

УДК 338

*И. А. Гулиев оглы, П. А. Кружилин*

Московский государственный институт международных отношений МИД РФ,  
Москва, e-mail: guliyevia@bk.ru

## ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ: ПУТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛЕЗНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

**Ключевые слова:** декарбонизация, углекислый газ, CO<sub>2</sub>, полезное использование CO<sub>2</sub>, устойчивое развитие, борьба с изменением климата.

Сегодня человечество находится в преддверии новой научно-технической эры, однако, будущее самого человека неоднозначно. С одной стороны, накопленные к настоящему моменту научные знания из разных областей дали возможность всерьёз говорить о скорой 4й научно-технической революции, которая, предположительно, ознаменует начало новой эпохи высоких и продвинутых технологий. С другой стороны, негативное антропогенное влияние на экосистемы планеты, а также проблема ограниченности ресурсов заставляет человека пересмотреть свою деятельность на предмет экологичности и «устойчивости». В попытке предложить универсальное решение этих проблем, широкое распространение получила концепция устойчивого развития, призванная сбалансировать темпы экономического развития, не нанося ущерба экологии сверх актуальных сегодня темпов. Вместе с «устойчивым развитием» в развитых странах популярность приобрела и другая концепция – «экономика замкнутого цикла», постепенно обретающая силу и в России. Однако, несмотря на то что данная концепция охватывает почти все виды используемых человеком материалов для их рационального и многократного использования, такое привычное вещество, как CO<sub>2</sub>, является одним из наиболее проблемных вопросов современности и пока ещё не доступен для полезного многократного применения в количествах, необходимых для эффективной борьбы с изменением климата. Актуальность исследования состоит в рассмотрении путей использования углекислого газа в качестве полезного ресурса. Результатом работы является краткий анализ текущих инициатив в области декарбонизации; рассмотрение путей полезного использования CO<sub>2</sub> в будущем.

*I. A. ogli Guliyev, P. A. Kruzhilin*

Moscow State Institute International Relations Ministry of Foreign Affairs  
of the Russian Federation, Moscow, e-mail: guliyevia@bk.ru

## DECARBONIZATION: WAYS AND PROSPECTS FOR BENEFICIAL USE OF CARBON DIOXIDE

**Keywords:** decarbonization, carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, beneficial use of CO<sub>2</sub>, sustainable development, combating climate change.

Nowadays, humanity is on the edge of a new scientific and technological era, however, the future of man himself is ambiguous. On the one hand, the scientific knowledge accumulated in various fields of science has made it possible to seriously talk about the imminent 4th scientific and technological revolution, which, presumably, will mark the beginning of a new era of advanced technologies. On the other hand, the negative anthropogenic impact on the planet's ecosystems, as well as the problem of limited resources, makes us now reconsider our activities in order to reach "sustainability" and mitigate the climate change. In an attempt to offer a universal solution to these problems, the concept of sustainable development which is designed to balance the pace of economic development without causing damage to the environment beyond the current pace today has become widespread. Along with the "sustainable development" in developed countries, another concept of "circular economy" has gained prominence, which is gradually becoming popular in Russia as well. Despite the fact that this concept covers almost all types of materials used by man for their rational and repeated use, such a familiar substance as CO<sub>2</sub> is one of the most problematic issues of our time. That is mostly because it is not yet available for useful and "circular" utilization in the quantities that are necessary for the effective combating climate change. The relevance of the study lies in the consideration of ways to use carbon dioxide as a useful resource. A brief analysis of current initiatives in the field of decarbonization and a consideration of ways for the beneficial use of CO<sub>2</sub> in the future are results of this study.

На сегодняшний день, углекислый газ является, вероятно, основным веществом, которое невозможно или почти невозможно включить в техногенные и биологиче-

ские «круги» полезного использования с точки зрения экономики замкнутого цикла, предложенные фондом Эллен Мак Артур [1].

Метан, который тоже классифицируется как газ, способный вызвать «парниковый эффект» при накоплении в атмосфере, может быть, к примеру сожжён для генерации электроэнергии, однако, в результате этого образуется всё тот же углекислый газ.

Действительно, углекислый газ участвует в естественном фотосинтезе растений всей планеты. Тем не менее, вероятно, это единственный существенный способ его полезного использования, заложенный самой природой. Что же касается текущего использования  $\text{CO}_2$  человеком, его применение до недавнего момента времени осуществлялось:

- в пищевой промышленности (консервант, газирование напитков),
- в качестве защитной среды при сварке проволокой,
- в огнетушителях и системах пожаротушения.

При этом, будучи использованным, углекислый газ возвращается в атмосферу, где его концентрация неизменно растёт. Особенно быстрый рост объёмов выбросов углекислого газа приходится на период современной истории, начиная с середины двадцатого века (рисунок 1). Значительным исключением стал период пандемии вирусного заболевания Covid-19, для борьбы с которым во всём мире был объявлен карантин или «локдаун», из-за чего

объёмы выбросов в 2020 году снизились, а по итогу 2021 года составили порядка 36,4 млрд тонн [2].

Исторически, человечество пережило 3 энергоперехода: от дерева к углю; от угля нефти; от нефти к природному газу. Но если ранее основным драйвером энергоперехода была экономика, а именно удобство использования и конкурентоспособность затрат, то «ныне важными становятся экологические аспекты выбора энергоносителей» [3]. Так, человечество подошло к четвёртому энергопереходу, где на передний план выходят «более чистые» и возобновляемые источники энергии, призванные разрешить угрозу глобального изменения климата, которая, в свою очередь, напрямую связана с повышением концентрации углекислого газа в атмосфере планеты.

Тем не менее, на сегодняшний день (а по прогнозам специалистов и в следующие десятилетия) именно уголь, нефть и газ составляют основу мирового энергобаланса, что делает невозможным отказ от «классического» углеводородного топлива, что также актуализирует вопросы, связанные с утилизацией  $\text{CO}_2$ .

Именно поэтому цель данной статьи состоит в том, чтобы рассмотреть возможные пути полезного использования  $\text{CO}_2$  для его включения в «круги» циркулярной экономики.

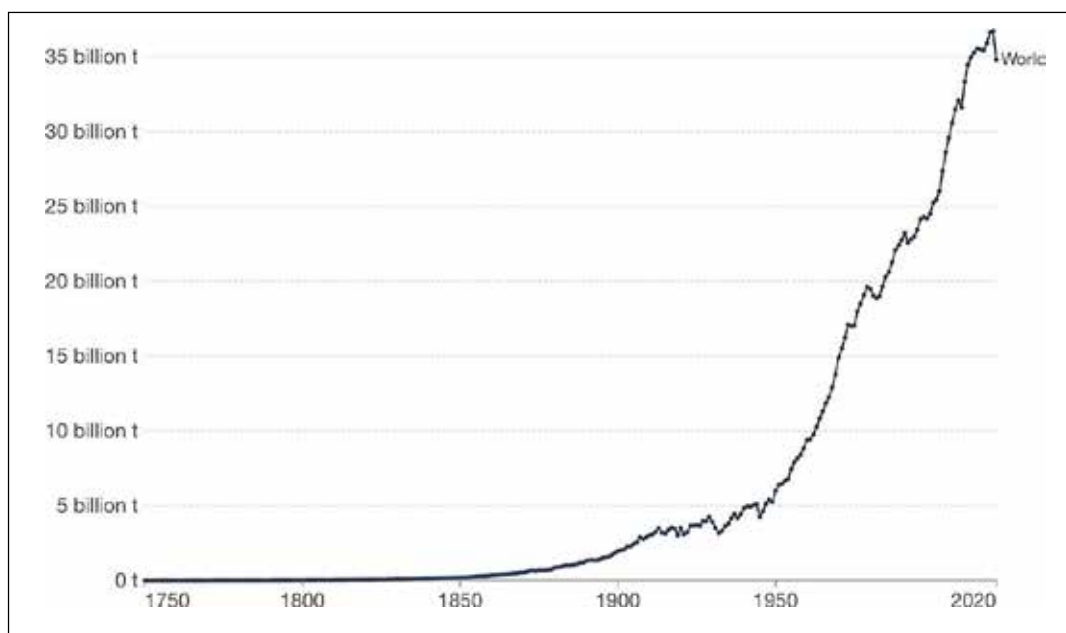


Рис. 1. Динамика общемировых выбросов углекислого газа  
 Источник: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>

Предпосылками к исследованию являются: климатическая повестка дня; нарастающее негативное влияние на экологию выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу; растущие общемировые потребности в энергии и стремление автора распространить принципы «экономики замкнутого цикла» на углекислый газ и некоторые связанные с ним элементы топливно-энергетического комплекса.

### *Декарбонизация*

Декарбонизация – это глобальный процесс «обезуглероживания» атмосферы планеты сильно актуализировавшийся после подписания «Парижского соглашения» по климату 2015 года. Важность и неотлагательность декарбонизации напрямую связано с глобальным изменением климата. От её успехов будет зависеть рост температуры в атмосфере планеты.

Деятельность в области декарбонизации можно условно разделить на два вида:

- снижение общего количества новых выбросов в атмосферу «парниковых газов», в данном конкретном случае – углекислого газа;
- отбор CO<sub>2</sub> из атмосферы с целью его хранения или полезного использования.

Решения, которые в итоге приводят к снижению затрачиваемой энергии и материалов, можно условно назвать «косвенной» декарбонизацией. Хотя именно здесь можно пронаблюдать наибольшие изменения в сторону «углеродной нейтральности».

Во-первых, это связано с тем, что стоимость многих технологий из области возобновляемой энергетики за последние годы существенно снизились. К примеру, стоимость 1 Мегаватта электроэнергии, полученной при помощи солнечной панели, снизилась с 359\$ до 40\$ в 2019 году; стоимость 1 Мегаватта электроэнергии за аналогичный период снизилась с 135\$ до 41\$. При этом, стоимость самих солнечных панелей снизилась со 106\$ до 38 центов за 1 ватт установленной мощности в период с 1976 по 2019 год (снижение стоимости ватта установленной мощности на 99,6%) [4]. Стоимость энергосберегающего оборудования также снизилась. Проиллюстрировать это можно на примере снижения стоимости светодиодных ламп и самих светодиодов. Так, цена на бытовую светодиодную лампу (эквивалент 60 Вт мощности) в период с 2011 по 2018 год снизилась с примерно 50\$ до 8\$ [5].

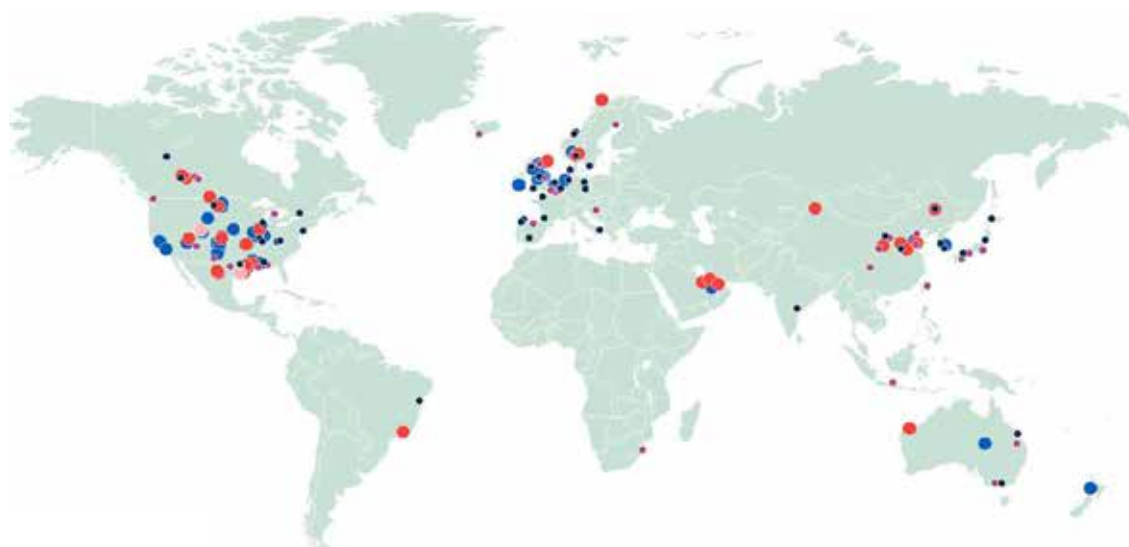
Во-вторых, с ростом осознанности социума в вопросах угроз изменения клима-

та подталкивает всё большее число социальных групп рациональнее использовать материалы и энергию, а также серьёзно относиться к сортировке отходов. В социально-культурной сфере происходит переход к такой философской парадигме, как биоцентрическая этика. [6] В свою очередь на государственном уровне реализуются мероприятия по утилизации или переработке отходов, а посредством различных медиаканалов ведётся «работа с населением» для их экологического просвещения. Крупные компании, тем временем, в своих ежегодных отчётах докладывают о снижении выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу и реализации мероприятий по повышению энергоэффективности. В-третьих, в 2015 году состоялось подписание «Парижского соглашения» для объединения усилий всего мира в области борьбы с изменением климата, что закрепило проблемы ограниченности ресурсов и изменения климата на высоком международном политическом уровне. Для реализации стратегий в области «устойчивого развития» сегодня создаются различные инструменты и драйверы, среди которых не безызвестный «углеродный налог», субсидии и преференции для пользователей автомобилями с электродвигателями и так далее.

Не менее важными являются проекты по улавливанию и хранению углерода. Такая инфраструктура создаётся с целью отбора углекислого газа напрямую из атмосферы и, в дальнейшем, его полезного использования или перманентного хранения в подземных хранилищах. Актуальность таких проектов состоит в том, что эффект от их работы наступает мгновенно.

Однако, согласно данным Европейской экономической комиссии ООН сегодня такие проекты способны отправить на постоянное хранение под землёй порядка 40 млн. тонн CO<sub>2</sub>, что уже сегодня позволяет компенсировать 0,1% общемировых выбросов [7]. Большая часть таких проектов создана из экономических соображений – для повышения газо- / нефтеотдачи на месторождениях. Географическое распределение проектов улавливания и хранения углеродов представлено на рисунке 2.

Предполагается, что в будущем экономический интерес к таким проектам будет возрастать по мере развития углеродного регулирования (введения «углеродного налога» и субсидий за «углеродную нейтральность»).



Красный цвет – Коммерческие объекты CCS (эксплуатация и строительство)  
 Синий цвет – Коммерческие объекты CCS в развитии  
 Розовый цвет – Работа приостановлена  
 Малиновый цвет – Пилот объекты (эксплуатация и разработка)  
 Черный цвет – Пилот объекты завершены

*Рис. 2. Обзор действующих проектов улавливания и хранения углерода  
 Источник: Европейская экономическая комиссия ООН со ссылкой на Глобальный институт CCS, 2020.  
 Геологическое хранение CO<sub>2</sub> в странах Восточной Европы, Кавказа  
 и Центральной Азии: первичный анализ потенциала и политики, 2021*

### **Полезное использование CO<sub>2</sub>**

Среди направлений полезного использования углекислого газа в данном исследовании сделан акцент на топливно-энергетическом комплексе и строительстве.

#### *Бетон из CO<sub>2</sub>*

Один из наиболее распространённых строительных материалов на планете одновременно является источником большого количества выбросов углекислого газа. Однако, группой учёных в Японии смогли создать бетон, где «вместо кальция, необходимого для реакции между цементом и водой» используется «карбонат кальция из бетонных отходов и уловленный из атмосферы углекислый газ» [8]. Несмотря на то, что конечный продукт несколько уступает в прочностных характеристиках, авторы пророчат материалу большое будущее, так как изготовленный из строительных отходов бетон вбирает в себя углекислый газ, преобразуя его в прочную окаменелость [9].

#### *Синтез биотоплива*

Перспективной технологией может стать и ещё одна: синтез низкоуглеродного биотоплива, в основе производства которого выступает улавливаемый, либо отбираемый

углекислый газ и вода. Перспективность этой технологии заключается в цикличном использовании топлива из углекислого газа и воды, в результате использования которого образуются всё те же: углекислый газ и вода. Таким образом производство топлива становится цикличным, что, в теории, может снизить долю ископаемого топлива и снизить прирост новых выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу.

На практике уже существуют компании, занимающиеся разработкой технологий преобразования углекислого газа в топливо. Так, например, в октябре 2021 года в Китае усилиями Даляньского института химической физики и компании Zhuhai Futian Energy Technology была создана и успешно прошла испытания установка, способная производить 1000 тонн топлива из углекислого газа. При этом, по заверениям авторов, технология энергоэффективна и имеет потенциал для масштабирования [10].

#### *Замещение части буферного газа в газовых коллекторах*

Актуальность использования CO<sub>2</sub> для замещения части буферного газа состоит в том, что объём буферного газа в коллекторе составляет порядка 50% от всего объёма газа,

при этом, буферный газ не извлекается из пласта, а «используется для обеспечения поддержания давления в пласте и предотвращения обводнения эксплуатационного фонда скважин» [11]. На практике для этих целей используют природный газ, не требующий дополнительных действий, ввиду того что сам по себе находится в разрабатываемом коллекторе, однако, существующая возможность использования CO<sub>2</sub> для замещения части объёма буферного газа позволит извлечь определённую выгоду.

Во-первых, учитывая тенденцию перехода к «более чистым» источникам энергии, природный газ становится наиболее предпочтительным энергоресурсом, особенно в развитых странах. При этом, согласно прогнозам Международного энергетического агентства и других аналитических агентств, потребность на энергоресурсы сохраняется, и ожидается, что общемировые потребности в энергии будут продолжать расти (рисунок 3). Природный газ, всё ещё не находящийся на пике своей популярности (его доля в мировом энергобалансе стабильно растёт), ещё долго будет востребован. Таким образом, замещение части буферного природного газа углекислым газом в сверхкритическом состоянии даёт возможность реализовать часть буферного резерва на внешнем рынке, что, с учётом текущих цен на природный газ, позволит извлечь существенную выгоду.

Во-вторых, захоронение CO<sub>2</sub> позволит добиться возможности «не покупать

квоты на выбросы углерода в атмосферу» [12], что позволит компаниям экономить на налогах «экологической категории». Более того, в странах запада уже существует практика приобретения «углеродных компенсаций» – когда сторонняя компания приобретает у компании, закачивающей углекислый газ в подземные хранилища квоту на эквивалентный объём собственных выбросов CO<sub>2</sub>, получая таким образом налоговые льготы в категории охраны окружающей среды. К примеру, у действующего проекта по улавливанию и хранению углерода «Orca» в Исландии таковые расценки на квоты варьируются от 600\$ за тонну CO<sub>2</sub> для крупных оптовых покупателей (например Microsoft) до 1200\$ за тонну CO<sub>2</sub> для предприятий малого бизнеса [13]. В случае с замещением части буферного газа экономический эффект, вероятно, удваивается.

В-третьих, выгода достигается за счёт снижения затрат на поиски подходящего подземного хранилища и возведения всей необходимой для этого инфраструктуры.

На практике, воплощение данных идей можно рассмотреть на примере газовых месторождений на Ямале в России. Формирование масштабной закачки CO<sub>2</sub> в нефтегазные коллекторы на Ямале целесообразно уже, потому что позволит и заместить эквивалентный объём природного газа и, как упоминалось ранее, реализовать добытый природный газ на внешнем рынке.

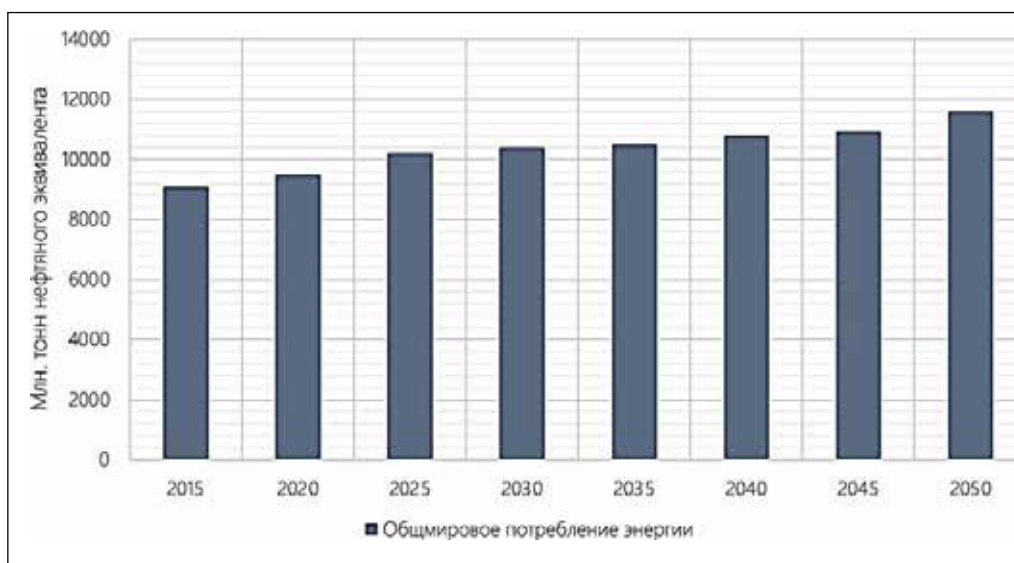


Рис. 3. Текущее состояние и прогноз общемировой потребности в энергии и энергоресурсах  
 Источник: составлено автором на основе данных Enerdata URL: <https://www.enerdata.net>

Таким образом срок эксплуатации «мегапроекта Ямал» продлевается пропорционально объёмам закачиваемого CO<sub>2</sub>. В дополнение к этому, открывается возможность разработки прилегающих к коллекторам месторождений газогидратов, так как одна из перспективных технологий по добыче метана из гидратов напрямую связана с использованием углекислого газа: он используется как «реагент» для замещения молекул метана в гидрате, высвобождая тем самым природный газ [14].

В будущем, при исчерпании ресурсов природного газа система газовых месторождений сможет стать одним из крупнейших подземных хранилищ CO<sub>2</sub> до тех пор, пока человечество не найдёт способ рентабельного использования углекислого газа другим образом. До тех пор, улавливание и хранение углерода на Ямале позволит компаниям и государству зарабатывать на продаже квот на вредные выбросы в атмосферу.

Сейчас человечество ещё ограничено в технологиях, однако, с их развитием углекислый газ может стать гораздо более востребованным ресурсом. В таком случае, изъятие CO<sub>2</sub> из пласта на участках, где уже имеется вся необходимая инфраструктура, на сегодняшний день кажется более рентабельным решением, чем его отбор из атмосферы.

Подводя итоги, стоит сказать, что не все решения относительно полезного использования CO<sub>2</sub> на данный момент способны внести существенный вклад в декарбонизацию. Большая часть проектов искусственно поддерживается заинтересованными государствами и энтузиастами, посильно борющимися с негативными последствиями изменения климата. Тем не менее, мир не стоит на месте и на международной повестке дня всё чаще можно увидеть предложения и перспективные технологии для полезного использования углеродов.

Несмотря на то, что такое направление использования CO<sub>2</sub>, как замещение части буферного газа на газовых месторождениях имеет ряд ограничений, связанных с подбо-

ром подходящего коллектора и организацией правильного расположения добывающих и нагнетающих скважин, данное решение способно отвечать текущим реалиям. Рентабельное замещение условно «полезного» природного газа, на «вредный» CO<sub>2</sub>, особенно, с учётом сохранения тенденции роста доли «более чистых» источников энергии в мировом энергобалансе и снижением долей угля и нефти в топливно-энергетическом комплексе видится первым шагом к безболезненной для экономик стран мира декарбонизации, которую в данном контексте можно с уверенностью назвать устойчивой.

Также, в завершении исследования, хотелось бы отметить немного и о перспективах полезного использования углекислого газа.

#### *Рентабельный синтез биотоплива*

Учитывая сложность и дороговизну синтеза биотоплива непосредственно из углекислого газа, на сегодняшний день сложно представить себе, что эта группа технологий может быть широко масштабирована. В этом и заключаются задачи науки в будущем – оптимизировать технологии для их органичного внедрения в топливно-энергетический комплекс.

#### *Производство нано-трубок*

Углеродные нано-волокна – материал, превосходящий такой универсальный конструкционный материал как сталь по прочности и гибкости имеет широкий диапазон использования от строительства до машиностроения и электроники.

В контексте использования углекислого газа этот революционный материал может не только снизить выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу, поскольку упрочняет существующие материалы, продлевая их срок жизни и эксплуатации, но и сами нано-трубки могут быть произведены из углекислого газа [15]. Сегодня нано-технологии являются очень дорогим производством, но в будущем, по мере снижения стоимости углеродных нано-трубок, они могут стать не только важнейшим материалом в жизни человека, но и внесут свой вклад в декарбонизацию.

#### *Библиографический список*

1. Circular economy systems diagram. Ellen McArthur Foundation. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram> (дата доступа: 09.03.2022).
2. Annual CO<sub>2</sub> emissions worldwide from 1940 to 2020. Statista. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/> (дата доступа: 11.02.2022).

3. Декарбонизация экономики и энергетических систем. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/521106-dekarbonizatsiya-ekonomiki-i-energeticheskikh-sistem/> (дата обращения: 10.03.2022).
4. Max Roser. Why did renewables become so cheap so fast? Our World in data. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth> (дата доступа: 23.02.2022).
5. Global LED Lighting Products Price Trend. 2018. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ledinside.com/news/2018/8/global\\_led\\_lighting\\_products\\_price\\_trend](https://www.ledinside.com/news/2018/8/global_led_lighting_products_price_trend) (дата обращения: 24.03.2022).
6. Кружилин П. Методологические аспекты моделирования и реализации проектов замкнутого производственного цикла в сфере утилизации отходов // Российский экономический вестник. 2022. Т. 5. № 2. С. 137-144.
7. Европейская экономическая комиссия ООН. Геологическое хранение CO<sub>2</sub> в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии: первичный анализ потенциала и политики. 2021.
8. Найден необычный способ уменьшения углекислого газа в атмосфере. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/20211007/beton-1753513884.html> (дата обращения: 28.01.2022).
9. Maruyama I. et al. A New Concept of Calcium Carbonate Concrete using Demolished Concrete and CO<sub>2</sub>. Journal of Advanced Concrete Technology. 2021. Volume 19. Issue 10. P. 1052-1060.
10. Chris Young. A new pilot project is successfully hydrogenating 95 percent of CO<sub>2</sub> into green fuel. Interesting engineering. [Электронный ресурс]. URL: [https://interestingengineering.com/pilot-project-hydrogenating-green-fuel?utm\\_source=ixbtcom](https://interestingengineering.com/pilot-project-hydrogenating-green-fuel?utm_source=ixbtcom). (дата обращения: 24.03.2022).
11. Дорохин В.Г. Методика использования углекислого газа в различных агрегатных состояниях на подземных хранилищах газа: дис. канд. тех. наук: 25.00.17. Москва, 2017. 119 с.
12. Давыдова А. Жарко не покажется. 2016. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.kommersant.ru/doc/2972387?utm\\_source=Viber&utm\\_medium=Chat&utm\\_campaign=Private](http://www.kommersant.ru/doc/2972387?utm_source=Viber&utm_medium=Chat&utm_campaign=Private) (дата обращения: 21.02.2022).
13. Ragnhildur Sigurdardottir, Akshat Rathi. World's Largest Carbon-Sucking Plant Starts Making Tiny Dent in Emissions. Bloomberg. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bloomberg.com/news/features/2021-09-08/inside-the-world-s-largest-direct-carbon-capture-plant#:~:text=Orca%20cost%20%2410%20million%20to,and%20storage%20C%20according%20to%20Wurzbacher> (дата обращения: 15.03.2022).
14. Мастепанов А.М., Степанов А.Д., Горвалов С.В., Белогорьев А.М. Нетрадиционный газ как фактор регионализации газовых рынков. М.: ИЦ «Энергия». 128 с.
15. Воздушные замки воплощаются в реальность благодаря материалам из CO<sub>2</sub>. ShareAmerica. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://share.america.gov/ru/воздушные-замки-воплощаются-в-реальн/> (дата обращения: 15.03.2022).