



Череповицына Алина Александровна

главный научный сотрудник отдела промышленной экологии Федерального государственного автономного учреждения «Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»

СЕКВЕСТРАЦИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА: БАЗОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЗАТРАТ

Актуальность

В связи с растущей во всём мире озабоченностью экологическими проблемами наука и практика находится в поисках эффективных мер снижения нагрузки на окружающую среду. В центре внимания находятся вопросы изменения климата, достижения углеродной нейтральности и углеродоёмкости продукции [1]. Пропагандируемая политика декарбонизации проявляется в необходимости ограничения объёмов использования ископаемых видов топлива, а также более масштабного использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), водорода, биотоплива и других источников с низким уровнем выбросов. Все это запустило процесс четвёртого энергетического перехода, который вносит существенные коррективы в представления о будущем функционировании энергетики и других секторов промышленности.

Достижение углеродной нейтральности потребует от всего мира целого набора конкретных шагов и действий во всех отраслях, и этот процесс будет долгим. Отдельные компании и сектора работают над определением вариантов снижения выбросов углекислого газа, их ранжированием и оценкой по различным критериям, в том числе по возможности применения, стоимости и эффективности. Толчок к развитию получили технологии улавливания, использования и захоронения углерода (carbon capture, utilization and storage — CCS). Комплекс CCS выступает, скорее, как комплементарный при ориентации на традиционные виды топлива. С учетом большой вероятности того, что спрос на нефть не будет снижаться, а по некоторым оценкам достигнет пика в ближайшие пять лет [2], опциям CCS отводят одну из ключевых ролей при движении к углеродной нейтральности. Согласно оценкам экспертов, использование CCS в сочетании с другими опциями декарбонизации позволит достичь наиболее эффективной по стоимости комбинации [3].

Суть технологии сводится к улавливанию выбросов, уже произведённых крупными энергетическими и промышленными источниками, которые нельзя (или





затруднительно) уменьшить другими способами. Общая технологическая цепочка CCS будет меняться в зависимости от источника выбросов, способа улавливания, варианта и расстояния транспортировки газа и того, на какие цели направляется уловленный CO₂ (захоронение или использование). Преобразование углекислого газа в продукты с экономической ценностью (например, в карбамид) в последнее время вызывает все больший интерес [4].

Одной из главных проблем является высокий уровень затрат на реализацию CCS. Мировой опыт подтверждает, что в странах, где активно развиваются такие инициативы (США, Китай, Канада и другие), активно реализуются меры государственной поддержки. С учетом того, что в мире реализуется всего 29 коммерческих проектов CCS [3], и каждый из них является уникальным, неопределённой является и стоимость таких решений. Анализ общих подходов к оценке затрат на технологии секвестрации, а также представленных в открытых источниках диапазонов затрат и факторов, их определяющих, может служить базисом для построения более понятных и чётких моделей реализации проектов CCS.

Прогноз развития мировых мощностей проектов секвестрации

По оценкам различных мировых организаций, суммарная мощность действующих проектов секвестрации по всему миру составляет порядка 40-50 млн т CO₂ в год [3,5], а с учетом проектов, находящихся на стадии строительства, — порядка 150 млн т CO₂ в год [3].

Глобальный институт CCS прогнозирует, что к 2050 году уровень улавливания техногенного CO₂ будет выше 5 млрд т в год, что повлечёт за собой значительный рост мировой индустрии CCS (более чем в 100 раз) [3]. Согласно одному из сценариев Международного энергетического агентства, в ближайшие годы не следует ожидать серьёзного развития индустрии CCS, однако, к 2030 году прогнозируется резкий рост мощностей до 1,6 млрд т с увеличением до 7,6 млрд т в год к 2050 году [6]. Компания BP в одном из сценариев допускает рост мощностей CCS до 6 млрд т [7], а агентство IRENA — лишь до 3,4 млрд т CO₂ в год к 2050 году. Консенсус-прогноз, составленный авторами на основе представленных выше ориентиров по возможному росту мощностей CCS при условии достижения нулевых выбросов к 2050 году, определяет примерное возможное значение мощностей в 5,7 млрд т CO₂ в год к 2050 году. Несмотря на то, что прогнозы рознятся, они однозначно подтверждают предположение о важной и обязательной роли технологий секвестрации в стремлении к углеродной нейтральности.



Затраты на проекты секвестрации: диапазоны и подходы к оценке

В общем виде затраты на реализацию инициатив CCS представляют собой сумму затрат по каждому звену технологической цепочки (улавливание, транспорт, захоронение). Вместе с тем, существует и ряд других сложившихся подходов и методик оценки затрат. Общепринятым является определение общей стоимости секвестрации 1 т углекислого газа — уловленного (captured) или предотвращённого (avoided). Согласно первому способу, стоимость 1 т уловленного CO₂ получается путём деления общих затрат на улавливание на количество уловленного газа, и здесь не учитывается дополнительное количество углерода, образующееся на объекте из-за потребности в дополнительной энергии для работы оборудования CCS. Второй способ ориентируется на стоимость предотвращённых выбросов CO₂, учитывает дополнительные выбросы и рассчитывается путём деления общих затрат на улавливание на разницу между общим объемом улавливания и разницей между выбросами CO₂ на объекте с действующей установкой CCS и эквивалентном объекте без CCS [8]. Также базовыми подходами являются оценка затрат по отраслям-адаптерам CCS (обычно с разделением на энергетику и промышленность), а также в вариантах «BASE» (базовые затраты) и «OPTI» (оптимизированные затраты при улучшении технологических решений).

При проведении анализа стоимости инициатив CCS имеет смысл сравнивать затраты по стадиям технологического цикла. Сложности, возникающие при сравнении удельных значений стоимости секвестрации углекислого газа, объясняются тем, что рознятся как источники доступных данных (фактические данные с производств и теоретические расчётные значения), так и методы расчёта стоимости на тонну, уровень развития проектов в разных регионах, доступность данных о них (большая часть открытых данных ориентирована на условия США) и др. Однако, даже несмотря на то, что существующие данные сложно унифицировать, из них можно сделать общие выводы.

Стоимость улавливания CO₂, как правило, является самой большой частью затрат в процессе. Обычно стоимость CCS тем выше, чем ниже концентрация CO₂ в перерабатываемом газе, в связи с большей энергоёмкостью процесса разделения при улавливании. Улавливание может составлять до 75% стоимости проектов CCS в случаях, где требуется отделение разбавленного CO₂ от объёмных выхлопных газов, например, при производстве электроэнергии, цемента, стали, химикатов, а также при переработке нефти. На производствах, которым свойственна высокая степень отделения CO₂, затраты на CCS намного ниже; это, например, переработка природного газа и производство аммиака [9]. Стоимость улавливания 1 тонны CO₂ из разных источников может





варьироваться от 15 до 120 и выше долларов за тонну в зависимости от источника выбросов, мощности объекта, стоимости электричества, оборудования и других факторов [10]. При этом наименьшей стоимостью характеризуются проекты улавливания на предприятиях газопереработки и химической промышленности (производство аммиака, этилена, этанола, биоэтанола и др.), а наибольшие значения отмечаются на объектах электроэнергетики, цементных и сталелитейных заводах [8,10,11].

Транспортировка CO₂ может осуществляться несколькими способами, основными из которых являются трубопроводы и суда. Технологически это звено цепочки не вызывает сложностей, так как процесс перемещения углекислого газа по трубопроводам и на судах схож с отработанной во всём мире транспортировкой природного газа (во втором случае — сжиженного). С точки зрения развития инфраструктуры для транспортировки CO₂ лидером является США (там находится порядка 85% всех трубопроводов) [9]. Стоимость транспортировки зависит, прежде всего, от территориального расположения объектов и существующей системы транспорта. При необходимости транспортировки больших объёмов углекислого газа на относительно небольшие расстояния целесообразно использование трубопроводов, при этом стоимость транспортировки на тонну будет расти пропорционально увеличению расстояния. Использование судов требует предварительного сжижения газа, что значительно увеличивает затраты, в связи с чем этот вид транспорта экономически предпочтителен к использованию на дальние расстояния [12].

Геологическое захоронение CO₂ может осуществляться тремя основными способами [5,9] — (1) закачка углекислого газа в нефтяной пласт для повышения нефтеотдачи и последующего хранения (технологии CO₂-EOR); (2) хранение в соленосных пластах; (3) хранение в истощённых нефтяных и газовых месторождениях. Затраты на хранение индивидуальны и зависят от конкретного хранилища. В общем виде, захоронение на суше (onshore) дешевле, чем в море (offshore); захоронение в изученных пластах (например, где велась разведка / разработка месторождения) дешевле, чем в малоизученных; захоронение в истощённых нефтяных и газовых месторождениях дешевле, чем хранение в соленосных формациях (особенно в случаях, когда первые имеют старые скважины и другую инфраструктуру, которые можно повторно использовать) [12]. По данным Международного энергетического агентства [10], на более чем 85% возможных наземных резервуарах на территории США стоимость захоронения составит менее 20 долларов за тонну, а в случае морских месторождений это значение характерно для менее 25% доступных резервуаров.





Факторы, определяющие величину затрат на проекты секвестрации

Затраты на реализацию полного цикла CCS всегда зависят от конкретного случая. Существуют значительные различия в общей модели реализации проекта, технологической цепочке, стоимости капитала, оборудования, рабочей силы, электроэнергии и других составляющих. Существует целый набор факторов, который определяет объем затрат на технологии секвестрации, главными из которых являются характеристика источника выбросов CO₂, размер и характеристики установки по улавливанию. Вместе с тем, затраты на CCS могут сильно варьироваться в зависимости от отрасли, уровня развития технологий, местоположения, хранилища, дальнейшего применения газа и т.д. Кроме того, развитие и совершенствование технологий, эффекты масштаба, обучения и накопления опыта играют важную роль. Эксперты прогнозируют более масштабное распространение проектов секвестрации именно за счёт снижения затрат посредством улучшения технологических решений, масштабирования и увеличения мощностей, обучения и накопления опыта по реализации таких инициатив.

Литература

1. Башмаков И.А., Скобелев Д.О., Борисов К.Б., Гусева Т.В. Системы бенчмаркинга по удельным выбросам парниковых газов в черной металлургии. Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021; 77(9):1071-1086. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-9-1071-1086>
2. McKinsey & Company. (2022). Global Energy Perspective. <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Oil%20and%20Gas/Our%20Insights/Global%20Energy%20Perspective%202022/Global-Energy-Perspective-2022-Executive-Summary.pdf>
3. Global CCS Institute. (2021). Global Status of CCS. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf
4. Aresta, M., Dibenedetto, A., & Angelini, A. (2014). Catalysis for the valorization of exhaust carbon: from CO₂ to chemicals, materials, and fuels. Technological use of CO₂. Chemical reviews, 114(3), 1709-1742. <https://doi.org/10.1021/cr4002758>
5. Kearney Energy Transition Institute. (2021). Carbon Capture Utilization and Storage. Toward Net-Zero. <https://www.kenearney.com/documents/17779499/17781864/CCUS-2021+FactBook.pdf/718e94af-1536-b23e-1ac9-a4de74ffef25?t=1623398953000>
6. International Energy Agency. (2021). Net Zero by 2050. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
7. BP. (2022). Energy Outlook: 2022 edition. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf>





8. Moch, J. M., Xue, W., & Holdren, J. P. (2022). Carbon Capture, Utilization, and Storage: Technologies and Costs in the U.S. Context. Belfer Center for Science and International Affairs. <https://www.belfercenter.org/publication/carbon-capture-utilization-and-storage-technologies-and-costs-us-context>
9. Global CCS Institute. (2021). Technology Readiness and Cost of CCS. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/04/CCS-Tech-and-Costs.pdf>
10. International Energy Agency. (2019). CCUS in Clean Energy Transitions. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/levelised-cost-of-co2-capture-by-sector-and-initial-co2-concentration-2019>
11. National Petroleum Council. (2019). Meeting the Dual Challenge, A Roadmap to at-scale deployment of carbon capture use and storage. Chapter Two — CCUS Supply Chains and Economics. <https://dualchallenge.npc.org/>
12. Zero Emission Platform. (2011). The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage. <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Overall-CO2-Costs-Report.pdf>

