

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО ТОПЛИВА В ЭНЕРГЕТИКЕ

© 2025 г. Ю.П. Галченко^{а,*}

^аИнститут проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия

*E-mail: schtrek33@mail.ru

Поступила в редакцию 12.11.2024 г.

После доработки 12.12.2024 г.

Принята к публикации 16.12.2024 г.

В статье рассматривается комплекс вопросов, связанных с инженерной оценкой возможностей, обоснованием и созданием технологической концепции развития углеродно-нейтральной энергетики, использующей минеральное топливо. Проведён анализ механизмов достижения углеродной нейтральности систем естественной биоты благодаря замкнутому циклу обращения углерода, в котором его переход из энергетически пассивного состояния (неорганические соединения) в энергетически активное (органические соединения) происходит путём фотосинтеза. Сформулирована концепция технологии декарбонизации, подразумевающая формирование замкнутого цикла обращения углерода. На основе теорий природоподобных горных технологий и когнитивного резонанса составлена функциональная структура энерговоспроизводящего кластера тепловых электростанций с замкнутым циклом обращения углерода и выделением в атмосферу чистого кислорода. Такое преобразование технологии генерации тепловой энергии позволит не только достичь углеродной нейтральности, но и существенно сократит удельный расход первичного минерального топлива и объём отходов благодаря вторичному использованию углерода (связанного в процессе фотосинтеза) при декарбонизации продуктов сгорания.

Ключевые слова: углеродная энергетика, геоэкология, парниковый эффект, двуокись углерода, генерация тепловой энергии, гибридная технология, замкнутый углеродный цикл, кислород, технологический кластер, фотосинтез, декарбонизация газов, вторичное топливо, экономия минерального топлива.

DOI: 10.31857/S0869587325030032, EDN: СТРОJA

Энергетическая основа современной технологической цивилизации — углеродосодержащие энергоносители (минеральное топливо), извлекаемые из литосферы нашей планеты. В эту группу полезных ископаемых входят нефть, газ, уголь, горючие сланцы и торф. Согласно новейшим обзорам, в настоящее время энергообеспечение техносферы

осуществляется в основном за счёт угля — более 35% всей используемой энергии, а в Китае и Индии — до 80%. В России уголь уступил первенство природному газу, обеспечивая примерно 18% выработки энергии при общей доле всех видов минерального топлива чуть более 70% [1, 2].

Эффект глобального потепления объясняется выбросами парниковых газов (в первую очередь двуокиси углерода), неизбежно сопровождающими рост техносферы в рамках генеральной технологической парадигмы общества неограниченного потребления. В связи с этим на первый план вышла проблема декарбонизации отходов углеродной энергетики, поскольку от её решения зависит успешная реализация глобальной концепции устойчивого развития и национальной Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (распоряжение Правительства РФ № 1225-р от 31.08.2002 г.).



ГАЛЧЕНКО Юрий Павлович — доктор технических наук, главный научный сотрудник отдела горной экологии ИПКОН РАН.

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации [3, 4] связывает прогрессирующее накопление CO_2 в атмосфере с угольной энергетикой, со всеми невыгодными для России потенциальными ограничениями в области добычи этого вида полезных ископаемых. В качестве одного из путей решения этой экологической проблемы при подготовке стратегии были рассмотрены (но не задействованы вследствие технических и геоморфологических трудностей) опции технологии сжигания углеродсодержащего топлива с улавливанием и захоронением углекислого газа (Carbon Capture and Storage — CCS), подразумевающей выделение диоксида углерода из промышленных выбросов и закачивание его в сжатом виде в подземные геологические структуры для длительного хранения [5].

Следует отметить, что в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации впервые на столь высоком уровне была обозначена необходимость интенсификации работ по созданию различных модификаций природоподобных технологий как когнитивной основы для преодоления глобальных экологических противоречий за счёт экологизации технологической парадигмы развития техносферы в целом и её минерально-сырьевого комплекса в частности.

Современное положение дел и обоснование методологии решения проблемы. Углерод — энергетическая основа существования всего живого на планете. В естественной биоте он необходим для образования таких сложных молекул, как белки и ДНК. В рамках замкнутого углеродного цикла атомы углерода непрерывно перемещаются из атмосферы в биосферу и обратно с периодическим поглощением и выделением энергии [6–8]. Общий баланс углерода в этом круговороте представлен в таблице 1.

Появление и развитие *Homo sapiens* как биологического вида, существующего вне естественного баланса солнечной энергии, запустили процесс динамичного изменения естественного углеродного цикла. С одной стороны, формируя искусственную среду обитания, человек достаточно интенсивно

Таблица 1. Содержание углерода в естественном кругообороте [9]

Резервуар	Количество углерода, Гт
Атмосфера	530
Биота океанов	685–700
Биота экосистем суши	2000–2300
Пресноводная биота	1–3

разрушает биоту и меняет количественные характеристики природного углеродного цикла. С другой стороны, построив всю энергосистему антропосферы почти исключительно на минеральном топливе, человечество создало параллельную замкнутому природному круговороту углерода незамкнутую систему обращения законсервированного в литосфере органического углерода прошлых геологических эпох. Этот цикл начинается с добычи минерального топлива, включает использование энергии находящегося в нём углерода в различных антропогенных процессах и завершается депонированием углекислого газа в атмосфере со всеми вытекающими отсюда негативными последствиями. Динамика этих процессов отражена в таблице 2.

Согласно современной типизации кризисов, накопление CO_2 в атмосфере имело своим следствием возникновение напряжённой ситуации, дальнейшее усугубление которой неизбежно приведёт к полноценному кризису [12]. Поиск путей и методов устранения этой тенденции в настоящее время идёт по двум основным направлениям. Первое предусматривает замену минеральных энергоносителей возобновляемыми источниками энергии, второе предполагает изменение технологии использования минерального топлива в пользу полной очистки газообразных отходов энергогенерации от углекислого газа. Показатели и перспективы развития первого направления достаточно подробно рассмотрены в материалах Мирового энергетического агентства [11], а также ряда других аналитических центров [13, 14]. По результатам этих исследований

Таблица 2. Показатели антропогенного углеродного цикла [10, 11]

Показатель	Год								
	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2010	2020	2022
Добыча угля, млрд т / год	—	—	—	0.261	3.77	4.7	6.2	7.74	8.8
Добыча нефти, млрд т / год	—	—	0.201	0.52	2.303	2.8	3.58	4.175	4.407
Добыча природного газа, млрд м ³ / год	—	—	0.46	192	976.1	1969.7	3150.2	3860.6	4043.8
Эмиссия углерода, Гт/год	0.8	1	1.2	2.1	3.9	6.2	8.9	10.1	10.5
Концентрация CO_2 в атмосфере, ppm*	290	300	306	310	325	352	390	439	445

Примечание: * от англ. “parts per million” или “частей на миллион”.

построен график (рис. 1), из которого видно, что с начала XXI в. быстро развивается возобновляемая энергетика, и через 40–50 лет она может сравняться по объёму генерации с энергией, получаемой за счёт энергоносителей литосферы. Однако абсолютное доминирование “зелёной” энергии наступит, по мнению экспертов, в более отдалённой перспективе.

Идеологической основой второго направления борьбы с накоплением CO_2 в атмосфере служит (наряду с упомянутыми выше технологиями CCS) исследование возможностей снижения его количества за счёт физико-химических процессов минеральной декарбонизации газообразных отходов тепловых электростанций. В этом случае техногенный углекислый газ, вступая в реакцию с оксидами щёлочноземельных или щелочных металлов, либо с силикатными минералами, в условиях экзотермического отвода энергии образует твёрдые и химически стабильные карбонаты. Использование методики минеральной декарбонизации продуктов сжигания обусловлено наличием и концентрацией оксидов двухвалентных металлов (Ca^{2+} , Mg^{2+}), которые обычно присутствуют в составе силикатов, алюмосиликатов и гидроксидов, например, серпентинита ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), оливина ($(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$), волластонита (CaSiO_3) и т.п. При этом эффективность созданных на этой основе технологий определяется массовой долей катионов, которая, в свою очередь, влияет на скорость протекания реакций. Для связывания 1 т двуокиси углерода требуется от 1.6 до 3.7 т чистых природных силикатов [15], которые, как и минеральное топливо, надо добывать из литосферы, что влечёт за собой вторичные экологические проблемы.

Кроме того, обсуждаются технологии, в которых в качестве активного вещества, связывающего CO_2 , выступают продукты термической переработки бытовых или промышленных отходов [16]. Здесь возникает вполне очевидное внутреннее

противоречие — неизбежность выделения в атмосферу углекислого газа при первичной термической переработке отходов с целью получения активного вещества для последующего связывания CO_2 .

С общеэкологической точки зрения обе технологии декарбонизации газообразных продуктов сгорания углеродосодержащего топлива построены на том, что не замкнутый по углероду процесс получения тепловой энергии с депонированием CO_2 в атмосфере превращается в такой же не замкнутый по углероду процесс с образованием твёрдых отходов, депонируемых в абиоте природных экосистем. Таким образом, экологическая защита атмосферы от парникового газа во всех рассмотренных случаях обеспечивается за счёт адекватной по объёму связанного углерода экологической нагрузки на биосферу при размещении в ней дополнительных твёрдых отходов. В обозримом будущем не удастся полностью отказаться от использования углеродосодержащих горючих ископаемых. Поэтому необходимым условием практической реализации упомянутой государственной стратегии остаётся решение фундаментальной проблемы полной декарбонизации продуктов сгорания тепловых электростанций, в первую очередь угольных (с учётом реальной структуры сырьевой базы России).

Согласно основным положениям теории когнитивного резонанса, сигналы похожих объектов вызывают однотипный отклик в сознании субъекта [17]. Применительно к обсуждаемой проблеме это означает, что в методологическом плане технологические ответы на возникающие вызовы надо искать там, где они уже получены, то есть в схожих по целеполаганию биологических системах. Построив когнитивно-резонансную иерархию факторов, определяющую экологическую безопасность окисления углерода, можно воспроизвести функциональную структуру технологических систем, обладающих тем же качеством. Эта идея была впервые выдвинута более 20 лет назад в Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН (ИПКОН РАН) в виде гипотезы о взаимозависимости уровня экологической безопасности технических и биологических систем и степени единообразия принципов построения их функциональной структуры [18]. Последовательное развитие этой гипотезы в рамках поисковых исследований (11 грантов РФФИ) привело к формированию научных основ создания природоподобных горных технологий для подземной разработки месторождений твёрдых полезных ископаемых и способов адаптации типовых решений к изменяющимся горно-геологическим условиям [19–22]. Общеметодологические подходы к решению горнотехнических проблем и методы трансформации функциональной структуры биологических систем в технологические кластеры позволили сформулировать генеральную идею настоящей работы.

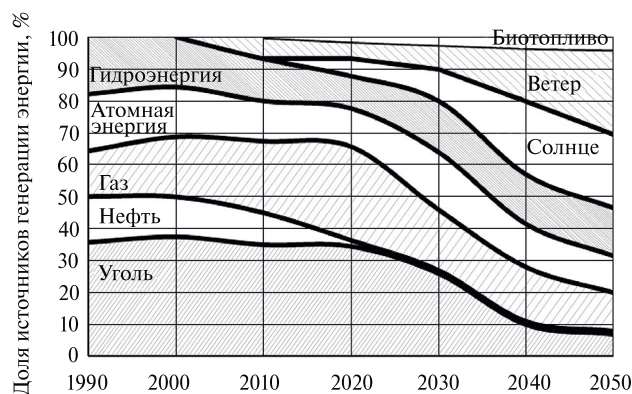


Рис. 1. Состояние и перспективы развития различных способов и источников генерации энергии в мире [11–14]

Реакция окисления углерода составляет энергетическую основу внутреннего развития как биологических, так и антропогенных технических систем, но с тем различием, что в первом случае она обеспечивает животворные силы природы, а во втором — служит источником одной из глобальных экологических проблем технократической цивилизации. Как и в случае с горными технологиями, идея состоит в применении законов и схем движения и преобразования углерода в биологических системах для обоснования функциональной структуры технических систем. Таким образом, общая методология решения данной проблемы представляет собой синтез функциональной структуры декарбонизированной технологии использования углеродосодержащего минерального топлива на основе анализа процессов и направлений потоков глобального биогеохимического цикла обращения углерода в естественных геосферах.

Учитывая абсолютно антагонистический характер противоречий между техно- и биосферой [19], методику исследований целесообразно строить на положениях гомеостатики, которые предполагают неразрушающее совмещение противоположностей путём поэтапного формирования геотехнологического гомеостата на основе гомеостата биологического, с заменой его содержательных элементов на технологические аналоги. Этот приём позволяет создавать из взаимодействующих антагонистов такие природно-технические системы, в которых новые экологические свойства технической составляющей формируются за счёт биоподобной функциональной структуры. Эти природоподобные технологии определяют как конвергентные [21].

Результаты исследований. В основе существования естественной биоты Земли лежит круговорот углерода, то есть его постоянное перемещение между биологическими объектами и неорганической

материей в составе абиоты. Этот процесс происходит по двум основным циклам, детально изученным и многократно описанным в литературе [9, 23, 24]. Постараемся рассмотреть их в контексте экологически безопасного получения энергии при сжигании минерального углеродосодержащего топлива. Углерод, находящийся в составе литосферы в чистом виде (графит, алмаз) или в форме неорганических соединений (карбонатные породы), а также углерод атмосферы в виде углекислого газа не может вступать в экзотермические реакции и поэтому не является потенциальным энергоносителем. Эти свойства он приобретает только в составе органических соединений, которые производят продуценты биологических систем, образуя биомассу.

Устойчивое развитие и экологическая чистота природно-равновесных систем естественной биоты обеспечиваются за счёт большого и малого циклов замкнутого биотического обмена, которые регулируются законом Вернадского—Бауэра (рис. 2) [21]. Обращение углерода в биоте сухопутных экосистем происходит по малому кругу и в масштабе времени, определяемом продолжительностью жизни растений. Фотосинтез — двусторонний процесс. В светлое время суток углерод участвует в синтезе органических кислот. При этом каждая молекула CO_2 , полученная из атмосферы, освобождает в результате расщепления воды одну молекулу кислорода, которая возвращается в атмосферу. Ночью энергия и восстановительные силы этих кислот под контролем ферментов затрачиваются на образование нового органического вещества [9]: $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{энергия солнца (2.7 МДж)} + \text{хлорофилл} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$.

В ходе этой реакции возобновляемая энергия солнечного излучения преобразуется во внутримолекулярную энергию органических соединений и таким образом возвращает неорганическому углероду способность вступать в экзотермические

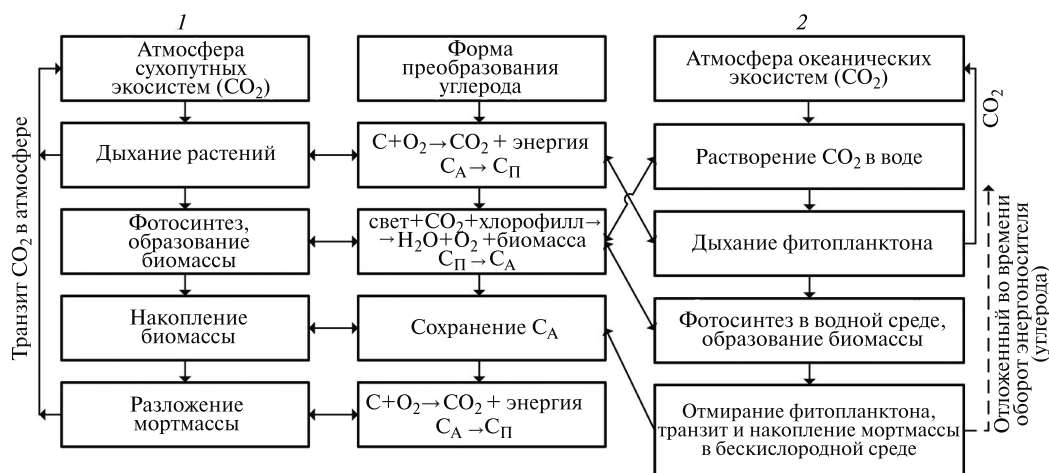


Рис. 2. Схема движения и преобразования углерода в системах сухопутных (1) и водных (2) продуцентов
C_A — углерод в составе органических соединений; C_П — углерод в составе неорганических соединений

реакции. В биомассе продуцентов, составляющих сухопутные растительные сообщества, эти соединения в основном представлены углеводами с общей формулой $C_m(H_2O)_n$ и лигнином, приближительная брутто-формула которого имеет вид $(C_{31}H_{34}O_{11})_{12}$. Групповой вещественный состав основных продуцентов представлен в таблице 3. По истечении срока жизни растений углеродосодержащие органические соединения попадают в почву в виде мортмассы. Под воздействием почвенной биоты она минерализуется с образованием таких конечных продуктов, как CO_2 и H_2O . Выход углекислого газа из педосферы в атмосферу замыкает цикл обращения углерода в экосистемах суши и обнуляет общий кислородный баланс систем продуцентов.

Большой круг биологического обмена углерода между атмосферой и гидросферой связан с жизнедеятельностью водных экосистем, прежде всего океанических. Удельная продуктивность фотосинтеза в гидросфере несколько меньше, чем на суше, а общая масса фитопланктона существенно уступает массе сухопутных продуцентов. Однако годовая продукция фотосинтеза в водных экосистемах соизмерима с сухопутными вследствие огромной разницы в продолжительности жизни фотосинтетиков в сравниваемых системах. Оборот фотосинтезирующей биомассы и её полное обновление в гидросфере более чем в 3000 раз выше, чем в экосистемах суши [9]. Образующаяся в итоге мортмасса фитопланктона, в которой углерод находится в составе органических соединений и способен вступать в экзотермические реакции, осаждаясь в бескислородной водной среде, не разлагается с выделением CO_2 и энергии, а накапливается в донных отложениях, замыкая тем самым углеродный цикл, но уже в масштабе геологического времени.

Совместное развитие техносферы и биосферы, сопряжённое через идеологию коэволюции [25] антагонистов, всегда осуществляется в виде моделей управляемых природно-технических систем, в которых техногенная экологическая нагрузка лимитирована ресурсом самовосстановления биоты. Очевидно, что в сфере энергетики выполнение этого условия возможно только в том случае, когда использование и преобразование основного энергоносителя в технической составляющей системы происходит в режиме замкнутого круговорота вещества, который обеспечивает устойчивое развитие природной составляющей.

С помощью теории блочно-иерархического строения природы и правила блочно-иерархического отбора (правило БИО) достаточно просто сформировать общую методологию подхода к достижению углеродной нейтральности при генерации тепловой энергии на электростанциях, сжигающих минеральное топливо. Так как каждый высший иерархический уровень можно рассматривать как совокупность блоков низшего уровня, а низший уровень — как совокупность следующих за ним более мелких блоков-фрагментов, вполне осуществима и обратная задача: путём целенаправленного отбора фрагментов нижнего иерархического уровня по правилу БИО можно сформировать блоки высшего уровня, которые соответствуют реальным явлениям другого класса [26]. В этом случае компоновку целого технологического кластера отбора тепловой энергии углеродного топлива из входящих в него фрагментов (этапов движения и преобразования угля) можно осуществить последовательно, переходя от малых блоков к более крупным, разделяя этот процесс на уровни с последующим отбором по критерию совпадения направлений преобразования углерода. С помощью компоновки исполнительных кластеров конвергентных горных технологий можно построить схему гомеостатической трансформации внутренней структуры океанического цикла замкнутого обращения углерода в функциональную технологию декарбонизации продуктов сгорания минерального топлива. Производится подбор соответствующих целевых аналогов по критерию гомеостатического перехода (совпадение формы преобразования углерода). Биохимическая концепция формирования замкнутого круговорота углерода как основного энергоносителя, обеспечивающего существование биосферы, может быть легко преобразована в рабочую технологию использования минерального топлива для генерации тепловой энергии с практически полной углеродной нейтральностью и дополнительными выбросами свободного кислорода в атмосферу.

Отсутствие антропогенных технологий, полноценно воспроизводящих процесс фотосинтеза, делает невозможным замену соответствующего содержательного элемента биологического гомеостата на втором этапе природного замкнутого цикла обращения углерода (см. рис. 2) на технологический целевой аналог. Поэтому для восстановления энергоспроизводящей функции углерода в функцио-

Таблица 3. Групповой вещественный состав сухопутных продуцентов [9]

Продуценты	Доля органических соединений, %			
	Липиды	Белки	Углеводы	Лигнин
Высшие растения	<5	5–10	>50	>25
Лишайники и мхи	8–10	15–30	30–40	10



Рис. 3. Гомеостатическая трансформация биологического цикла обращения углерода в океанических экосистемах в функциональную структуру конвергентной технологии гибридного типа для декарбонизации газообразных отходов горения минерального топлива

нальную структуру технологии встраивают чисто биологический процесс — фотосинтез в заселённой фитопланктоном водной среде рабочего водоёма. В горнопромышленных районах для этого могут использоваться отработанные рудные или угольные карьеры. Оптимальная плотность популяции фитопланктона определяется механизмами пищевого гомеостаза и условиями динамического равновесия в зависимости от объёма поступающей и поглощаемой двуокиси углерода. В этом случае технология, оставаясь конвергентной по содержанию, становится гибридной по форме (рис. 3) [27].

Газообразные продукты сгорания первичного минерального топлива подаются в водную среду путём воздушно-пузырькового барботажа через систему распыления. Для поддержания круглосуточного фотосинтеза в активном слое водной среды устанавливают стационарные осветительные приборы, расстояние между которыми определяют в зависимости от оптимальной для фотосинтеза освещённости (в соответствии с законом Бугера—Ламберта—Бера¹). Система освещения питается

от солнечных батарей, размещённых на породных отвалах, необходимая температура воды соблюдается за счёт температуры газообразных продуктов сжигания топлива [28, 29].

При движении пузырьков через освещённую воду углекислый газ растворяется и включается в процесс фотосинтеза фитопланктона, обеспечивая прирост биомассы и высвобождение кислорода в атмосферу. Образующийся в результате жизнедеятельности фитопланктона детрит осаждается и собирается в виде донных отложений мортмассы. Смесь донных отложений с водой (пульпа) периодически откачивается, поступает в блок обезвоживания и используется для производства вторичного топлива, которое возвращается в начало процесса генерации тепловой энергии и сжигается в смеси с первичным топливом, замыкая технологический цикл обращения углерода. Реализация гибридной технологии декарбонизации получения тепловой энергии из минерального топлива будет полностью зависеть от вида топлива и его конкретных характеристик. В результате исследований особенностей энергетического использования угля, выполненных в ИПКОН РАН, были получены патентоспособные [30, 31] и непротиворечивые системы, техническое обеспечение которых соответствует современному уровню развития отрасли.

¹ Закон Бугера—Ламберта—Бера определяет постепенное ослабление параллельного монохроматического (одноцветного) пучка света при распространении его в поглощающем веществе.

* * *

Энергетическую основу современной технократической цивилизации до сих пор составляют углеродосодержащие энергоносители, добываемые из литосферы, в первую очередь уголь и природный газ. Генерация тепловой энергии на электростанциях происходит в рамках незамкнутого углеродного цикла с полным депонированием образующегося углекислого газа в атмосфере.

Определяющую роль в возникновении эффекта глобального потепления и нарастающих кризисных климатических явлений играет накопление техногенных парниковых газов в атмосфере, что неизбежно при стремительном росте энерговооружённости антропосферы. Поиск путей решения этих проблем ведётся по двум основным направлениям:

- замена минеральных энергоносителей возобновляемыми источниками энергии;
- выделение углекислого газа из поступающих в антропосферу газообразных продуктов сжигания минерального топлива, его обработка и принудительное депонирование в других геосферах Земли.

Результаты различных прогнозных исследований, включая последние расчёты, выполненные с применением методов интеллектуального анализа и моделирования на основе нейронных сетей, показали, что, несмотря на приоритет “зелёной” энергетики, тепловая энергетика на основе ископаемых энергоносителей в обозримой перспективе сохранит своё положение в общем объёме генерации энергии, хотя и снизит её долю с современных 58% до 20–25% после 2050 г.

На основе когнитивного анализа механизмов преобразования углерода в малом и большом замкнутых циклах биологического обмена в биоте сухопутных и океанических экосистем получена общая методология создания принципиально нового гибридного варианта конвергентной технологии декарбонизации газообразных отходов, возникающих в ходе сжигания минерального топлива. Прекращение выброса в атмосферу углекислого газа (независимо от типа топлива) обеспечивается за счёт того, что углерод как основной теплоноситель в технологической схеме обращается по замкнутому циклу с выделением свободного кислорода.

Применение новой биоподобной функциональной структуры при формировании технологического кластера открывает реальную перспективу достижения углеродной нейтральности при использовании минерального топлива в энергетике и решения одной из самых острых экологических проблем современности путём устранения её причин, а не борьбы с последствиями. Предлагаемая гибридная технология декарбонизации тепловой генерации энергии для угольных электростанций защищена патентом.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственного задания FMMS-2024.0100.2024-2028 ИПКОН РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / Под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. М.: ИНЭИ РАН — Московская школа управления SKOLKOVO, 2019.
Forecast of the development of energy in the world and Russia 2019 / Ed. by A.A. Makarov, T.A. Mitrova, V.A. Kulagin. Moscow: ERI RAS — Moscow School of Management SKOLKOVO, 2019. (In Russ.)
2. Statistical Review of World Energy 2020. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> (дата обращения 12.12.2020).
3. Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р “Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года”.
Decree of the Government of the Russian Federation of October 29, 2021 no. 3052-r “On Approval of the Strategy for Socio-economic Development of the Russian Federation with low Greenhouse Gas Emissions until 2050”. (In Russ.)
4. Указ Президента РФ от 28 февраля 2024 г. № 145 “Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации”.
Decree of the President of the Russian Federation of February 28, 2024 no. 145 “Strategy of scientific and technological development of the Russian Federation”. (In Russ.)
5. Архипов В.Н., Яценко С.А., Анкундинов А.А. и др. Технология CCS: от теории к практике // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 8. С. 107–110.
Arkhipov V.N., Yashchenko S.A., Ankundinov A.A. et al. CCS technology: from theory to practice // Exposition Oil Gas. 2023, no. 8, pp. 107–110. (In Russ.)
6. Хейзен Р. Симфония № 6. Углерод и эволюция почти всего. М.: Альпина нон-фикшн, 2021.
Hazen R.M. Symphony in C: Carbon and the Evolution of (Almost) Everything. N.Y.—London: W.W. Norton & Company, 2019.
7. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter7-1.pdf>
8. <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07602-x>
9. Лабутова Н.М., Банкина Т.М. Основы биогеохимии. СПб: Изд-во СПбГУ, 2013.
Labutova N.M., Bankina T.M. Fundamentals of biogeochemistry. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publishing House, 2013. (In Russ.)

10. globalcarbonatlas.org (дата обращения: 15.07.2024).
11. World Energy Outlook 2024. <https://www.iea.org/dsta-and-statistics>
12. Окрушко В.Я. Содержание кризисного процесса в антикризисном управлении // Проблемы современной экономики. 2010. № 2 (34). С. 12–88.
Okrushko V.Ya. The content of the crisis process in anti-crisis management // Problems of modern economics. 2010, no. 2 (34), pp. 12–88. (In Russ.)
13. Доля солнца и ветра в глобальной выработке электроэнергии может достичь 40% в 2030 г. // Renen.ru, 26 сентября 2023 г.
The share of solar and wind in global electricity generation may reach 40% in 2030 // Renen.ru, September 26, 2023. (In Russ.)
14. Renewable Energy Capacity Statistics 2023. Irena, 2024.
15. Улавливание и хранение двуокиси углерода. С. 4, рис. РП.3. https://ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_spm_ts_ru.pdf
Carbon dioxide capture and storage. P. 4, fig. RP.3. (In Russ.)
16. Колодежная Е.В., Шадренова И.В., Гаркави М.С. Потенциал использования шлаков мусоросжигательных установок для связывания углекислого газа // Экология и промышленность России. 2022. № 3. С. 40–45.
Kolodezhnaya E.V., Shadrinova I.V., Garkavi M.S. Potential of using waste incinerator slag to sequester carbon dioxide // Ecology and industry of Russia. 2022, no. 3, pp. 40–45. (In Russ.)
17. Хмылёв В.Л., Кондрасюк В.А. Коммуникативные стандарты интенсивности когнитивного резонанса // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 390. С. 66–72.
Khmylev V.L., Kondrasyuk V.A. Communication standards of cognitive resonance intensity // Tomsk State University Journal. 2015, no. 390, pp. 66–72. (In Russ.)
18. Галченко Ю.П. Экологический кризис и кризис экологии // Экологические системы и приборы. 2004. № 6. С. 12–21.
Galchenko Yu.P. Ecological crisis and crisis of ecology // Ecological systems and devices. 2004, no. 6, pp. 12–21. (In Russ.)
19. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П. Геоэкология освоения недр и экогеотехнология разработки месторождений. М.: Научтехлитиздат, 2015.
Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P. Geoecology of subsurface development and ecogeotechnology of field development. Moscow: Nauktechlitizdat, 2015. (In Russ.)
20. Галченко Ю.П., Сабянин Г.В. Проблемы геотехнологии жильных месторождений. М.: Научтехлитиздат, 2011.
Galchenko Yu.P., Sabyanin G.V. Problems of geotechnology of vein deposits. Moscow: Nauktechlitizdat, 2011. (In Russ.)
21. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П. Природоподобная геотехнология комплексного освоения недр: проблемы и перспективы. М.: Научтехлитиздат, 2020.
Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P. Nature-like geotechnology of integrated subsoil development: problems and prospects. Moscow: Nauktechlitizdat, 2020. (In Russ.)
22. Галченко Ю.П., Ерёмченко В.А. Природно-технические системы подземной разработки месторождений на основе конвергентных горных технологий. М.: Горная книга, 2023.
Galchenko Yu.P., Eremenko V.A. Natural and technical systems of underground mining based on convergent mining technologies. Moscow: Gornaya kniga, 2023. (In Russ.)
23. Замолодчиков Д.Г. Углеродный цикл и изменения климата // Окружающая среда и энергосбережение. 2021. № 2. С. 53–69.
Zamolodchikov D.G. Carbon cycle and climate change // Journal of Environment Earth and Energy Study. 2021, no. 2, pp. 53–69. (In Russ.)
24. Falkowski P., Scholes R.J., Boyle E. et al. The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System // Science journal. 2000, no. 549, pp. 291–296.
25. Моисеев Н.Н. Избранные труды. Т. 2. Междисциплинарные исследования глобальных проблем. М.: Тайдекс Ко, 2003.
Moiseev N.N. Selected works. Vol. 2. Interdisciplinary studies of global problems. Moscow: Tydex Co., 2003. (In Russ.)
26. Иваницкий Г.Р. Вирази закономерностей. Правило БИО-стержень науки. М.: Наука, 2011.
Ivanitsky G.R. Turns of patterns. The BIO rule is the core of science. Moscow: Nauka, 2011. (In Russ.)
27. Киричек А.В., Федонин О.Н., Хандожко А.В. и др. Гибридные технологии и оборудование аддитивного синтеза изделий // Научно-технические технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 31–38.
Kirichek A.V., Fedonin O.N., Khandozhko A.V. et al. Hybrid technologies and technical equipment for additive synthesis of products // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no. 8 (134), pp. 31–38. (In Russ.)
28. Лантев В.А., Лантева А.Г. Гидродинамика барботажных аппаратов. Казань: Центр инновационных технологий, 2017.
Laptev V.A., Lapteva A.G. Hydrodynamics of barbotage apparatuses. Kazan: Center for Innovative Technologies, 2017. (In Russ.)
29. Козерук А.С., Грищенко А.В. Расчёт освещённости от источников различного типа. Минск: БНТУ, 2020.

- Kozeruk A.S., Grishchenko A.V.* Calculation of illumination from sources of various types. Minsk: BNTU, 2020. (In Russ.)
30. *Захаров В.Н., Галченко Ю.П., Калабин Г.В.* Патент РФ № 2792065 “Способ обеспечения углеродной нейтральности использования угля для генерации тепловой энергии при работе электростанций”. Заявка № 2022117540, приоритет 27.06.2022 г., опублик. 16.03.2023 г., бюлл. № 8. *Zakharov B.N., Galchenko Yu.P., Kalabin G.V.* Patent of the Russian Federation no. 2792065 “A method for ensuring carbon neutrality of the use of coal for generating thermal energy during operation of power plants”. (In Russ.)
31. *Захаров В.Н., Галченко Ю.П., Калабин Г.В.* Способ ресурсосберегающей и малоотходной декарбонизации процесса генерации тепловой энергии при работе электростанций, использующих уголь. Заявка № 2024120416 от 19.07.2024 г. *Zakharov V.N., Galchenko Yu.P., Kalabin G.V.* A method of resource-saving and low-waste decarbonization of the thermal energy generation process during operation of coal-fired power plants. Application no. 2024120416 of 07.19.2024. (In Russ.)

ENSURING CARBON NEUTRALITY OF THE USE OF MINERAL FUELS IN THE ENERGY SECTOR

Yu.P. Galchenko^{a,*}

^a*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: schtrek33@mail.ru*

The article considers a set of issues related to the engineering assessment of capabilities, justification and creation of a technological concept for the development of carbon-neutral energy using mineral fuels. The analysis of the mechanisms for achieving carbon neutrality of the energy supply of natural biota systems is carried out. It is shown that this is ensured due to a closed cycle of carbon conversion, in which its transition from an energetically passive state (inorganic compounds) to an energetically active state (organic compounds) occurs during photosynthesis. The concept of decarbonization technology has been formulated, implying the formation of a closed carbon circulation cycle. Based on the theories of nature-like mining technologies and cognitive resonance, the functional structure of an energy-reproducing cluster of thermal power plants with a closed cycle of carbon conversion and the release of pure oxygen into the atmosphere has been compiled. Such a transformation of thermal energy generation technology will not only achieve carbon neutrality, but also significantly reduce the specific consumption of primary mineral fuels and the amount of waste due to the secondary use of carbon (bound in the process of photosynthesis) during decarbonization of combustion products.

Keywords: carbon energy, geoecology, greenhouse effect, carbon dioxide, thermal energy generation, hybrid technology, closed carbon cycle, oxygen, technological cluster, photosynthesis, decarbonization of gases, secondary fuel, mineral fuel economy.