



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)  
УДК 66.095.628:579.222.2

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.008



## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ВЫСОКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

Евгений Николаевич Неверов<sup>1</sup>, Игорь Алексеевич Короткий<sup>2</sup>,  
Павел Сергеевич Коротких<sup>3</sup>, Голубева Надежда Сергеевна<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

<sup>1</sup> neverov42@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3542-7860>

<sup>2</sup> krot69@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7623-094>

<sup>3</sup> korotkix42@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4546-0276>

<sup>4</sup> golubeva.n.s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2188-8331>

**Аннотация.** Вопрос декарбонизации на протяжении последних лет остается основным в области мировой экологии. Приоритетным направлением для уменьшения карбонового следа является повышение эффективности выработки электроэнергии, основанной на сжигании углеродного топлива, а также развитие собственных компетенций в технологиях современной когенерации. Введение новых ограничительных мер в области снижения экологической нагрузки на климат способствуют снижению рентабельности целого ряда промышленных объектов без введения новейших технологий по переработке и улавливанию углекислого газа, образующегося в процессе производства. Технологии улавливания CO<sub>2</sub> в настоящее время охватывают в той или иной степени все промышленные направления, связанные с выбросом CO<sub>2</sub>, но недостаточно развиты. Используя технологии улавливания углекислого газа, появляется важная стадия по его транспортировке к местам производства или хранения – с помощью газопровода или в сжиженном состоянии, что достаточно проблематично и требует дополнительных затрат. Поэтому в статье представлен обзор наиболее перспективных способов утилизации и намечены векторы их развития.

**Ключевые слова:** декарбонизация, диоксид углерода, цикл Аллама, утилизация, таблетирование, выбросы, когенерация, низкопотенциальная энергия.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках КНТП полного инновационного цикла, распоряжение Правительства РФ от 11.05.2022, N1144-р, № соглашения 075-15-2022-1201.

**Для цитирования:** Перспективные направления декарбонизации промышленного производства с высокой составляющей углеродного следа в выпускаемой продукции / Е. Н. Неверов [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т.2. С. 54–65. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.008. EDN: <https://elibrary.ru/ZBADAA>.

Original article

## PROMISING DIRECTIONS FOR DECARBONIZATION OF INDUSTRIAL PRODUCTION WITH A HIGH CARBON FOOTPRINT IN OUTPUT PRODUCTS

Evgeniy N. Neverov <sup>1</sup>, Igor A. Korotkiy <sup>2</sup>, Pavel S. Korotkih <sup>3</sup>,  
Nadezhda S. Golubeva <sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

<sup>1</sup> neverov42@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3542-7860>

<sup>2</sup> krot69@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7623-094>

<sup>3</sup> korotkix42@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4546-0276>

<sup>4</sup> golubeva.n.s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2188-8331>

**Abstract.** The issue of decarbonization has remained the main one in the field of global ecology in recent years. The priority direction for reducing the carbon footprint is to increase the efficiency of electricity generation based on the combustion of carbon fuels, as well as the development of their own competencies in modern cogeneration technologies. The introduction of new restrictive measures in the field of reducing the environmental burden on the climate contribute to reducing the profitability of a number of industrial facilities without introducing the latest technologies for processing and capturing carbon dioxide generated during production. Carbon dioxide capture technologies currently cover, to one degree or another, all industrial areas related to carbon dioxide emissions, but are not sufficiently developed. Using carbon dioxide capture technologies, an important stage appears for its transportation to production or storage sites – using a gas pipeline or in a liquefied state, which is quite problematic and requires additional costs. Therefore, the article provides an overview of the most promising methods of recycling and outlines the vectors of their development.

**Keywords:** decarbonization, Carbon dioxide, Allama cycle, disposal, tableting, emissions, co-generation, low-potential energy.

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the CSTP of the full innovation cycle, the decree of the Government of the Russian Federation of 11.05.2022, N1144-p, N agreements 075-15-2022-1201.

**For citation:** (2022). Neverov, E. N., Korotkiy, I. A., Korotkih, P. S. & Golubeva, N. S. (2022). Promising directions for decarbonization of industrial production with a high carbon footprint in output products. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 54-65. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.008. EDN: <https://elibrary.ru/ZBADAA>.

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно стратегии социально-экономического развития, в рамках федерального проекта «Чистый воздух» национального проекта «Экология», следует обеспечить снижение атмосферных выбросов, загрязняющих веществ и парниковых газов [1]. Для этого необходимо модернизировать существующие энергетические системы с целью значительного уменьшения выбросов CO<sub>2</sub>, что в перспективе обеспечит уменьшение влияния на экологию и реализацию утвержденной стратегии.

В настоящее время во всех сферах деятельности человека имеет место дефицит энергетических ресурсов. Потребность в тепловой и электрической энергии ежегодно увеличивается. При этом значительная доля

вырабатываемой энергии обеспечивается за счёт сжигания различного вида топлива. Общее годовое мировое потребление электроэнергии выросло с 21400 ТВт·ч в 2019 г. до 26500 ТВт·ч в 2020 г. Глобальный спрос ежегодно будет увеличиваться на 2,4 %. По другим данным, мировой спрос на электроэнергию к 2040 г. увеличится на 60–75 % относительно 2021 г.

Суммарная генерация электрической энергии на станциях единой энергетической системы (ЕЭС) России в 2021 г. составила 1114,5 млрд. кВт·ч (рост электрогенерации по сравнению с предыдущим годом составил 6,5 %). Распределение производства электроэнергии по типам генерации произошло следующим образом: ТЭС (тепловые электростанции) – 609,2 млрд. кВт·ч (рост производства на 9,9 %); ГЭС (гидроэлектростан-

ции) – 209,5 млрд. кВт·ч (рост на 1,0 %); АЭС (атомные электростанции) – 222,2 млрд кВт·ч (рост на 3,1 %); ВЭС (ветряные электростанции) – 0,36 млрд. кВт·ч (рост на 162,4 %); СЭС (солнечные электростанции) – 0,23 млрд. кВт·ч (рост на 13,7 %) [2]. На электростанциях предприятий за 2021 г. выработали 67,7 млрд кВт·ч (на 1,9 % больше, чем в 2020 г.). Таким образом, в целом доля тепловой генерации, вырабатываемой в России электрической энергии, составляет более 50 %. Причем динамика роста тепловой генерации значительно опережает другие значимые виды электрогенерации. Доля ветряной

и солнечной генерации в энергетическом балансе России крайне незначительна и носит, скорее, имиджевый характер [3]. Другие виды генерации электроэнергии в России (геотермальные, приливные и др.) имеют прикладное значение для энергоснабжения удаленных объектов, не включенных в ЕЭС России, а также они имеют большое значение в исследовательских целях, направленных на развитие этих способов производства электроэнергии.

Данные по объемам выработанной электроэнергии за 2021 г. представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Объемы выработанной и потребляемой электроэнергии за 2021 г. в РФ

Table 1 - Volumes of generated and consumed electricity for 2021 in the Russian Federation

Объединенная энергетическая система (ОЭС)	Производство, кВт·ч·10 <sup>-9</sup>	К предыдущему году, %	Потребление, кВт·ч·10 <sup>-9</sup>	К предыдущему году, %
Северо-Запада	115,4	8,6	97,5	5,8
Центра	255,5	10,7	256,3	6,8
Юга	110,2	7,1	108,3	7,5
Средней Волги	110,9	1,4	111,4	6,6
Урала	259,7	5,2	256,7	4,2
Сибири	215,9	4,3	217,3	3,8
Востока	46,9	6,9	42,9	5,3
Итого	114,5	6,5	1090,4	5,5

Важным климатическим трендом последних десятилетий в истории Земли является развивающийся, а по некоторым оценкам, ускоряющийся процесс глобального потепления. В значительной степени процесс глобального потепления, в соответствии с согласованным мнением мирового научного сообщества, происходит благодаря техногенной деятельности человечества. Увеличение содержания в атмосфере планеты так называемых парниковых газов, которые нарушают естественный энергообмен Земли с окружающим космическим пространством, обуславливает стабильный рост среднего температурного уровня на планете от года к году. Одним из наиболее значимых парниковых газов, увеличение содержания которого в земной атмосфере происходит благодаря человеческой деятельности, является углекислый газ. Выбросы углекислого газа в атмосферу от химических, биохимических, биологических процессов называют карбоновым, или углеродным следом. Значительная доля карбонового следа, накапливающегося в атмосфере, происходит в результате хозяйственной дея-

тельности человечества. При этом основу хозяйственной деятельности составляет энергетика. А наиболее весомым «вкладчиком» в энергетический баланс является тепловая энергогенерация. Таким образом, с точки зрения развития экологически безопасных производств, одним из наиболее важных направлений прикладной науки является исследование и разработка технологий энергогенерации, имеющих значительно сниженный карбоновый след.

В обозримом будущем долю тепловой энергогенерации в глобальных энергетических балансах невозможно заменить альтернативными способами производства энергии, поэтому единственным выходом является разработка эффективных технологий энергогенерации с более высоким КПД и меньшим количеством выбросов CO<sub>2</sub>, а также методов полезной утилизации производимого при получении энергетических ресурсов углекислого газа.

Современные технологические решения рациональной утилизации карбоновых выбросов позволяют не только получить положительный экологический эффект от утилизации углекисло-

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ВЫСОКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

го газа, но и произвести экономический эффект от уменьшения расходуемых ресурсов.

**Целью работы** является анализ предлагаемых методов по переработки CO<sub>2</sub> и предложение современных технологий по его использованию и утилизации.

В данной статье рассмотрены следующие вопросы:

- анализ мирового и Российского опыта по утилизации и переработки CO<sub>2</sub>;
- предложение новых эффективных технологий по утилизации и переработки CO<sub>2</sub>.

### МЕТОДЫ

Одним из направлений промышленной утилизации углекислого газа является закачка его в виде раствора в воде в подземные нефтеносные пласты при нефтедобыче. Более всего этот способ распространен в США, однако, по большей части, он используется не для утилизации углекислого газа, а для повышения эффективности нефтедобычи [4].

Подобный метод утилизации CO<sub>2</sub> в полной мере применим в промышленности, так как основан на общепринятых технологиях горного дела. Он широко известен и используется в нефтяной и газовой промышленности для повышения эффективности извлечения этого вида полезных ископаемых. Однако развитие промышленных технологий и технологий утилизации промышленных выбросов позволяют масштабировать данный подход на решение экологических проблем. При этом эффективность депонирования карбоновых выбросов промышленного производства в геологических пустотах и подземных выработках на замедление процесса глобального потепления затруднительно рассчитать и учесть, поэтому стимулом для развития и реализации подобных технологий утилизации карбоновых выбросов является исключительное стремление избежать штрафных санкций за явные выбросы углекислого газа в атмосферу [5].

Следующее перспективное направление применения CO<sub>2</sub> в промышленности – это применение его в качестве современного хладагента для холодильных машин. При выборе хладагента, применяемого в проектируемых современных холодильных установках, необходимо обращать внимание на такие его показатели, как безвредность при эксплуатации холодильной установки, минимальные эксплуатационные затраты, снижение влияния на экологию, а также немаловажным показателем является низкая энергоемкость рабочего тела. Также при эксплуатации холодильных установок одними из критериев, относящихся к современному хладагенту, можно отнести наличие химической стабильности и высоких термодинамических свойств.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

В настоящее время большинство описанных критериев удовлетворяют хлор- и бромсодержащие фреоны, но их попадание в окружающую среду наносит большой вред экологии, поэтому их применение в холодильных системах в настоящее время законодательно ограничено. В связи с чем многие производители холодильного оборудования рассматривают возможность работы своих систем на рабочих веществах, которые существуют или образуются в реальных природных процессах. К таким холодильным агентам относятся аммиак, вода, углеводороды (пропан, изобутан и др.), а также углекислый газ [6].

Потребность в CO<sub>2</sub> в качестве хладагента только в России составляет около 150 т, при этом годовое потребление фреонов в России составляет 25000 т. Объем производства диоксида углерода в ценах 2020 г. составил около \$ 74 млн. А в ценах 2021 г. объем производства уже равнялся около \$ 84 млн.

В таблице 2 представлены характеристики современных хладагентов используемых в настоящее время в холодильных машинах, а в таблице 3 их стоимость.

Таблица 2 – Характеристики современных хладагентов

Table 2 - Characteristics of modern refrigerants

Критерий	R134a	R404a	NH <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
Природный хладагент	Нет	Нет	Да	Да
ОРП (ODP)	0	0	0	0
ПГП (GWP)	1430	3922	0	1
Критическая точка (бар/°C)	40,7/101,2	37,3/72	113/132,4	73,6/31,1
Тройная точка (бар/°C)	0,004/-103	0,028/-100	0,06/-77,7	5,2/-56,6
Взрывоопасность	Нет	Нет	Да	Нет
Токсичность	Нет	Нет	Да	Нет

Таблица 3 – Стоимость хладагентов в ценах 2022 г.

Table 3 - Cost of refrigerants in 2022 prices

Рабочее вещество	Цена в РФ (руб/кг)
Диоксид углерода (R744)	30
Аммиак (R717)	35
Пропан (R290)	576
Фреон – 134a (R134a)	390
Фреон – 404a (R404a)	540

Следует отметить, что до 25 % мирового потребления электроэнергии идет на привод различного рода холодопроизводящих систем, наиболее значимую долю в которых составляют фреоновые холодильные машины.

Таким образом, более интенсивная замена фреонов, обладающих на несколько порядков большим потенциалом глобального потепления, на природные холодильные агенты позволит существенно снизить экологическую нагрузку на атмосферу, возникающую при эксплуатации фреоновых холодильных машин. При этом появляется возможность избежать значительного количества выбросов парниковых газов, возникающих при достаточно энергоемком, соответственно обладающим высокими значениями карбонового следа, промышленном производстве фреонов.

Следующим перспективным направлением использования CO<sub>2</sub> является его применение в качестве рабочего тела в технологиях когенерации.

Наиболее распространенным рабочим телом в энергетических установках тепловой генерации является вода – водяной пар. Применение углекислоты в качестве рабочего тела в энергетических системах тепловой генерации позволяет значительно повысить термодинамическую эффективность энергетических систем за счет увеличения эффективности процессов теплопередачи от энергоносителя к рабочему телу непосредственно при генерации энергии, а также снизить технологические издержки при трансформации тепловой энергии в электрическую [7].

Реализация подобного процесса обеспечивается тем, что потенциальная энергия газообразного сверхкритического углекислого газа, находящегося под высоким давлением, преобразуется в кинетическую энергию вращающейся турбины генератора. Термодина-

мически это значительно более эффективно, чем испарять воду в случае использования ее в качестве рабочего тела. При этом в подобных системах, за счет более высокой термодинамической эффективности, а также за счет того, что часть образующегося при сгорании топлива углекислого газа используется в качестве рабочего тела, требуется меньше ресурсов для утилизации CO<sub>2</sub>.

Рассматриваемая система достигает этих результатов с помощью полужакрытого цикла рекуперации, в котором используется сверхкритический CO<sub>2</sub> в качестве рабочей жидкости, что значительно снижает потери энергии по сравнению с циклами на основе пара и воздуха [8]. Кроме того, цикл может работать практически без воды. Эта система использует только одну турбину, площадь, занимаемая установкой, минимальна и требует меньшего количества компонентов, чем обычные системы, работающие на углеводородном топливе. Цикл Аллама впервые был представлен в GHGT-11 [9]. В настоящее время с развитием техники в данном направлении достигнут значительный прогресс, однако детальной проработки системы, применяющей в качестве топлива уголь, не производилось.

Большинство экспертов пришли к выводу, что, внедрение вспомогательных установок удаления углекислого газа увеличивают себестоимость в среднем в 1,5 раза при этом их эффективность позволяет улавливать не более 2/3 образующегося CO<sub>2</sub> [10].

Представленный в статье энергетический цикл предполагает использование транскритического CO<sub>2</sub>. Цикл работает с одной турбиной, которая имеет входное давление около 300 бар. Принципиальная схема с использованием углей в качестве топлива представлена на рисунке 1.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ВЫСОКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

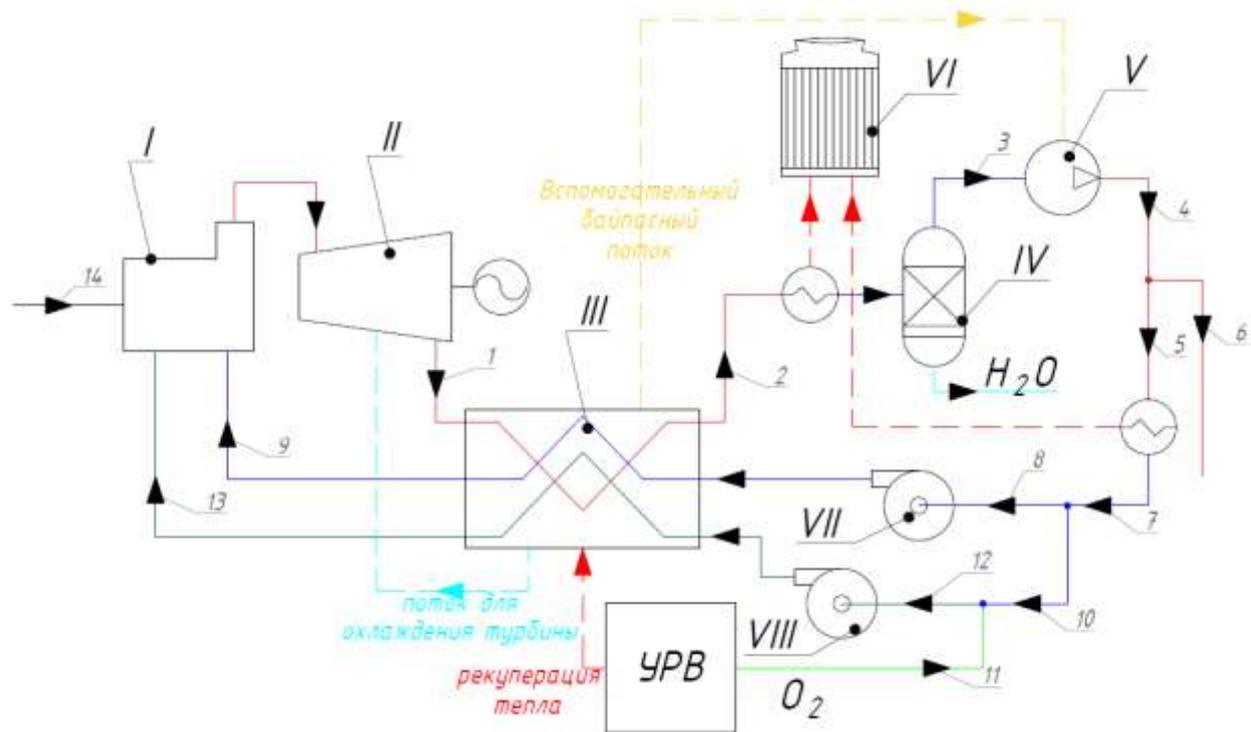


Рисунок 1 – Принципиальная схема на основе цикла Аллама, работающая при сгорании углей  
Figure 1 - Schematic diagram based on the Allama cycle operating during the combustion of coals

Предварительно подготовленный уголь (14) под давлением сгорает в среде подаваемого горячего потока окислителя, в состав которого входит CO и практически чистый кислород (13), обеспечиваемого воздухоразделительной установкой (УРВ) и горячего потока рециркуляции CO<sub>2</sub> (9) в условиях обедненного горения. Поток выхлопных газов из камеры сгорания (I) подается в турбину (II), проходя через нее, расширяется, одновременно происходит падение температуры до 700 °C (1), и получаемый поток выхлопных газов направляется в рекуперативный теплообменник (III), где происходит теплообмен между горячим потоком выхлопных газов и рециркуляционным потоком CO<sub>2</sub>, находящимся под высоким избыточным давлением. В данной схеме рециркуляционный поток используется для охлаждения продуктов как промежуточный охладитель продуктов сгорания. За счет теплообмена продуктов сгорания с рециркуляционным потоком их температура перед турбиной генератора снижается до требуемого уровня 1100–1150 °C. На выходе из первичного теплообменника поток продуктов сгорания (2) охлаждается до температуры, близкой температуре окружающей среды, при этом водяные пары, содержащиеся в продуктах сгорания, конденсируются, а затем

отделяются в сепараторе (IV). Далее поток парожидкостной смеси (3), преимущественно CO<sub>2</sub>, повторно сжимается до состояния (4) в компрессоре (V). После компрессора происходит разделение потоков: избыток образующегося CO<sub>2</sub> (6) удаляется из системы, поток (5) направляется в холодную часть рекуперативного теплообменника (III). Данный поток в точке (7) разделяется. Часть CO<sub>2</sub> (8) проходит через многоступенчатый центробежный насос (VII). Другая часть рециркулируемого CO<sub>2</sub> (10) перед входом в теплообменник смешивается с кислородом (11) из УРВ для образования потока окислительной смеси (12), которая подается насосом (VIII) отдельно в теплообменник и турбину. В рекуперативном теплообменнике рециркуляционный поток повторно нагревается от горячих газов, выходящих из турбины, и поступает в камеру сгорания, имея температурный уровень более 700 °C. Излишки углекислого газа, образующегося в полузакрытом цикле, направляются на утилизацию [11].

Важным фактором, определяющим высокую эффективность, надежность и долговечность когенерационных систем, использующих углекислый газ в качестве рабочего тела, является допустимый уровень напряжений на лопатках турбины, а также индиф-

ферентность материала лопаток к агрессивной среде продуктов сгорания, находящихся под высоким давлением и имеющим высокие скорости. Это обеспечивается использованием в качестве конструкционного материала сплава инконель 617, содержащего значительную долю никеля [12].

Рабочая температура горячей стороны теплообменника имеет величину 700–750 °С. Это ограничивает температурный уровень на

входе в турбину величиной 1100–1200 °С. Для того чтобы справиться с высокой температурой на входе, предусмотрено применение теплозащитных покрытий, применяемых в технологии газотурбинных двигателей [13], а также расположенного на линии байпасирования холодильника (VI). Диаграмма с рабочими точками цикла Аллама представлена на рисунке 2.

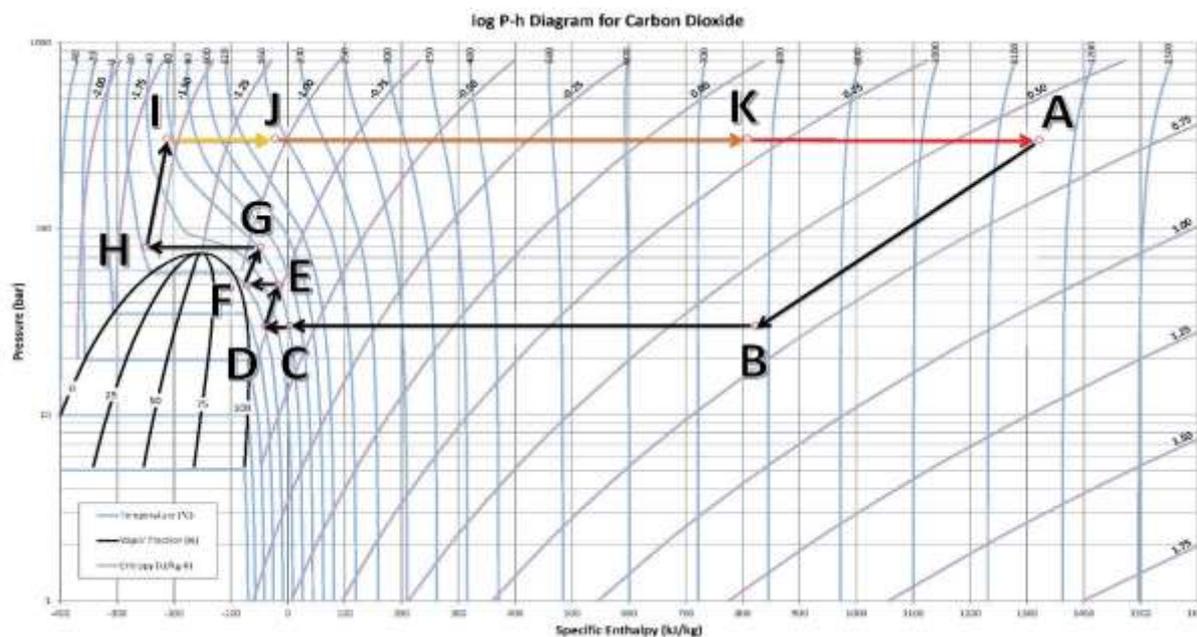


Рисунок 2 – Диаграмма с рабочими точками цикла Аллама

Figure 2 - Diagram with Allama cycle workpoints

Вход в турбину определяется точкой А, а выход из турбины – точкой В, которая также относится к входу горячего конца рекуперативного теплообменника. Теплота топлива, поступающая в камеру сгорания, эквивалентна А–К. Теплота, передаваемая от выхода из турбины к рециркуляционному потоку с высоким давлением В–С, а тепло, получаемое потоком от этой теплопередачи, равно К–J. После охлаждения окружающей среды из точек С, В, D и разделения воды охлажденный газ из турбины поступает в двухступенчатый CO<sub>2</sub>, компрессор с входом в промежуточный охладитель в точке Е. На второй ступени он сжимается FG при давлении выше критического давления, преимущественно CO<sub>2</sub>, потока. Затем проходит охлаждение сверхкритического CO<sub>2</sub> до температуры, близкой к температуре окружающей среды в точке Н. Это приводит к увеличению плотности с 0,15 кг/м<sup>3</sup> до 0,85 кг/м<sup>3</sup>. Затем многоступенчатый центробежный насос поднимает давление рабо-

чей жидкости CO<sub>2</sub> в точки Н до 300 бар. В точке I чистый продукт CO<sub>2</sub> удаляется или до нее, и оставшийся технологический поток поступает в рекуперативный теплообменник. Можно увидеть, что существует очень значительный дисбаланс между теплом, выделяемым на выходе из турбины низкого давления (В–С), и теплом, необходимым для повышения температуры рециркуляционного потока высокого давления (К–I). Этот дисбаланс обусловлен очень большой разницей в удельной теплоемкости CO<sub>2</sub> в рециркуляционном потоке 300 бар по сравнению с выходным потоком турбины 30 бар на низкотемпературном конце рекуперативного теплообменника. Дисбаланс может быть исправлен путем добавления значительного количества внешнего тепла в диапазоне от 100 °С до 400 °С в рециркуляционный CO<sub>2</sub>, соответствующий теплу, требуемому от точек I до J.

Высокая эффективность установки не зависит от качества и типа угля. К прочим досто-

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ВЫСОКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

инствам применения угля можно отнести снижение потребления воды: твердотопливный цикл позволяет значительно экономить воду в сравнении с базовыми показателями IGCC и SCPC [14].

В настоящее время реализуется ряд способов выделения углекислого газа из дымового газа, выделяемого при сгорании топлива, например, паровым котлом и газовой турбиной, печью риформинга производства аммиака и др.

Предложен способ удаления двуокиси углерода из дымовых газов. Суть метода заключается в предварительной очистке газовых потоков от оксида серы (IV), оксидов азота и угарного газа. Сернистый ангидрид адсорбируют на сорбенте, содержащий оксид марганца (IV), оксиды азота и окись углерода нейтрализуют в каталитическом реакторе непрерывного действия. Впоследствии углекислый газ десорбируют с поверхности активного угля с получением товарного продукта.

Недостатками предложенной технологии являются высокие энергозатраты на осуществление процесса и пониженная сорбционная способность активированного угля.

Осуществляется способ получения газообразной товарной двуокиси углерода, предусматривающий преждевременную очистку дымовых газов от сернистого газа. Товарный углекислый газ выделяют при использовании процессов адсорбции и десорбции на природном сорбенте (цеолите), с последующим удалением влаги с помощью силикагеля.

Предлагаемый метод непригоден при наличии в дымовых газах оксидов азота, и при его использовании возможны частые остановки на замену отработанных сорбентов.

Анализ патентной литературы выявил способы очистки дымовых газов с применением процесса адсорбции диоксида углерода с последующей десорбцией углекислого газа, в качестве сорбентов рассмотрены азотсодержащие соединения, самым эффективным из них является моноэтаноламин. Способ предусматривает утилизацию тепла, примесей и оксидов азота. Для извлечения оксидов азота дымовые газы обрабатывают озоносодержащей смесью. В результате озонной очистки образуется азотнокислый натрий, водный раствор которого удаляют с помощью ионообменных фильтров.

К недостаткам данного процесса можно отнести его сложность, невысокую эффективность озонной очистки газа от оксидов азота.

В случае применения моноэтаноламина образуются гетероциклические соединения, карбоновые кислоты. Побочные продукты адсорбции идентифицированы спектроскопическим методом ЯМР. Образовавшиеся оксазолон-2, имидазолон-2, щавелевая, муравьиная кислоты забивают оборудование, что приводит к коррозии технологического оборудования. Также выявлено присутствие в эксплуатируемом сорбенте гидроксиэтила мочевины, что влечет за собой потери сорбента [15].

Предлагаемый авторами метод извлечения CO<sub>2</sub> решает ряд технических проблем, возникших при использовании сорбента моноэтаноламина. Способ заключается в том, что отработанный газ направляют в адсорбционную колонну, в которой углекислый газ контактирует с адсорбирующей его жидкостью. Сорбтив затем подают на стадию десорбции, регенерацию сорбента проводят путём его подогрева водяным паром, генерируемым ребойлером. Таким образом, достигают получение чистого CO<sub>2</sub>, а сорбент подвергают циркуляции и повторному использованию.

Данный метод производства диоксида углерода сопряжён с большими энергозатратами и сложен в управлении. К тому же он непригоден для утилизации отработанного газа, в котором содержатся различные оксиды азота из-за их неодинаковой склонности к адсорбции.

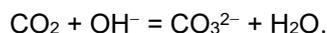
Один из методов, применяемый для удаления CO<sub>2</sub>, является его поглощение реагентом с образованием химических соединений (химическая сорбция).

По мнению некоторых исследователей, в качестве регенерирующих химических поглощителей предлагаются несколько соединений и способов очистки, отличающихся друг от друга характером взаимодействующих фаз, температурой, природой веществ.

Хемосорбция двуокиси углерода гидроокисью проходит без затрат дополнительной энергии. В качестве гидроокиси применяются гидроксид калия или натрия. Данный метод возможно применять в установках, работающих по циклам высокого и среднего давления. Загрязнённый газ поступает в скруббер и орошается раствором едкого натра или калия [16].

В ряде исследований показано, что адсорбция углекислого газа растворами NaOH и KOH протекает совершенно идентично и коэффициент скорости процесса, учитывающий физические свойства сорбента, оказывается равным в обоих случаях.

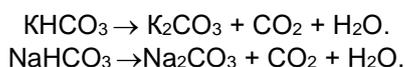
Оксид углерода IV вымывают из газовой смеси при поглощении щелочным раствором с образованием карбонатов:



Реакция протекает не мгновенно, а с определенной скоростью, и поэтому поглощение  $\text{CO}_2$  рассматривают как процесс, идущий в две стадии:

1.  $\text{CO}_2 + \text{OH}^- = \text{HCO}_3^-$
2.  $\text{HCO}_3^- + \text{OH}^- = \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}.$

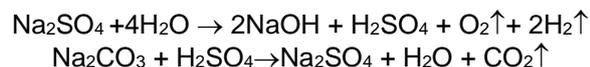
Вторая реакция протекает мгновенно, а первая идет с конечной скоростью. При нагревании гидрокарбонат калия распадается:



Для выделения поглощенных карбонатов необходимо принимать во внимание, что карбонаты устойчивы при определенных условиях: температуре в интервале 60–70 °С и концентрации карбоната более 30 % [17].

Полученный продукт реакции карбонат натрия можно использовать в стекольном производстве, при добыче нефти, а также для предотвращения полимеризации моторных масел. Карбонат калия можно применять в сельском хозяйстве в качестве удобрения.

Однако учитывая, что в составе дымовых газов помимо углекислого газа возможно присутствие диоксида серы, более эффективным будет удаление  $\text{CO}_2$  путем сорбции с использованием электролиза водных растворов солей. Отличие метода от ранее предлагаемого заключается, что при обработке газовой смеси раствором  $\text{NaOH}$  образуются не только карбонаты, но и сульфат натрия. Полученные продукты реакции в электрохимических аппаратах подвергаются электролизу. На аноде при пропускании электрического тока через водный раствор серноислого натрия образуется серная кислота, которая взаимодействует с карбонатом натрия:



Образовавшиеся в процессе электролиза газы ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) вместе с продуктами горения воздушным потоком из электродиализатора направляются в соответствующее оборудование (теплообменники), в котором происходит конденсация паров и отделением жидкой фазы от газообразной [18].

Углекислый газ выделяется в концентрированном виде, а остальные продукты реакции направляются обратно в электролизер.

Однако некоторые авторы предлагают в качестве поглотителей использовать слабые основания, так как они обнаружили, что это приводит к способу удаления  $\text{CO}_2$  с наименьшим потреблением энергии. Одним из таких поглотителей является раствор аммиака. Данный способ извлечения  $\text{CO}_2$  включает несколько этапов. На первой стадии дымовые газы десульфуруют, на втором охлаждают и на последнем сорбируют из доменных газов оксид углерода (IV), в виде поглотителя используют суспензию аммиака. Преимуществом применения способа особенно в районах с жарким климатом является тот факт, что вместе с двуокисью углерода из дымовых газов улавливается также вода. Метод может быть циклическим и нециклическим. В первом случае регенерированный раствор аммиака направляется на повторный цикл очистки диоксида углерода. Во втором случае извлеченный аммиак обрабатывается серной кислотой, и полученный продукт сульфат аммония выпускают в качестве товарного продукта, применяемого в сельском хозяйстве, как удобрения [19].

Одним из перспективных направлений переработки  $\text{CO}_2$  является применение его при таблетировании пищевых продуктов и лекарственных средств с целью улучшения их распадаемости. В настоящее время для ускорения процесса распадаемости пищевых продуктов и лекарственных средств в таблетированной форме применяются различные добавки, вносимые на стадии получения таблетированных продуктов. Однако добавление этих компонентов приводит к увеличению стоимости готового продукта, и зачастую снижает его качество. Таблетирование сырья с применением диоксида углерода в твердом агрегатном состоянии позволит при получении готовых таблетных форм и дальнейшей сублимации диоксида углерода получать высокопористые структуры, способствующие быстрой распадаемости таблетки при приготовлении готового продукта без применения дополнительных компонентов. Для получения практических рекомендаций по использованию данного способа в промышленности, а также его аппаратного оформления необходимо его изучение с целью нахождения рациональных параметров процесса для отдельных видов пищевой и фармацевтической продукции. С целью развития данного направления специалистами Кемеровского государственного университета разработан способ таблетирования растительного сырья с применением  $\text{CO}_2$ . Способ включает в себя следующие этапы: а) подготовку инстантированного состава продукта;

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ВЫСОКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

б) смешивание инстантированного состава с  $\text{CO}_2$ , находящимся в твердом агрегатном состоянии; в) формование таблетки или брикета нужной формы и размера; г) сублимирование твердого  $\text{CO}_2$  и выход  $\text{CO}_2$  в газообразном состоянии из внутренних слоев таблетки с образованием развитой пористой структуры.

Реализовать предложенную технологию можно следующим способом. Продукт в виде порошка или гранул дозируют и смешивают с  $\text{CO}_2$ , находящимся в твердом агрегатном состоянии в требуемой пропорции, зависящей от вида инстантированного продукта. При необходимости для увеличения связующей способности частиц продукта может быть добавлен легколетучий связующий компонент, например, этиловый спирт. Далее происходит быстрое перемешивание с помощью мешалки с целью получения однородной смеси порошка / гранул продукта и  $\text{CO}_2$ , находящимся в твердом агрегатном состоянии. Скорость перемешивания подбирается исходя из цели: максимально сократить продолжительность процесса перемешивания, чтобы не произошло сублимирование  $\text{CO}_2$ . После получения смеси ее дозируют в матрицу и подвергают прессованию. Величину давления прессования подбирается для каждого продукта индивидуально. В процессе прессования матрицу и поршень по возможности охлаждают для уменьшения теплопритока к смеси с целью снижения потерь  $\text{CO}_2$  от сублимации. Отформованную таблетку помещают в герметичную камеру при температуре 20–25 °С. Происходит процесс сублимации твердого  $\text{CO}_2$  из внутренних слоев. В процессе сублимации,  $\text{CO}_2$  в газообразном состоянии выходит из внутренних слоев продукта, образуя пористую структуру, и подается вакуумным насосом на дальнейшую переработку. Полученные таблетированные инстантированные продукты за счет развитой пористой поверхности имеют скорость распадаемости в разы выше, чем у таблетированных продуктов, полученных без применения  $\text{CO}_2$  или с применением вспомогательных расщепляющих веществ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для поддержания экологического равновесия в круговороте углекислого газа в контексте процессов, связанных с изменением климата, необходимо, чтобы потребление углекислого газа соответствовало его образованию. Однако в хозяйственной деятельности человечества на современном этапе производство углекислого газа значительно пре-

восходит его потребление на реализацию различных технологических процессов. Поэтому наиболее значимым вкладом в комплексе мер, обеспечивающим климатическую стабильность планеты, является не столько борьба с технологическими процессами, сопровождающимися производством  $\text{CO}_2$ , сколько разработкой технологий потребления углекислого газа, полезного его использования и утилизации.

Современные технологические ресурсы позволяют использовать углекислый газ в качестве рабочего тела для производства энергии, тепло- и хладоносителя при ее передаче и трансформации, холодильным агентом в технологиях генерации промышленного, торгового и бытового холода. Также углекислый газ является перспективной рабочей средой в технологиях длительного хранения пищевых продуктов и биологических ресурсов.

Использование углекислого газа в качестве рабочего тела или рабочей среды в различного вида технологических процессах позволит повысить термодинамическую, биохимическую и прочие эффективности за счет использования уникальных технологических характеристик этого вещества и, соответственно, повысить коэффициент полезного действия промышленных технологий, в которые он будет включен. При этом полезное использование части выбросов углекислого газа позволит снизить энергетические и ресурсные затраты, на производство рабочих тел, которые в настоящее время используются в большом ассортименте в промышленном производстве, так как просто заместит эти рабочие вещества.

Для декарбонизации промышленного производства с высокой составляющей углеродного следа необходимо:

- обеспечить переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, основанной на глубокой переработке углеродсодержащих отходов;

- рассмотреть возможности минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду в технологических процессах, связанных с хозяйственной деятельностью человечества путем минимизации выбросов побочных продуктов с возможностью их дальнейшей переработки, получения высокодоходных переделов и полезного использования;

- расширить применение диоксида углерода, вырабатываемого в энергетическом секторе экономики, в различных отраслях промышленности для снижения экологической нагрузки, путем разработки технологий

эффективной утилизации и полезного использования уникальных технологических свойств CO<sub>2</sub>;

- трансформировать побочные продукты, получаемые в результате высокотехнологичного производства в продукты с более высокой добавленной стоимостью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паспорт национального проекта «Экология» [утв. Президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам 24.12.2018 г.] [Электронный ресурс] // Официальный сайт Правительства России. – URL : <http://static.government.ru/media/files/pgU5Ccz2iVew3Aoel5vDGsbjDn4t7Fl.pdf> (дата обращения: 13.10.2022).

2. Мешалкин, В.П. Новые технологические показатели выбросов золы твердого топлива и диоксида серы для тепловых электростанций и наилучшие доступные технологии очистки газов / В.П. Мешалкин, П.В. Росляков, Т.В. Гусева, В.Д. Дови // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25. – № 8. – С. 40–46. – DOI 10.18412/1816-0395-2021-8-40-46.

3. Киндра, В.О. Кислородотопливные технологии производства электроэнергии с нулевыми выбросами вредных веществ в атмосферу / В.О. Киндра, А.Н. Роголев, Н.Д. Роголев. – М. : Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2017. – С. 110–113.

4. Ширинкина, Е.С. Улавливание CO<sub>2</sub> от стационарных источников с последующей закачкой в подземные горизонты: обзор современных технологических решений / Е.С. Ширинкина, Н.Н. Слюсарь, В.Н. Коротаев // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25. – № 10. – С. 64–71. – DOI 10.18412/1816-0395-2021-10-64-71.

5. Neverov, E.N. To the Question of Disposal and Recycling Carbon Dioxide / E.N. Neverov, I.A. Korotkiy, P.S. Korotkih [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, City of Vladivostok, 25–26 января 2021 года. – City of Vladivostok, 2021. – P. 012042. – DOI 10.1088/1755-1315/720/1/012042.

6. Неверов, Е.Н. Исследование параметров процесса теплообмена при сублимации диоксида углерода / Е.Н. Неверов, И.А. Короткий, И.Б. Плотников [и др.] // Вестник КрасГАУ. – 2020. – № 6 (159). – С. 215–222. – DOI 10.36718/1819-4036-2020-6-215-222.

7. Allam, R. Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture / R. Allam [et al.] // Energy Procedia. – 2017. – № 114. – P. 5948–5966.

8. Weizhong, F. The research on design and technology of new high efficiency supercritical unit – a kind of cross-compound steam turbine generator unit in a manner of elevated and conventional layout / F. Weizhong // In Proceedings of the 2-nd IEA CCC Workshop on Advanced Ultra-Supercritical Coal-Fired Power Plants. Rome, Italy, 2014.

9. Alenezi, A. Thermodynamic analysis of CO<sub>2</sub> Allam cycle for concentrated solar power complemented with oxy-combustion / A. Alenezi, J.S. Kapat, // In Proceedings of AIAA Propulsion and Energy Forum, Indianapolis. Indiana, USA, 2019.

10. Suzuki, S. High pressure combustion test of gas turbine combustor for 50 MWth supercritical CO<sub>2</sub> demonstration power plant on Allam cycle. / S. Suzuki, Y. Iwai, M. Itoh,

Y. Orisawa, P. Jain, Y. Kobayashi // In Proceedings of the International Gas Turbine Congress. Tokyo, Japan, 2019.

11. Allam, R.J. The Oxy-Fuel, Supercritical CO<sub>2</sub> Allam Cycle: New Cycle Developments to Produce Even Lower-Cost Electricity from Fossil Fuels Without Atmospheric Emissions, in Proceedings of ASME / R.J. Allam, J.E. Fetvedt, B.A. Forrest and D.A. Freed // Turb Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, Dusseldorf, Germany, June 16-20, 2014.

12. Komarov, I. Natural Gas Oxygen Combustion in a Super-Critical Carbon Dioxide Gas Turbine Combustor / I. Komarov, D. Kharlamova, B. Makhmutov, S. Shabalova, I. Kaplanovich // E3S Web of Conferences, 2020, vol. 178, p. 01027.

13. Wang, H. High-temperature combustion reaction model of H<sub>2</sub>/CO/C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> compounds / H. Wang, X. You, A.V. Joshi, S.G. Davis, A. Laskin, F. Egolfopoulos // C.K. USC Mech Version II, 2007.

14. Amato, A.B. Methane oxy-combustion for low CO<sub>2</sub> cycles: Blowoff measurements and analysis / A.B. Amato, P.D. Hudak, D. Carlo, D. Noble, J. Scarborough, T. Seitzman, T. Lieuwen // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133 (6).

15. Делицын, Л.М. Влияние флотационных реагентов на извлечение углерода из золы угольных ТЭС / Л.М. Делицын, Ю.В. Рябов, Р.В. Кулумбеков [и др.] // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26. – № 2. – С. 14–19. – DOI 10.18412/1816-0395-2022-2-14-19.

16. Polezhaev, I.L. Normal flame propagation speed and analysis of the influence of system parameters on it / I.L. Polezhaev // Thermophysics of high temperatures, 2005, vol. 43, pp. 933-942.

17. Казакова, Н.А. Мониторинг основных параметров экологической безопасности промышленного производства / Н.А. Казакова, В.Г. Когденко // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25. – № 3. – С. 60–65. – DOI 10.18412/1816-0395-2021-3-60-65.

18. Николаева, Л.А. Научные подходы в технологии очистки газовых выбросов от оксида серы на промышленных предприятиях / Л.А. Николаева, Э.М. Хуснутдинова // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25. – № 4. – С. 4–9. – DOI 10.18412/1816-0395-2021-4-4-9.

19. Колодежная, Е.В. Потенциал использования шлаков мусоросжигательных установок для связывания углекислого газа / Е.В. Колодежная, И.В. Шадрюнова, М.С. Гаркави // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26. – № 3. – С. 40–45. – DOI 10.18412/1816-0395-2022-3-40-45.

## Информация об авторах

*Е. Н. Неверов – доктор технических наук., заведующий кафедрой техносферной безопасности, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».*

*И. А. Короткий – доктор технических наук., заведующий кафедрой теплохладотехники, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».*

*П. С. Коротких – старший преподаватель кафедры теплохладотехники, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».*

*Н. С. Голубева – кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной без-*

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ВЫСОКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

опасности ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».

### REFERENCES

1. Pasport nacional'nogo proekta «Ekologiya» [utv. Prezidiumom Soveta pri Prezidente Rossijskoj Federacii po strategicheskomu razvitiyu i nacional'nym proektam 24.12.2018 g.] (2018). Oficial'nyj sajт Pravitel'stva Rossii. Retrieved from <http://static.government.ru/media/files/pgU5Ccz2iVew3Aoe15vDGSBjbDn4t7FI.pdf>. (In Russ.).
2. Meshalkin, V.P., Roslyakov, P.V., Guseva, T.V. & Dovi, V.D. (2021). Novye tekhnologicheskie pokazateli vybrosov zoly tverdogo topliva i dioksida sery dlya teplovyh elektrostancij i nailuchshie dostupnye tekhnologii oчитki gazov. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 25(8), 40-46. DOI 10.18412/1816-0395-2021-8-40-46. (In Russ.).
3. Kindra, V.O., Rogalev, A.N. & Rogalev, N.D. (2017). Kislorodotoplivnye tekhnologii proizvodstva elektroenergii s nulevymi vybrosami vrednyh veshchestv v atmosferu. *Nacional'nyj issledovatel'skij universitet «MEI»*, 110-113. (In Russ.).
4. Shirinkina, E.S., Slyusar', N.N. & Korotaev, V.N. (2021). Ulavlivanie CO<sub>2</sub> ot stacionarnykh istochnikov s posleduyushchej zakachkoj v podzemnye gorizonty: obzor sovremennykh tekhnologicheskikh reshenij. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 25(10), 64-71. DOI 10.18412/1816-0395-2021-10-64-71. (In Russ.).
5. Neverov, E.N. [et al.]. (2021). To the Question of Disposal and Recycling Carbon Dioxide. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, City of Vladivostok, 25-26 yanvarya 2021. City of Vladivostok, 012042. DOI 10.1088/1755-1315/720/1/012042. (In Russ.).
6. Neverov, E.N. [et al.]. (2020). Issledovanie parametrov processa teploobmena pri sublimacii dioksida ugleroda. *Vestnik KrasGAU*. 6 (159), 215-222. DOI 10.36718/1819-4036-2020-6-215-222. (In Russ.).
7. Allam, R. [et al.]. (2017). Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture. *Energy Procedia*. (114), 5948-5966.
8. Weizhong, F. (2014). The research on design and technology of new high efficiency supercritical unit - a kind of cross-compound steam turbine generator unit in a manner of elevated and conventional layout. In *Proceedings of the 2-nd IEA CCC Workshop on Advanced Ultras-Supercritical Coal-Fired Power Plants*. Rome, Italy.
9. Alenezi, A. & Kapat, J.S. (2019). Thermodynamic analysis of CO<sub>2</sub> Allam cycle for concentrated solar power complemented with oxycombustion. In *Proceedings of AIAA Propulsion and Energy Forum*, Indianapolis, Indiana, USA.
10. Suzuki, S., Iwai, Y., Itoh, M., Orisawa, Y., Jain, P. & Kobayashi, Y. (2019). High pressure combustion test of gas turbine combustor for 50MWth supercritical CO<sub>2</sub> demonstration power plant on Allam cycle. In *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*. Tokyo, Japan.
11. Allam, R.J., Fetvedt, J.E., Forrest, B.A. & Freed, D.A. (2014). The Oxy-Fuel, Supercritical CO<sub>2</sub> Allam Cycle: New Cycle Developments to Produce Even Lower-Cost Electricity from Fossil Fuels Without Atmospheric Emissions, in *Proceedings of ASME Turb Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*, Dusseldorf, Germany, June 16-20.
12. Komarov, I. [et al.]. (2020). Natural Gas Oxygen Combustion in a Super-Critical Carbon Dioxide Gas Turbine Combustor. *E3S Web of Conferences*, (178), 01027.
13. Wang, H., You, X., Joshi, A.V., Davis, S.G., Laskin, A. & Egolfopoulos, F. (2007). High-temperature combustion reaction model of H<sub>2</sub>/CO/C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> compounds. *USC Mech Version II*.
14. Amato, A.B. [et al.]. (2011). Methane oxy-combustion for low CO<sub>2</sub> cycles: Blowoff measurements and analysis. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 133 (6).
15. Delicyn, L.M. [et al.]. (2022). Vliyanie flotacionnykh reagentov na izvlechenie ugleroda iz zoly ugol'nykh TES. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 26(2), 14-19. DOI 10.18412/1816-0395-2022-2-14-19.
16. Polezhaev, I.L. (2005). Normal flame propagation speed and analysis of the influence of system parameters on it. *Thermophysics of high temperatures*, (43), 933-942.
17. Kazakova, N.A. & Kogdenko, V.G. (2021). Monitoring osnovnykh parametrov ekologicheskoy bezopasnosti promyshlennogo proizvodstva. *Ekologiyai promyshlennost' Rossii*. 25(3), 60-65. DOI 10.18412/1816-0395-2021-3-60-65. (In Russ.).
18. Nikolaeva, L.A. & Husnutdinova, E.M. (2021). Nauchnye podhody v tekhnologii oчитki gazovykh vybrosov ot oksida sery na promyshlennykh predpriyatiyah. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 25(4), 4-9. DOI 10.18412/1816-0395-2021-4-4-9. (In Russ.).
19. Kolodezhnaya, E.V., Shadrinova, I.V. & Garkavi, M.S. (2022). Potencial ispol'zovaniya shlakov musoro-szhigatel'nykh ustanovok dlya svyazyvaniya uglekislogo gaza. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 26(3) 40-45. DOI 10.18412/1816-0395-2022-3-40-45.

### Information about the author

*E. N. Neverov - Doctor of Technical Sciences, Head of the Technosphere Security Department, Kemerovo State University.*

*I. A. Korotkiy - Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Heat and Cooling Engineering Kemerovo State University.*

*P. S. Korotkih - senior lecturer of the Department of heat and Cooling Engineering, Kemerovo State University.*

*N. S. Golubeva - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Technosphere Safety Department, Kemerovo State University.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.*

*The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.*