2020-5-209-223.

64. Росляков П. В., Скобелев Д. О., Доброхотова М. В., Гусева Т. В. Оценка показателей выбросов парниковых газов для угольных теплоэлектростанций в контексте развития углеродного регулирования в Российской Федерации // Уголь. – 2023. – №9 (1171). – DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-84-89.
65. Роснефть анонсирует климатические цели до 2035 года // ПАО «Роснефть»: официальный сайт. – 2020. – URL: <https://www.rosneft.ru/press/releases/item/204425> (дата обращения: 12.10.2023).
66. Рядинская А. П., Череповицына А. А. Утилизация попутного нефтяного газа в России: методы и перспективы производства продуктов газохимии // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2022. – № 2. – С. 19–34. – DOI:10.37614/2220-802X.2.2022.76.002.
67. Сафонов Г. Декарбонизация мировой экономики и Россия // Нефтегазовая вертикаль. – 2020. – № 21-22. – С. 66-70.
68. Сергеева З. В. Четвертый энергетический переход и европейский энергетический кризис: уроки для ЕАЭС // Евразийская интеграция: экономика, право, политика. – 2023. – Т. 17. – № 2. – С. 153–168. – DOI: 10.22394/2073-2929-2023-02-153-168.
69. Сидорова К. И. Разработка технико-экономической модели улавливания CO₂ для энергетического сектора // Экология и промышленность России. – 2014. – № 12. – С. 20-25. – DOI: 10.18412/1816-0395-2014-12-20-25.
70. 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. – DOI: 10.17353/2070-5379/47_2013.
71. Сидорова К. И. Экономическая оценка использования технологии утилизации углекислого газа в нефтяных месторождениях для повышения нефтеотдачи: дис... канд. эк. наук: 08.00.05. – СПб., 2016. – 155 с.
72. Скобелев Д. О., Волосатова А. А., Гусева Т. В., Панова С. В. Применение концепции наилучших доступных технологий в различных системах зеленого финансирования: международный опыт и перспективы использования

в государствах-членах Евразийского экономического союза // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 33.

73. 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. – DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

74. Скуфьина Т. П., Баранов С. В., Самарина В. П. Анализ документов прогнозирования социально-экономического развития российской Арктики // Арктика и Север. – 2022. – № 48. – С. 57–74. – DOI: 10.37482/issn2221-2698.2022.48.57.

75. Совокупные выбросы ПГ // Федеральная служба государственной статистики РФ. – 2024. – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/KI-2.xlsx> (дата обращения: 25.03.2024).

76. Сценарии декарбонизации в России // Центр энергетике Московской школы управления СКОЛКОВО. – 2022. – 19 с. – URL: https://esg-library.mgimo.ru/upload/iblock/3bf/9ax3bsixbuwn690oeobjb4fk3yjoxx477d/SKOLKOV_O_EneC_RU_Decarbonisation_Scenarios_in_Russia.pdf?ysclid=m0ze3z4vze76090848&utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru (дата обращения: 10.06.2024).

77. Толстых Т. О., Шмелева Н. В., Гамидуллаева Л. А., Краснобаева В. С. Роль коллаборации в развитии интеграции промышленных предприятий // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2023. – № 1. – С. 5–36. – DOI: 10.21685/2227-8486-2023-1-1.

78. Углеродное регулирование в России // Министерство экономического развития Российской Федерации. – 2023. – 17 с. – URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/9e904ab98684f07e6efca5f83ba2cfd2/uglerodnoe_regulirovanie_v_rossii.pdf (дата обращения: 12.04.2023).

79. Углеродно-нейтральные энергоемкие отрасли промышленности. Технологический обзор // UNECE. – 2023. – 24 p. –

URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_RU_draft_1.pdf

(дата обращения: 14.03.2024).

80. Уланов В. Л., Скоробогатько О. Н. Влияние трансграничного углеродного регулирования ЕС на экономическую эффективность российской нефтепереработки // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 865-876. – DOI: 10.31897/PMI.2022.83.

81. Цели в области устойчивого развития // ООН: официальный сайт. – 2023. – URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (дата обращения: 16.03.2023).

82. Цены и тарифы // Газпром трансгаз Казань. – 2023. – URL: <https://kazan-tr.gazprom.ru/about/agreement/tseny-i-tarify/> (дата обращения: 29.03.2023).

83. Чвилева Т. А., Ильинова А. А. Особенности взаимодействия с заинтересованными лицами при реализации проектов секвестрации углекислого газа // Российский экономический интернет-журнал. – 2018. – № 4. – URL: <https://www.e-rej.ru/Articles/2018/Chvileva.pdf> (дата обращения: 01.03.2023).

84. Череповицына А. А. Декарбонизация промышленных компаний: от глобальных вызовов к основным направлениям снижения выбросов парниковых газов // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 8. – С. 378-382.

85. Череповицына А. А., Дорожкина И. П., Костылева В. М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов // Экономика промышленности. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 473–487. – DOI: 10.17073/2072-1633-2022-4-473-487.

86. Череповицына А. А., Дорожкина И. П. Организационно-экономические аспекты развития технологий и проектов секвестрации и использования углекислого газа / Сборник материалов XVII международной научно-практической конференции Российского общества экологической экономики «Глобальные вызовы и национальные экологические интересы: экономические и социальные аспекты»; под редакцией Т. О. Тагаевой, Л. К. Казанцевой. – Новосибирск: Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, 2023. – С. 146-152.

87. Череповицына А. А. Улавливание и хранение углекислого газа: концептуальное видение развития технологических цепочек в России // Экономическое возрождение России. – 2024. – № 3 (81).– С. 165-181. – DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181.
88. Череповицына А. А. Улавливание и хранение углерода: меры государственного регулирования, мировой опыт и ситуация в России // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1 (57). – С. 178-183.
89. 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.
90. Череповицын А. Е., Ильинова А. А., Евсеева О. О. Управление стейкхолдерами проектов секвестрации углекислого газа в системе государство – бизнес – общество // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 731. – DOI: 10.31897/PMI.2019.6.731.
91. Череповицын А. Е., Ильинова А. А. Концептуальное представление технологий захоронения углекислого газа и их безопасность // Российский экономический интернет-журнал. – 2014. – № 4. – 16 с.
92. Череповицына А. А., Череповицын А. Е., Кузнецова Е. А. Проекты улавливания, хранения и использования CO₂ и их экономическая целесообразность // ЭКО. – 2024. – Т. 54. – № 1. – С. 117–131. – DOI: 10.30680/ЕСО0131-7652-2024-1-117-131.
93. Шевелева Н. А. Направления и методы декарбонизации нефтегазового сектора // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2023. – Т. 2. – № 311. – С. 25-31. – DOI: 10.33285/2411-7013-2023-2(311)-25-31.
94. Шевелева Н. А. Обязательства по управлению выбросами парниковых газов // Экология производства. – 2023. – №2. – С. 36-45.
95. Электроснабжение. Тарифы и нормативы // Татэнергосбыт. – 2023. – URL: <https://tatenergobyt.ru/supply/tarifs/> (дата обращения: 29.03.2023).

96. Энергопотребление в России в 2023 году составило 1,14 трлн кВт·ч // ТАСС. – 2024. – URL: <https://tass.ru/ekonomika/19814169> (дата обращения: 29.03.2023).

97. Юлкин М. А. Глобальная декарбонизация и ее влияние на экономику России // АНО «Центр экологических инвестиций». – 2023. – URL: http://downloads.igce.ru/news/Yulkin_M_A_ext_abstract_IGCE_06022019.pdf (дата обращения: 16.03.2023).

98. A Review of Global and U. S. Total Available Markets for Carbontech // Center for Carbon Removal. – 2021. – 5 p. URL: <https://static1.squarespace.com/static/5b9362d89d5abb8c51d474f8/t/619d4daeb3c7d55c494b8ea3/1637698990732/ccr04.executivesummary.FNL.pdf> (дата обращения: 12.11.2021).

99. Abramson E. Transport Infrastructure for Carbon Capture and Storage. Whitepaper on Regional Infrastructure for Midcentury Decarbonization / E. Abramson, D. McFarlane, J. Brown // Great Plains Institute. – 2020. – 41 p. – URL: https://www.betterenergy.org/wp-content/uploads/2020/06/GPI_RegionalCO2Whitepaper.pdf (дата обращения: 01.03.2024).

100. Acorn Projects // Acorn. – 2022. – URL: <https://www.theacornproject.uk/projects> (дата обращения: 25.01.2022).

101. Advancing Climate Solutions. 2022 Progress Report // ExxonMobil. – 2022. – 53 p. – URL: <https://drive.google.com/file/d/1P4OdWf7TRPyw9n3SZacZWGxEoV4jQCal/view> (дата обращения: 01.04.2023).

102. Al Reyadah: Project Details // The university of Edinburgh. – 2024. – URL: <https://www.geos.ed.ac.uk/scs/project-info/622> (дата обращения: 05.02.2024).

103. Ausubel J. H. Technical progress and climatic change // Energy Policy. – 2020. – Vol. 23. – Is. 4-5. – P. 411-416. – DOI: 10.1016/0301-4215(95)90166-5.

104. Bataille C G. F. Physical and policy pathways to net-zero emissions industry // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. – 2020. – Vol. 11. – Is. 2. – DOI: 10.1002/wcc.633.
105. Baylin-Stern A. Is carbon capture too expensive? / A. Baylin-Stern, N. Berghout // IEA. – 2021. – URL: <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive> (дата обращения: 24.09.2022).
106. Bazhenov S., Chubokсарov V., Maximov A., Zhdaneev O. Technical and economic prospects of CCUS projects in Russia // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2022. – Vol. 33. – P. e00452. – DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00452.
107. Bechara C. A., Alnouri S. Y. Energy assessment strategies in carbon-constrained industrial clusters // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – Vol. 254. – P. 115204. – DOI: 10.1016/j.enconman.2021.115204.
108. Beck C. The future is now: How oil and gas companies can decarbonize / C. Beck, S. Rashidbeigi, O. Roelofsen, E. Speelman // McKinsey&Company – 2020. – URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-future-is-now-how-oil-and-gas-companies-can-decarbonize> (дата обращения: 01.03.2023).
109. Becker S., Bouzdine-Chameeva T., Jaegler A. The carbon neutrality principle: A case study in the French spirits sector // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 274. – P. 122739. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122739.
110. Bekken S., Schöffel K., Aakenes S. The CLIMIT Program and its Strategy for Norwegian Research, Development and Demonstration of CCS Technology // *Energy Procedia*. – 2013. – V. 37. – P. 6508-6519. – DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.581.
111. Bioenergy and Carbon Capture and Storage // Global CCS Institute. – 2020. – 12 p. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/BIOENERGY-AND-CARBON-CAPTURE-AND-STORAGE_Perspective_New-Template.pdf (дата обращения: 18.03.2024).
112. Borie S., Decq J. Review of voluntary and regulatory carbon reporting by companies around the world // *Carbon* 4. – 2023. – 10 p. – URL: <https://www.carbone4.com/files/wp-content/uploads/2016/09/CARBONE4-carbon-reporting-by-companies-around-the-world-EN.pdf> (дата обращения: 01.03.2023).

113. Boundary Dam Carbon Capture Project // SaskPower. – 2022. – URL: <https://www.saskpower.com/Our-Power-Future/Infrastructure-Projects/Carbon-Capture-and-Storage/Boundary-Dam-Carbon-Capture-Project> (дата обращения: 27.05.2022).
114. BP Energy Outlook: 2022 edition // BP. – 2022. – 109 p. – URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> (дата обращения: 07.05.2023).
115. BP Statistical Review of World Energy 2022: 71st edition // BP. – 2022. – 57 p. – URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf?ysclid=lvwvzx4lyj399425678> (дата обращения: 01.06.2023).
116. Brief. The US Section 45Q Tax Credit for Carbon Oxide Sequestration: An Update // Global CCS Institute. – 2020. – 6 p. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/45Q_Brief_in_template_LL.B.pdf (дата обращения: 15.07.2023).
117. Budinis S., Krevor S., Mac Dowell N., Brandon N., Hawkes A. 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.
118. Building an Energy Future that Is Clean, Affordable & Reliable // World Resource Institute. – 2023. – URL: <https://www.wri.org/energy> (дата обращения: 01.04.2023).
119. Carayannis E. G., Iinova A., Cherepovitsyn A. The Future of Energy and the Case of the Arctic Offshore: The Role of Strategic Management // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9 (2): 134. – DOI: 10.3390/jmse9020134.
120. Carbon capture and storage (CCS) in the middle east – a future powerhouse of the hydrogen industry? // International Centre for sustainable carbon. – 2022. – URL: <https://www.sustainable-carbon.org/carbon-capture-and-storage-ccs-in-the-middle-east-a-future-powerhouse-of-the-hydrogen-industry/> (дата обращения: 02.02.2024).

121. Carbon Capture and Storage in the United States // Congressional Budget Office. – 2023. – 31 p. – URL: <https://www.cbo.gov/system/files/2023-12/59345-carbon-capture-storage.pdf> (дата обращения: 05.08.2023).

122. Carbon Dioxide Utilization Markets and Infrastructure: Status and Opportunities: A First Report // National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.17226/26703>.

123. CCS Facilities Database // Global CCS institute. – 2023. – URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 10.04.2023).

124. CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market // IEA. – 2023. – 121 p. – URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.03.2023).

125. Chain C. P., de Santos A. C., de Castro Júnior L. G., do Prado J. W. Bibliometric analysis of the quantitative methods applied to the measurement of industrial clusters // Journal of Economic Surveys. – 2019. – Vol. 33. – Is. 1. – P. 60-84. – DOI: 10.1111/joes.12267.

126. Characterizing the U.S. Industrial Base for Coal-Powered Electricity / C. Samaras, J. A. Drezner, H. H. Willis, E. Bloom. – Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2011. – 157 p.

127. Chen W., Lu X., Lei Y. Comparison of Incentive Policies for the Optimal Layout of CCUS Clusters in China's Coal-Fired Power Plants Toward Carbon Neutrality // Engineering – 2021. – V. 7. – P. 1692-1695. – DOI: 10.1016/j.eng.2021.11.011.

128. Cherepovitsyn A., Ilinova A. Ecological, economic and social issues of implementing carbon dioxide sequestration technologies in the oil and gas industry in Russia // Journal of ecological engineering. – 2016. – Vol. 17. – Is. 2. – P. 19–23. – DOI: 10.12911/22998993/62281.

129. Cherepovitsyn A. E., Ilinova A. A. Methods and Tools of Scenario Planning in Areas of Natural Resources Management // European Research Studies Journal. – 2018. – Vol. 11. – No. 1. – P. 434-445.

130. Cherepovitsyn A., Fedoseev S., Tsvetkov P., Sidorova K., Kraslawski A. Potential of Russian Regions to Implement CO₂-Enhanced Oil Recovery // *Energies*. – 2018. – Vol. 11 (6). – P. 1528. – DOI: 10.3390/en11061528.

131. Cherepovitsyna A., Kuznetsova E., Guseva T. The costs of CC(U)S adaptation: The case of Russian power industry // *Energy Reports*. – 2023. – Vol. 9 (1). – P. 704-710. – DOI: 10.1016/j.egy.2022.11.104.

132. Cherepovitsyna A., Kuznetsova E., Popov A., Skobelev D. Carbon Capture and Utilization Projects Run by Oil and Gas Companies: A Case Study from Russia // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16. – No. 14: 6221. – DOI: 10.3390/su16146221.

133. Cherepovitsyna A., Sheveleva N., Riadinskaia A., Danilin K. Decarbonization Measures: A Real Effect or Just a Declaration? An Assessment of Oil and Gas Companies' Progress towards Carbon Neutrality // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – P. 3575. – DOI: 10.3390/en16083575.

134. China's Pathway Towards a Low Carbon Economy. CCICED Policy Research Report // China Council for International Cooperation on Environment and Development. – 2009. – 140 p. – URL: http://www.cciced.net/ccicedPhoneEN/Events/AGMeeting/2009_3973/meetingplace_3_974/201609/P020160922381047979521.pdf (дата обращения: 05.03.2022).

135. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC. – 2014. – 151 p. – URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf (дата обращения: 04.04.2023).

136. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC. – 2022. – 2029 p. – URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/> (дата обращения: 15.04.2023).

137. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC. – 2023. – P. 35-115. – DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

138. Cost and performance of carbon dioxide capture from power generation // IEA. – 2011. – 47 p. – URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/d9d7ae5a-a694-4440-bc81-0d20699b45b1/costperf_ccs_powergen.pdf (дата обращения: 24.09.2022).

139. Creating shared value: How to reinvent capitalism—And unleash a wave of innovation and growth // Managing sustainable business: An executive education case and textbook / М. Е. Porter, М. R. Kramer. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2018. – P. 323-346. – DOI: 10.1007/978-94-024-1144-7_16.

140. Delivering a Net Zero Teesside. – 2023. – URL: <https://www.netzeroteesside.co.uk/> (дата обращения: 12.03.2023).

141. Ding D., Dai D., Zhao M. Development of a low-carbon economy in China // International Journal of Sustainable Development and World Ecology. – 2008. – Vol. 15. – P. 331-336. – DOI: 10.3843/SusDev.15.4:7a.

142. DOE Industrial Decarbonization Roadmap // U.S. Department of Energy. – 2023. – URL: [https://www.energy.gov/eere/doi-industrial-decarbonization-roadmap#:~:text=The%20crosscutting%20decarbonization%20pillars%20are,%2C%20and%20storage%20\(CCUS\)](https://www.energy.gov/eere/doi-industrial-decarbonization-roadmap#:~:text=The%20crosscutting%20decarbonization%20pillars%20are,%2C%20and%20storage%20(CCUS)) (дата обращения: 01.03.2023).

143. Doran G. T. There's a S.M.A.R.T. Way to Write Management's Goals and Objectives // Management Review. – 1981. – Vol. 70. – P. 35-36.

144. Electricity Data Explorer // Ember. – 2022. – URL: <https://ember-climate.org/data/data-explorer/> (дата обращения: 24.09.2022).

145. Eliminating World Poverty: Building our Common Future // Department for International Development. – 2009. – 150 p. – URL: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7b831a40f0b645ba3c4ce7/7656.pdf> (дата обращения: 22.03.2023).

146. Energy transition. United Nations Development Programme // Sustainable Energy Hub. – 2023. – URL: <https://www.undp.org/energy/our-work-areas/energy-transition> (дата обращения: 30.03.2023).

147. Energy White Paper: Our Energy Future-Creating a Low Carbon Economy // Department for transport. – 2003. – 144 p. – URL:

<https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7c1f5940f0b645ba3c6d4f/5761.pdf>

(дата обращения: 22.03.2023).

148. Enhance Energy. – 2022. – URL: <https://enhanceenergy.com/#3> (дата обращения: 25.01.2022).

149. Fan Jing-Li., Xu Mao, Wei Shijie. Evaluating the effect of a subsidy policy on carbon capture and storage (CCS) investment decision-making in China – A perspective based on the 45Q tax credit // Energy Procedia. – 2018. – Vol. 154. – P. 22-28. – DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.005.

150. Feed-in Tariffs and Contracts for Difference schemes and Guarantees of Origin // Department for Business, Energy & Industrial Strategy. – 2022. – 20 p. – URL:

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1070105/fits-cfd-guarantee-origin-consultation.pdf (дата обращения: 07.08.2023).

151. Fernández-Canteli Álvarez P., García Crespo J., Martínez Orío R., Mediato Arribas J. F., Ramos A., Berrezueta E. Techno-economic evaluation of regional CCUS implementation: The STRATEGY CCUS project in the Ebro Basin (Spain) // Greenhouse Gases: Science and Technology. – 2022. – Vol. 13. – Is. 2. – P. 197-215. – DOI: 10.1002/ghg.2193.

152. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M. W., Andrew R. M., Gregor L., Hauck J., Le Quéré C., Luijkx I. T., Olsen A., Peters G. P., Peters W., Pongratz J., Schwingshackl C., Sitch S., Canadell J. G., Ciais P., Jackson R. B., Alin S. R., Alkama R., Arneeth A., Arora V. K., Bates N. R., Becker M., Bellouin N., Bittig H. C., Bopp L., Chevallier F., Chini L. P., Cronin M., Evans W., Falk S., Feely R. A., Gasser T., Gehlen M., Gkritzalis T., Gloege L., Grassi G., Gruber N., Gürses Ö., Harris I., Hefner M., Houghton R. A., Hurtt G. C., Iida Y., Ilyina T., Jain A. K., Jersild A., Kadono K., Kato E., Kennedy D., Klein Goldewijk K., Knauer J., Korsbakken J. I., Landschützer P., Lefèvre N., Lindsay K., Liu J., Liu Z., Marland G., Mayot N., McGrath M. J., Metz N., Monacci N. M., Munro D. R., Nakaoka S.-I., Niwa Y., O'Brien K., Ono T., Palmer P. I., Pan N., Pierrot D., Pockock K., Poulter B.,

Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Rodriguez C., Rosan T. M., Schwinger J., Séférian R., Shutler J. D., Skjelvan I., Steinhoff T., Sun Q., Sutton A. J., Sweeney C., Takao S., Tanhua T., Tans P. P., Tian X., Tian H., Tilbrook B., Tsujino H., Tubiello F., van der Werf G. R., Walker A. P., Wanninkhof R., Whitehead C., Willstrand Wranne A., Wright R., Yuan W., Yue C., Yue X., Zaehle S., Zeng J., Zheng B. Global Carbon Budget 2022 // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14. – Is. 11. – P. 4811–4900. – DOI: 10.5194/essd-14-4811-2022.

153. Garcia-Garcia G., Fernandez M. C., Armstrong K., Woolass S., Styring P. Analytical review of life-cycle environmental impacts of carbon capture and utilization technologies // Chemistry – Sustainability – Energy – Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 995-1015. – DOI: 10.1002/cssc.202002126.

154. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy — A new sustainability paradigm? // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 143. – P. 757–768. – DOI: [10.1016/j.jclepro.2016.12.048](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048).

155. Global CCS Institute welcomes the 20th and 21st large-scale CCS facilities into operation // Global CCS Institute. – 2020. – 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: 25.01.2022).

156. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021. Global emissions rebound sharply to highest ever level // IEA. – 2021. – 14 p. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf> (дата обращения: 03.07.2022).

157. Global Energy Review 2021. Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021 // IEA. – 2021. – 32 p. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0031107-401d-4a2f-a48b-9eed19457335/GlobalEnergyReview2021.pdf> (дата обращения: 10.10.2023).

158. Global Status of CCS 2021 // Global CCS Institute. – 2021. – 79 p. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf (дата обращения: 01.03.2023).
159. Global Status of CCS 2023 // Global CCS Institute. – 2023. – 97 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/01/Global-Status-of-CCS-Report-1.pdf> (дата обращения: 01.05.2023).
160. Global Warming of 1.5 °C // IPCC. – 2018. – URL: <https://www.ipcc.ch/sr15/> (дата обращения: 01.04.2023).
161. Gorgon carbon capture and storage. Reducing greenhouse gas emissions for a lower carbon future // Chevron global. – 2024. – URL: <https://australia.chevron.com/our-businesses/gorgon-project/carbon-capture-and-storage> (дата обращения: 02.02.2024).
162. 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.
163. Great Plains Synfuels Plant // National Energy Technology Laboratory. – 2024. – URL: <https://www.netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/great-plains> (дата обращения: 05.02.2024).
164. Greenhouse gas emissions // Our World in Data. – 2020. – URL: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions> (дата обращения: 05.04.2023).
165. Greenhouse Gas Inventory Data. GHG Profiles. Annex 1 // United Nations. Climate Change. – 2022. – URL: https://di.unfccc.int/ghg_profile_annex1?_gl=1*1ww4b6z*_ga*NzI1MDEzODk5LjE2OTc4MTMzMTA.*_ga_7ZZWT14N79*MTY5NzgxMzM1NC4xLjEuMTY5NzgxMzQ2MS4wLjAuMA (дата обращения: 18.10.2022).
166. Green J., Hadden J., Hale T., Mahdavi P. Transition, hedge, or resist? Understanding political and economic behavior toward decarbonization in the oil and gas industry // Review of International Political Economy. – 2022. – Vol. 29 (6). – P. 2036-2063. – DOI: 10.1080/09692290.2021.1946708.

167. Grol E. Carbon Capture Retrofit. Analyses // National Energy Technology Laboratory. – 2017. – 32 p. – URL: https://www.netl.doe.gov/projects/files/CarbonCaptureRetrofitAnalysisPresentation_080917.pdf (дата обращения: 24.10.2022).

168. 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](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106632).

169. Herzog H. Financing CCS Demonstration Projects: Lessons Learned from Two Decades of Experience // Energy Procedia. – 2017. – V. 114. – P. 5691-5700. – DOI: [10.1016/j.egypro.2017.03.1708](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1708)

170. How carbon pricing works. Information on Canada's carbon pollution pricing system // Government of Canada – 2023. – URL: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/putting-price-on-carbon-pollution.html> (дата обращения: 09.02.2023).

171. How much carbon dioxide is produced per kilowatthour of U.S. electricity generation? // U.S. Energy Information Administration. – 2022. – URL: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11> (дата обращения: 24.10.2022).

172. Ilinova A., Cherepovitsyn A., Evseeva O. Stakeholder management: An approach in CCS projects // Resources. – 2018. – Vol. 7. – No. 4: 83. – 16 p. – DOI: [10.3390/resources7040083](https://doi.org/10.3390/resources7040083)

173. Ilinova A., Dmitrieva D., Kraslawski A. Influence of COVID-19 pandemic on fertilizer companies: The role of competitive advantages // Resources Policy. – 2021. – Vol. 71. – P. 102019. – DOI: [10.1016/j.resourpol.2021.102019](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102019).

174. Ilinova A., Kuznetsova E. CC(U)S initiatives: Prospects and economic efficiency in a circular economy // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8 (1). – P. 1295-1301. – DOI: [10.1016/j.egypr.2021.11.243](https://doi.org/10.1016/j.egypr.2021.11.243)

175. Ilinova A., Romasheva N., Cherepovitsyn A. CC(U)S Initiatives: Public Effects and “Combined Value” Performance // Resources. – 2021. – Vol. 10 (6). – P. 61. – DOI: [10.3390/resources10060061](https://doi.org/10.3390/resources10060061).

176. Ilinova A. A., Romasheva N. V., Stroykov G. A. Prospects and social effects of carbon dioxide sequestration and utilization projects // Journal of Mining Institute. – 2020. – Vol. 244. – P. 493–502. – DOI: 10.31897/PMI.2020.4.12.

177. Investor signatories // Climate Action 100+. – 2023. – URL: <https://www.climateaction100.org/whos-involved/investors/page/2/#> (дата обращения: 01.04.2023).

178. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC. – 2005. – 442 p. – URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf (дата обращения: 06.04.2023).

179. ISO 14067:2018. Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification.

180. Jansen D., Gazzani M., Manzolini G., van Dijk E., Carbo M. Pre-combustion CO₂ capture // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2015. – Vol. 40. – P. 167-187. – DOI: [10.1016/j.ijggc.2015.05.028](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.028).

181. Jia J., Fan Y., Guo X. The low carbon development (LCD) levels' evaluation of the world's 47 countries (areas) by combining the FAHP with the TOPSIS method // Expert Systems with Applications. – 2012. – Vol. 7. – Is. 7. – P. 6628-6640. – DOI: [10.1016/j.eswa.2011.12.039](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.12.039).

182. Jinjie power station // Global Energy Monitor. – 2024. – URL: https://www.gem.wiki/Jinjie_power_station#cite_note-2 (дата обращения: 01.02.2024).

183. Kearns D. Technology readiness and costs of CCS / D. Kearns, H. Liu, C. Consoli // Global CCS Institute. – 2021. – 49 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf> (дата обращения: 12.03.2023).

184. Kenner D., Heede R. White knights, or horsemen of the apocalypse? Prospects for Big Oil to align emissions with a 1.5 °C pathway // Energy Research & Social Science. – 2021. – Vol. 79. – P. 102049. – DOI: [10.1016/j.erss.2021.102049](https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102049).

185. Kheiriniq M., Ahmed S., Rahmanian N. Comparative techno-economic analysis of carbon capture processes: Pre-combustion, post-combustion, and oxy-fuel combustion operations // Sustainability. – 2021. – Vol. 13 (24). – P. 13567. – DOI: 10.3390/su132413567.
186. Knoope M. M. J., Ramirez A., Faaij A. P. C. Investing in CO₂ transport infrastructure under uncertainty: A comparison between ships and pipelines // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2015. – Vol. 41. – P. 174-193. – DOI: [10.1016/j.ijggc.2015.07.013](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.07.013).
187. Koytsoumpa E., Bergins C., Kakaras E. The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies // The Journal of Supercritical Fluids. – 2018. – Vol. 132. – P. 3-16. – DOI: 10.1016/j.supflu.2017.07.029.
188. Kryukov V., Gorbacheva N., Suslov N. Renewable energy and prospects for decarbonising the Asian Russia // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 470. – P. 01037. – DOI: 10.1051/e3sconf/202347001037.
189. Lee Ch.-Ch., Hussain J. Carbon neutral sustainability and green development during energy consumption // Innovation and Green Development. – 2022. – Vol. 1 (1). – P. 100002. – DOI: 10.1016/j.igd.2022.100002.
190. Liang Z., Rongwong W., Liu H., Fu K., Gao H., Cao F., Zhang R., Sema T., Henni A., Sumon K., Nath D., Gelowitz D., Srisang W., Saiwan C., Benamor A., Al-Marri M., Shi H., Supap T., Chan C., Zhou Q., Abu-Zahra M., Wilson M., Olson W., Idem R., Tontiwachwuthikul P. Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvents // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2015. – Vol. 40. – P. 26-54. – DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.06.017.
191. Lighthouse Carboneras // Carbon Clean. – 2020. – URL: <https://www.carbonclean.com/news/lafargeholcim-and-carbon-clean-to-develop-large-scale-ccus-plant> (дата обращения: 25.01.2022).
192. Lockwood T. A review of cost estimates for carbon capture and storage in the power sector // International Centre for Sustainable Carbon. – 2021. – 72 p. –

URL: <https://www.sustainable-carbon.org/report/a-review-of-cost-estimates-for-carbon-capture-and-storage-in-the-power-sector/> (дата обращения: 24.10.2022).

193. Lu H., Guo L., Zhang Y. Oil and gas companies' low-carbon emission transition to integrated energy companies // *Science of The Total Environment*. – 2019. – Vol. 686. – P. 1202-1209. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.014.

194. Madejski P., Chmiel K., Subramanian N., Kús T. Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies // *Energies*. – 2022. – Vol. 15 (3). – P. 887. – DOI: [10.3390/en15030887](https://doi.org/10.3390/en15030887).

195. Maximov A., Beletskaya I. Carbon dioxide and ‘methanol’ economy: advances in the catalytic synthesis of methanol from CO₂ // *Russian Chemical Reviews*. – 2024. – Vol. 93 (1). – P. RCR5101. DOI: 10.59761/RCR5101.

196. Maksimova E. V., Morozov V. V. Modern challenges for the oil and gas sector and adaptation to them // *Problems of Economics and Management of the Oil and Gas Complex*. – 2021. – Vol. 6. – P. 5-9.

197. Manioudis M., Angelakis A. Creative Economy and Sustainable Regional Growth: Lessons from the Implementation of Entrepreneurial Discovery. Process at the Regional Level // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 15 (9). – DOI: 10.3390/su15097681.

198. Meeting the Dual Challenge. A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture Use and Storage // *National Petroleum Council*. – 2019. – URL: <https://dualchallenge.npc.org/> (дата обращения: 24.09.2022).

199. Mohammad M., Isaifan R., Weldu Y. W., Rahman M. A., Al-Ghamdiet S. G. Progress on carbon dioxide capture, storage and utilization // *International Journal of Global Warming*. – 2020. – Vol. 20 (2). – P. 124–144. – DOI: 10.1504/IJGW.2020.105386.

200. Mountain B. R. A review of the evidence on the carbon capture and storage applied to electricity generation in Australia // *Victoria Energy Policy Centre, Victoria University*. – 2020. – 15 p. – URL: https://d3n8a8pro7vhmx.cloudfront.net/auscon/pages/18314/attachments/original/1607381522/Bruce_Mountain_CCS_report_Dec_2020.pdf?1607381522 (дата обращения: 24.09.2023).

201. Mulugetta Y., Urban F. Deliberating on low carbon development // Energy Policy. – 2010. – Vol. 38. – Is. 12. – P. 7546-7549. – DOI: 10.1016/j.enpol.2010.05.049.

202. Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector // International Energy Agency. – 2021. – 222 p. – URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf (дата обращения: 01.03.2023).

203. Northern Lights: Accelerating decarbonisation // Northern Lights. – 2022. – URL: <https://norlights.com/> (дата обращения: 27.05.2022).

204. Nowiski N. A. Rising above the storm: Climate risk disclosure and its current and future relevance to the energy sector // Energy Law Journal. – 2018. – Vol. 39 (1). – P. 1-46.

205. Oil and Gas Climate Initiative (OGCI). – 2023. – URL: <https://www.ogci.com/> (дата обращения: 02.04.2023).

206. Okeke A. Towards Sustainability in the Global Oil and Gas Industry: Identifying Where the Emphasis Lies // Environmental and Sustainability Indicators. – 2021. – Vol. 12. – P. 100145. – DOI: 10.1016/j.indic.2021.100145.

207. Orca: the first large-scale plant. – URL: <https://climeworks.com/roadmap/orca> (дата обращения 18.01.24).

208. Oshiro K., Masui T., Kainuma M. Transformation of Japan's energy system to attain net-zero emission by 2050 // Carbon Management. – 2018. – Vol. 9. – Is. 5. – P. 493–501. – DOI: 10.1080/17583004.2017.1396842.

209. Pacala S., Socolow R. Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies // Science. – 2004. – Vol. 305 (5686). – P. 968-972. – DOI: 10.1126/science.1100103.

210. Pearce D. Blueprint for a Green Economy / D. Pearce, A. Markandya, E. B. Barbier. – London: Earthscan, 1989. – 192 p.

211. Peterdy K. Carbon Accounting. Creating an inventory for, and calculation of, an organization's scope 1, 2, and 3 greenhouse gas emissions // Corporate Finance

Institute. – 2023. – URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/esg/carbon-accounting/> (дата обращения: 01.03.2023).

212. Policy priorities to intensive large scale deployment of CCS // Global CCS Institute. – 2019. – 31 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/04/TL-Report-Policy-priorities-to-incentivise-the-large-scale-deployment-of-CCS-digital-final-2019-1.pdf> (дата обращения: 24.09.2022).

213. Porter M. The Competitive Advantage of Nations. – New York: Free Press, 1990. – 875 p.

214. Reaching zero with renewables capturing carbon // IRENA. – 2021. – 107 p. – URL: https://www.irena.org/-/media/Irena/Files/Technical-papers/IRENA_Capturing_Carbon_2021.pdf?rev=bf05359177504164aab7fad527b35e0d (дата обращения: 07.05.2023).

215. Report of the United Nations Conference on New and Renewable Sources of Energy, Nairobi, 10 to 21 August 1981. – New York: United Nations, 1981. – 126 p. – URL: <https://digitallibrary.un.org/record/25034?ln=en> (дата обращения: 30.03.2023).

216. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, Nairobi, 8 to 19 June 1987. – New York: United Nations, 1987. – 300 p. – URL: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf> (дата обращения: 06.03.2022).

217. Repositioning CCUS for China's Net-Zero Future // Global CCS Institute. – 2022. – 19 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/09/CCUS-for-China-Net-Zero-Future-0922.pdf> (дата обращения: 05.02.2024).

218. Robiou du Pont Y., Meinshausen M. Warming assessment of the bottom-up Paris Agreement emissions pledges // Nature Communications. – 2018. – Vol. 9 (1). – P. 4810. – DOI: 10.1038/s41467-018-07223-9.

219. Romasheva N., Cherepovitsyna A. Renewable Energy Sources in Decarbonization: The Case of Foreign and Russian Oil and Gas Companies // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – No. 9: 7416. – DOI: 10.3390/su15097416.

220. Romasheva N., Ilinova A. CCS Projects: How Regulatory Framework Influences Their Deployment // Resources. – 2019. – Vol. 8 (4). – P. 181. – DOI: [10.3390/resources8040181](https://doi.org/10.3390/resources8040181).

221. Roussanaly S. Calculating CO₂ avoidance costs of Carbon Capture and Storage from industry // Carbon Management. – 2019. – Vol. 10. – Is. 1. – P. 105-112. – DOI: [10.1080/17583004.2018.1553435](https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1553435).

222. Rubin E. S., Short C., Booras G., Davison J., Ekstrom C., Matuszewski M., McCoy S. A proposed methodology for CO₂ capture and storage cost estimates // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2013. – Vol. 17. – P. 488-503. – DOI: [10.1016/j.ijggc.2013.06.004](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.06.004).

223. Rubin E. S. Understanding the pitfalls of CCS cost estimates // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2012. – Vol. 10. – P. 181-190. – DOI: [10.1016/j.ijggc.2012.06.004](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.004).

224. SDE++ 2021. Stimulation of Sustainable Energy Production and Climate Transition // Netherlands Enterprise Agency. – 2021. – 56 p. – URL: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2023-08/Brochure%20SDE%2B%2B%202021%20-%20oktober%202021.pdf> (дата обращения: 02.09.2023).

225. SDG Compass – A Guide for Business Action to Advance the Sustainable Development Goals. – 2022. – URL: <https://sdgcompass.org/> (дата обращения: 29.03.2022).

226. Sheveleva N. A., Cherepovitsyna A. A., Danilin K. P. Assessing the Decarbonization Progress of Russian Oil and Gas Companies // Studies on Russian Economic Development. – 2024. – Vol. 35. – No. 3. – P. 406–414. – DOI: [10.1134/S1075700724030146](https://doi.org/10.1134/S1075700724030146).

227. Shojaeddini E., Naimoli S., Ladislaw S., Bazilian M. Oil and gas company strategies regarding the energy transition // Progress in Energy. – 2019. – Vol. 1. – DOI: [10.1088/2516-1083/ab2503](https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab2503).

228. Smil V. Energy Transitions: History, Requirements, Prospects / V. Smil. – Praeger: ABC-CLIO, 2010. – 192 p. – URL: publisher.abc-clio.com/9780313381782 (дата обращения: 29.03.2023).

229. Smil V. Examining energy transitions: A dozen insights based on performance // Energy Research & Social Science. – 2016. – Vol. 22. – P. 194-197. – DOI: 10.1016/j.erss.2016.08.017.

230. Soltani R., Rosen M. A., Dincer I. Assessment of CO₂ capture options from various points in steam methane reforming for hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Vol. 39. – Is. 35. – P. 20266-20275. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.09.161.

231. Statistical Review of World Energy // BP. – 2022. – 57 p. – URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (дата обращения: 30.03.2023).

232. Steen M. Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuel Fired Power Generation Systems // European Commission Joint Research Center. – 2017. – 61 p. – URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/221658dd-9556-4591-86ea-51544346a8f7> (дата обращения: 10.07.2023).

233. Tsvetkov P., Cherepovitsyn A., Fedoseev S. Public perception of carbon capture and storage: A state-of-the-art overview // Heliyon. – 2019. – Vol. 5. – Is. 12. – P. e02845. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02845.

234. The big choices for oil and gas in navigating the energy transition // McKinsey&Company. – 2021. – URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-big-choices-for-oil-and-gas-in-navigating-the-energy-transition> (дата обращения: 01.03.2023).

235. The Carbon Capture and Storage Infrastructure Fund: an update on its design // GOV.UK. – 2022. – URL: <https://www.gov.uk/government/publications/design-of-the-carbon-capture-and-storage-ccs-infrastructure-fund/the-carbon-capture-and-storage-infrastructure-fund-an-update-on-its-design-accessible-webpage> (дата обращения: 29.07.2023).

236. The CarbonNeutral Protocol. The global standard for carbon neutral programmes // Natural Capital Partners. – 2020. – 75 p. – URL: https://www.carbonneutral.com/pdfs/The_CarbonNeutral_Protocol_Jan_2020.pdf

(дата обращения: 30.03.2023).

237. The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage // ZEP. – 2011. – 51 p. – URL: <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Overall-CO2-Costs-Report.pdf> (дата обращения: 21.05.2022).

238. The current state of CCS in the U.U – résumé after 100 years of CO₂ capture and 25 years of extensive federal funding // Geoengineering monitor. – 2022. – URL: <https://www.geoengineeringmonitor.org/2022/12/the-current-state-of-ccs-in-the-u-s-resume-after-100-years-of-co2-capture-and-25-years-of-extensive-federal-funding/>

(дата обращения: 01.02.2024).

239. The Future of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS): Status, Issues, Needs // Resources for the future. – 2017. – 8 p. – URL: <https://media.rff.org/documents/RFF-May24-CCUS20event20summary.pdf>

(дата обращения: 01.02.2024).

240. The global leader for impact reporting // GRI. – 2023. – URL: <https://www.globalreporting.org/> (дата обращения: 30.03.2023).

241. The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard // World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. – 2004. – 112 p. – URL: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>

(дата обращения: 05.04.2023).

242. The Greenhouse Gas Protocol. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard // World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. – 148 p. – URL:

https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf (дата обращения: 05.04.2023).

243. Titova N., Cherepovitsyna A., Guseva T. Meeting the UN's Sustainable Development Goals in the Decarbonization Agenda: A Case of Russian Oil and Gas

Companies // Resources. – 2023. – Vol. 12 (10). – P. 121. – DOI: 10.3390/resources12100121.

244. Trendafilova P. What is The 45Q Tax Credit? // Carbon Herald. – 2023. – URL: <https://carbonherald.com/what-is-45q-tax-credit/> (дата обращения: 12.09.2023).

245. Tribe M. A., Alpine R. L. W. Scale economies and the «0.6 rule» // Engineering Costs and Production Economics. – 1986. – Vol. 10. – Is. 4. – P. 271-278. – DOI: 10.1016/0167-188X(86)90053-4.

246. Triple bottom line: A review of the literature // The triple bottom line. Does it all add up? / C. Adams, G. Frost, W. Webber. – London, 2004. – Ch. 2. – P. 20-25.

247. Understanding industrial CCS hubs and clusters. Global Status of CCS special report // Global CCS Institute. – 2016. – 15 p. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf> (дата обращения: 31.01.2022).

248. Urban F., Nordensvard J. Low carbon development: Key issues. – London: Routledge, 2013. – 352 p.

249. U.S. shows 'commendable leadership' on support for CCS // The International CCS Knowledge Centre. – 2022. – URL: <https://ccsknowledge.com/news/us-shows-commendable-leadership-on-support-for-ccs> (дата обращения: 12.09.2023).

250. Van Straelen J., Geuzebroek F., Goodchild N., Protopapas G., Mahony L. CO₂ capture for refineries, a practical approach // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2009. – Vol. 4. – Is. 2. – P. 316–320. – DOI: 10.1016/j.egypro.2009.01.026.

251. Wang X., Tang R., Meng M. Research on CCUS business model and policy incentives for coal-fired power plants in China // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2023. – Vol. 125. – P. 103871. – DOI: 10.1016/j.ijggc.2023.103871.

252. Wetenhall B., Race J., Aghajani H., Fernandez E. S., Naylor M., Lucquiaud M., Chalmers H. Considerations in the Development of Flexible CCS Network // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 114. – P. 6800-6812. – DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1810.

253. What is net zero? // University of Oxford. – 2023. – URL: <https://netzeroclimate.org/> (дата обращения: 04.04.2023).
254. Wimbadi R. W., Djalante R. From decarbonization to low carbon development and transition: A systematic literature review of the conceptualization of moving toward net-zero carbon dioxide emission (1995–2019) // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 256. – P. 120307. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120307.
255. Wolf Stream. – 2022. – URL: <https://wolfmidstream.com/carbon/> (дата обращения: 25.01.2022).
256. World Energy Outlook 2023. Executive Summary // IEA. – 2023. – 353 p. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (дата обращения: 01.06.2024).
257. World Energy Outlook 2019 // IEA. – 2019. – 807 p. – URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/98909c1b-aabc-4797-9926-35307b418cdb/WEO2019-free.pdf> (дата обращения: 01.06.2024).
258. World Greenhouse Gas Emissions in 2020 // World Resource Institute. – 2020. – URL: <https://files.wri.org/d8/s3fs-public/2023-10/ghg-emissions-2020.png> (дата обращения: 14.03.2023).
259. Yanchang CO₂ EOR: Unique Geology, Unique Challenges // Global CCS Institute. – 2016. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/insights/yanchang-co2-eor-unique-geology-unique-challenges/> (дата обращения: 10.02.2024).
260. Yao X., Zhong P., Zhang X., Zhu L. Business model design for the carbon capture utilization and storage (CCUS) project in China // Energy policy. – 2018. – Vol. 121. – P. 519–533. – DOI: 10.1016/j.enpol.2018.06.019.
261. Zero Carbon Humber. – 2022. – URL: <https://www.zerocarbonhumber.co.uk/> (дата обращения: 29.01.2022).
262. Zero Routine Flaring by 2030 // The World Bank. – 2023. – URL: <https://www.worldbank.org/en/programs/zero-routine-flaring-by-2030> (дата обращения: 02.04.2023).