



УДК 665

## ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ УЛАВЛИВАНИЯ, УТИЛИЗАЦИИ И ХРАНЕНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

### A REVIEW OF TECHNOLOGIES FOR CARBON DIOXIDE CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE

**Салахов Ильзат Илшатович**

студент кафедры «Химической технологии переработки нефти и газа»,  
Казанский национальный исследовательский технологический университет  
ilzat.salakhov@gmail.com

**Амансарыев Абдыкерим Байрамгельдыевич**

студент кафедры «Химической технологии переработки нефти и газа»,  
Казанский национальный исследовательский технологический университет  
abdykerim.00@mail.ru

**Горячев Андрей Алексеевич**

студент кафедры «Химической технологии переработки нефти и газа»,  
Казанский национальный исследовательский технологический университет  
goryachev.andrey90@mail.ru

**Черкасова Елена Игоревна**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Химической технологии переработки нефти и газа»,  
Казанский национальный исследовательский технологический университет  
cherkasova.kstu@yandex.ru

**Аннотация.** Достижение углеродной нейтральности к середине века будет зависеть от успешного и широкого внедрения технологий сокращения выбросов диоксида углерода. В данной статье рассмотрены эффективные технологии улавливания, утилизации и хранения углекислого газа.

**Ключевые слова:** глобальное потепление, диоксид углерода, улавливание, хранение, использование.

**Salakhov Ilzat Ilshatovich**

Student of department of chemical technology of petroleum and gas processing,  
Kazan national research technological university  
ilzat.salakhov@gmail.com

**Amansaryyev**

**Abdykerim Bairamgeldyyevich**  
Student of department of chemical technology of petroleum and gas processing,  
Kazan national research technological university  
abdykerim.00@mail.ru

**Goryachev Andrey Alekseevich**

Student of department of chemical technology of petroleum and gas processing,  
Kazan national research technological university  
goryachev.andrey90@mail.ru

**Cherkasova Elena Igorevna**

Ph. D., Associate Professor of chemical technology of petroleum and gas processing,  
Kazan national research technological university  
cherkasova.kstu@yandex.ru

**Annotation.** Achieving carbon neutrality by mid-century will rely on successful implementation and widespread adoption of technologies for reducing emissions of carbon dioxide. This article discusses effective technologies for capturing, storing and utilizing carbon dioxide.

**Keywords:** global warming, carbon dioxide, capture, storage, utilization.

## Введение

Парниковые газы – это газы в атмосфере Земли с сильным поглощением в инфракрасном диапазоне электромагнитного излучения. Особый интерес представляет диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), выбросы которого тесно связаны с антропогенным использованием ископаемого топлива в качестве источника энергии. Концентрация углекислого газа в атмосфере неуклонно увеличивалась с 280 ppm в 1750 году до 420 ppm в 2022 году со среднегодовым увеличением на 2,4 ppm в последнее десятилетие. Это повышение сопровождалось повышением глобальной температуры [1–2].

Согласно отчетам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), ограничение повышения глобальной температуры до 1,5 °C требует резкого сокращения выбросов парниковых газов. Некоторые сценарии будущего предполагают, что ограничение повышения температуры до 1,5 °C к концу века с превышением менее чем на 0,1 °C требует сокращения глобальных ежегодных выбросов с 50 Гт CO<sub>2</sub>-экв. (гига тонн CO<sub>2</sub>-эквивалента) до 25–30 Гт CO<sub>2</sub>-экв. Это будет способствовать достижению к 2050 году нулевых выбросов диоксида углерода [3–4].

На сегодняшний день более 130 стран взяли на себя обязательства по достижению углеродной нейтральности, что подтверждается недавними программными заявлениями правительств. Среди этих



стран более 90 % установили цель достижения углеродной нейтральности к 2050 году, в том числе США, Европейский Союз, Великобритания и Япония. Китай, Россия и Казахстан поставили цель достичь углеродной нейтральности до 2060 года [5]. Помимо постановки четких целей, шесть стран приняли свои углеродно-нейтральные цели в законодательном порядке, а 24 страны установили свои климатические цели в качестве официальной политики. На эти страны или регионы, принявшие или рассматривающие возможность достижения углеродно-нейтральных целей, приходится более 70 % глобальных выбросов [6].

Технологии улавливания, утилизации и хранения углерода (Carbon capture, utilization, and storage – CCUS) является ключевым элементом усилий по быстрому сокращению выбросов парниковых газов и достижению углеродной нейтральности. CCUS – это вариант сокращения выбросов углекислого газа для существующих электростанций и промышленных предприятий, которые в противном случае могли бы выбрасывать примерно 600 Гт CO<sub>2</sub> в течение следующих 50 лет [7]. К таким отраслям, трудно поддающимся сокращению, обычно относятся сталелитейная, цементная и нефтегазохимическая промышленности. Технологии CCUS также считаются одним из наиболее рентабельных способов производства водорода с нулевыми выбросами углерода [8]. Достижение углеродной нейтральности к середине XXI века будет практически невозможно без технологий улавливания диоксида углерода.

Исходя из этого в данной работе рассмотрены эффективные технологии улавливания, использования и хранения диоксида углерода.

### Методы улавливания

Улавливание, использование и хранение CO<sub>2</sub> – важные технологии сокращения выбросов, которые можно применять во всей энергетической системе.

Технологии CCUS включают:

- улавливание углекислого газа при сжигании топлива или в промышленных технологических процессах;
- транспортировку уловленного диоксида углерода;
- использование CO<sub>2</sub> в качестве ресурса для создания ценных продуктов или услуг;
- постоянное хранение глубоко под землей в геологических формациях.

Концентрация углекислого газа в различных сырьевых потоках составляет: ~0,04 % (об.) в атмосферном воздухе, 3–4 % в дымовых газах газотурбинных электростанций, ~10–15 % в дымовых газах пылеугольных установок и ~15–30 % в дымовых газах металлургических, цементных и нефтеперерабатывающих заводах. Существует широкий спектр технологий улавливания CO<sub>2</sub> на разных уровнях зрелости. Зрелость различных технологий оценивается с использованием шкалы уровня готовности технологии (technology readiness level – TRL), которая представляет собой девятибалльную шкалу, впервые разработанную NASA в 1980-х годах. Шкала TRL варьируется от 1 (утверждение и публикация базовых принципов технологии) до 9 (демонстрация технологии в окончательном виде) [9–10].

В работе рассмотрены технологии улавливания, которые были продемонстрированы в масштабе пилотной установки или выше и переведены на уровень TRL 6+, такие как абсорбция аминами растворителями, адсорбция твердыми веществами и кальциево-карбонатный цикл (ККЦ).

### Аминовая очистка

Этот процесс основан на химической реакции между CO<sub>2</sub> и абсорбентом, приводящей к слабой химической связи, что приводит к извлечению углекислого газа из потока сырья. Растворитель регенерируется в отпарной колонне за счет тепла, выделяемого ребойлером. Наиболее часто используемыми поглотителями для улавливания углерода являются водные растворы аминов [11].

На рисунке 1 показана принципиальная технологическая схема улавливания диоксида углерода аминами абсорбентами. Дымовой газ вступает в контакт с жидким поглотителем в абсорбере, где CO<sub>2</sub> поглощается растворителем. Растворитель с высоким содержанием углекислого газа регенерируется в отпарной колонне, где добавляется тепло для отделения CO<sub>2</sub> из раствора. Классическим абсорбентом для улавливания диоксида углерода является водный раствор моноэтаноламина (МЭА) с концентрацией 20–30 % масс. Основным преимуществом МЭА является максимальная поглотительная способность по отношению к углекислому газу. Улавливание аминами растворителями находится на уровне TRL 9 и находится на этом уровне с 2014 года [12].

Однако существует ряд недостатков, которые значительно увеличивают стоимость данной технологии: высокая коррозионная активность; значительный расход тепла на регенерацию сорбента, возрастающий с увеличением концентрации диоксида углерода в очищенной газе; потери относительно летучего абсорбента; образование значительных количеств смолистых веществ из-за циклизации моноэтаноламина в производные оксазолидона-2 и далее в продукты их превращения.

Исходя из этого в настоящее время ведутся исследования по разработке новых растворителей, которые сосредоточены на: (1) улучшении кинетики реакции CO<sub>2</sub> с абсорбентами; (2) снижение энтропии реакции, (3) улучшение термической стабильности и устойчивости к окислительному разложению, (4) снижение стоимости производства растворителя и (5) снижение коррозии, токсичности и



опасности поглощающей среды. Усовершенствования в вышеупомянутых пунктах приведет к снижению капитальных и эксплуатационных затрат на систему улавливания диоксида углерода, что будет способствовать более широкому внедрению технологии [13].

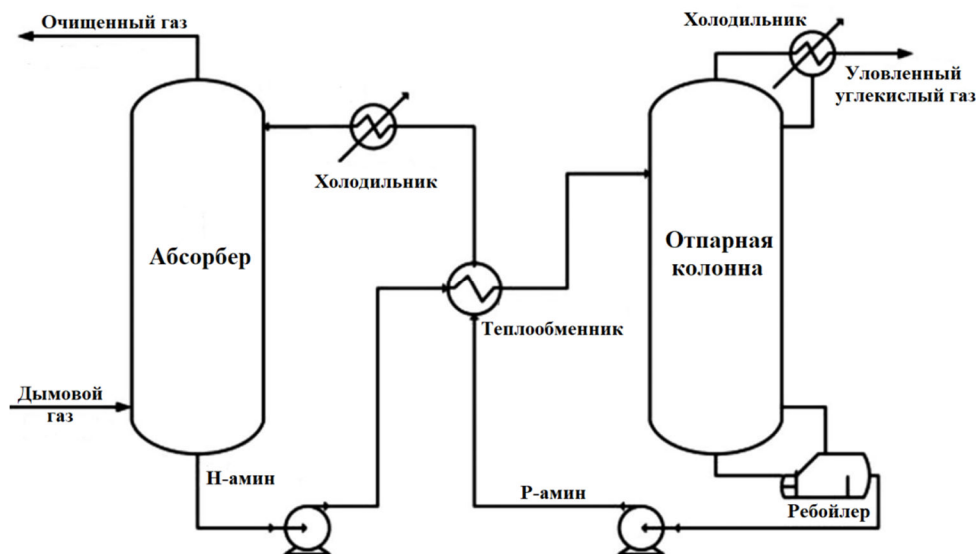


Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема аминовой очистки:  
Н-амин – насыщенный амин; Р-амин – регенерированный амин

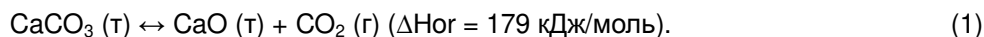
#### Адсорбция твердыми веществами

Адсорбция для улавливания углекислого газа была впервые рассмотрена в начале 1990-х годов. В качестве адсорбентов использовался широкий спектр материалов, включая классические адсорбенты (уголь, оксид алюминия, кремнезем, цеолиты), а также новые адсорбенты (металлоорганические соединения, гидроталькиты, полимеры и т.д.). Основными преимуществами твердотельной адсорбции по сравнению с жидкостной абсорбцией являются: более низкое потенциальное воздействие на окружающую среду по сравнению с растворами на основе аминов, которые склонны к разложению и образованию токсичных и коррозионно-активных соединений. Улавливание диоксида углерода с помощью адсорбционной технологии считается более подходящим для нефтехимической, металлургической и цементной промышленности, где газы имеют более высокое парциальное давление  $CO_2$  и более низкие объемные скорости потока по сравнению с электростанциями. Адсорбция после сжигания на электростанциях находится на уровне TRL 7, а адсорбция диоксида углерода для очистки промышленных газов – на уровне TRL 9 [14].

#### Кальциево-карбонатный цикл

В последние годы процесс кальциево-карбонатного цикла (ККЦ) привлек внимание из-за его огромного потенциала для интеграции в будущие энергетические объекты, а также для модернизации существующих.

Процесс ККЦ основан на многоциклическом прокаливании карбоната кальция ( $CaCO_3$ ) (уравнение 1), который может быть получен из известняка как второго наиболее распространенного материала на земле после воды. Что касается улавливания углекислого газа, процесс ККЦ особенно выгоден из-за его высокой эффективности и низких затрат, позволяющих избежать выброса  $CO_2$  [15].



На рисунке 2 показана схема улавливания углекислого газа. В этом процессе дымовой газ поступает в карбонатор, где  $CO_2$  реагирует с  $CaO$ , образуя  $CaCO_3$  в экзотермической реакции с выделением 178 кДж/моль энергии. Адсорбент регенерируется в кальцинаторе с кислородным обогревом, при этом выделяется  $CO_2$ , который можно сжимать и отправлять на хранение/утилизацию. Из-за морфологических изменений сорбента  $CaO$  после повторных циклов его пропускная способность быстро снижается, и для пополнения отработанного сорбента необходим поток свежего известняка. Основное преимущество технологии ККЦ по сравнению с жидкостной абсорбцией и другими технологиями твердотельной адсорбции заключается в том, что сорбент, известняк, является безопасным химическим веществом и доступен в промышленных количествах. Также во всем мире существуют значительные возможности для использования отработанного сорбента в промышленных процессах, таких как производство цемента и стали. Кроме того, тепло от процесса карбонизации можно использовать для выработки электроэнергии. Улавливание диоксида углерода с помощью ККЦ оценивается как TRL 6 [16–18].

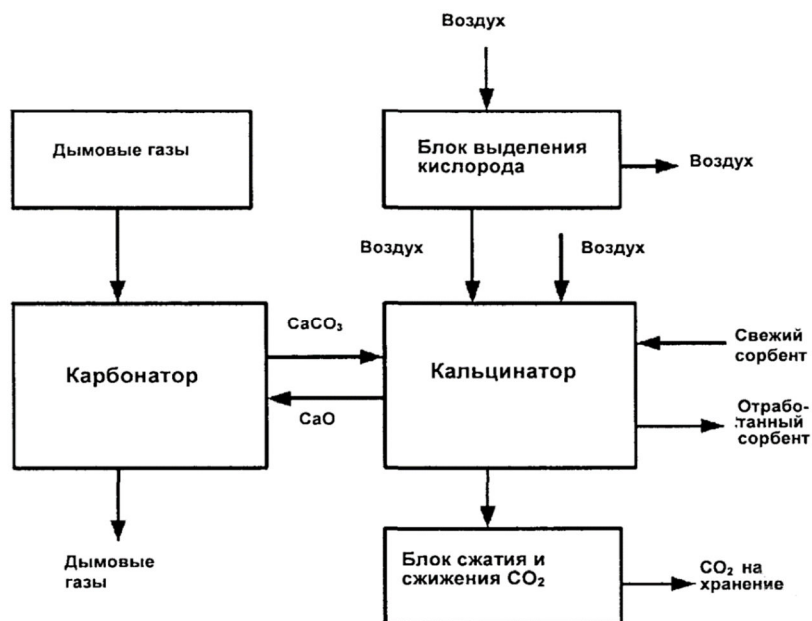


Рисунок 2 – Схема кальциево-карбонатного цикла

**Хранение и использование CO<sub>2</sub>**

Технологии улавливания, рассмотренные в предыдущих разделах, должны сочетаться с процессом хранения и/или утилизации, чтобы предотвратить выбросы уловленного углекислого газа в атмосферу. Следует отметить, что термины «хранение» и «секвестрация» часто используются в литературе взаимозаменяемо. Термины различаются в зависимости от срока службы хранимого CO<sub>2</sub>: хранение со сроком службы более 100 000 лет называется секвестрацией, а временное хранение со сроком службы менее 1000 лет называется хранением. Утилизация относится к процессам, в которых улавливаемый диоксид углерода может использоваться или перерабатываться для производства экономически ценных продуктов или услуг. Процессы утилизации могут изолировать CO<sub>2</sub> на разную продолжительность от нескольких дней до столетий [19].

**Секвестрация в глубоких геологических пластах**

Хранение в пористых геологических средах, как в целом, так и в осадочных бассейнах, считается наиболее жизнеспособным вариантом хранения CO<sub>2</sub>. Потенциальные места хранения включают истощенные резервуары углеводородов и глубокие засоленные водоносные пласты. При секвестрации в глубоких осадочных породах уловленный углекислый газ вводят в виде сверхкритического или газообразного флюида в глубокие осадочные геологические пласты, где нагнетаемый флюид будет занимать поровые пространства. Требования к участку секвестрации, следующие: пласт с высокой пористостью для достаточного места для хранения; достаточное количество взаимосвязей, позволяющее передавать флюиды из ствола скважины в пласт; высокая проницаемость, чтобы сбалансировать скорость закачки и давление [20].

Технология закачки CO<sub>2</sub> в глубокие осадочные пласты является изученной. Она основана на более чем пятидесятилетнем опыте закачки углекислого газа в пласт в качестве метода увеличения нефтеотдачи, когда сверхкритический диоксид углерода закачивается в истощенные нефтяные месторождения для увеличения добычи путем создания ряда эффектов, приводящих к миграции нефти. Первым и самым продолжительным в мире специализированным геологическим проектом по секвестрации является проект Sleipner в Норвегии, в рамках которого с 1996 г. в морском соленом водоносном пласте под Северным морем было захоронено ~1 Мт CO<sub>2</sub> в год, а на сегодняшний день уловлено и захоронено ~22 Мт CO<sub>2</sub> [21].

Одной из проблем, связанной с закачкой углекислого газа в геологические пласты, является повышение давления. Проект In Salah в Алжире был приостановлен из-за неожиданных геомеханических деформаций, возникших в результате чрезмерного повышения давления. Повышение давления в пласте происходит за счет сочетания сил вязкости и явления многофазного потока, связанного с взаимодействием между закачиваемым CO<sub>2</sub> и флюидами. Величина повышения давления зависит в первую очередь от скорости закачки, а также от проницаемости и толщины пласта.

Стоимость закачки зависит от конкретных факторов, таких как проницаемость пласта, скорость закачки и объем закачки. Кроме того, мониторинг во время и после закачки является еще одним компонентом стоимости проекта [22].



### Утилизация

Утилизация относится к процессам, в которых улавливаемый  $\text{CO}_2$  может использоваться или перерабатываться для производства экономически ценных продуктов или услуг. Основные пути использования, уловленного углекислого газа определяются экологичностью метода, экономической рентабельностью и объемами потребляемого диоксида углерода. Метод хранения  $\text{CO}_2$  в литосфере путем геологической секвестрации является наиболее надежной формой утилизации, но существует множество других подходов. Они классифицируются как: циклический, закрытый и открытый варианты. При циклическом варианте углерод перемещается через промышленные системы в течение нескольких дней, недель или месяцев, например, в химических веществах на основе  $\text{CO}_2$ . Эти пути не обеспечивают чистое удаление углекислого газа из атмосферы, но могут сократить выбросы. Закрытый вариант включает утилизацию и почти постоянное хранение диоксида углерода, такие как метод увеличения нефтеотдачи закачкой в пласт  $\text{CO}_2$ . Открытые пути утилизации диоксида углерода связаны с биологическими системами, которые имеют высокий потенциал удаления, но также несут риск повторных выбросов обратно в атмосферу [23].

### Химическое производство

Химическое производство представляет собой основной и наиболее перспективный путь утилизации  $\text{CO}_2$ . В настоящее время самым крупным направлением химической переработки углекислого газа является производство карбамида в объеме 140 млн т  $\text{CO}_2$  в год. Однако захваченный диоксид углерода возвращается в атмосферу в течение суток после применения мочевины в качестве удобрения. Кроме того, удобрения на основе азота, такие как мочевина, при производстве выделяют  $\text{N}_2\text{O}$ , который оказывает очень сильный парниковый эффект.

Еще одна важная категория химических веществ, которые могут быть произведены с использованием уловленного  $\text{CO}_2$ , представляют собой полимеры, потенциальная мощность использования которых оценивается в 10–50 Мт  $\text{CO}_2$  в год. Полимеры, используемые для производства пластмасс для товаров длительного пользования, строительных материалов, предметов домашнего обихода и автомобилей имеют срок службы, который может исчисляться десятилетиями и даже веками. В целом, в 2050 году прогнозируется, что производство химических веществ будет иметь потенциал утилизации 0,3–0,6 Гт  $\text{CO}_2$  в год, но с потенциалом удаления только 0,01–0,03 Гт  $\text{CO}_2$  в год [24].

### Топливо

Топливо является еще одной потенциальной категорией использования уловленного углекислого газа, такие как метанол, метан, диметиловый эфир и топливо, произведенное методом Фишера-Тропша. Существует два преимущества, связанных с топливом, полученным из диоксида углерода: первое – его можно также использовать в существующей транспортной инфраструктуре, как и топливо, полученное традиционными методами, и второе – их можно использовать в секторах, которые трудно обезуглеродить, таких как авиация. Данный подход имеет очень маленький экологический эффект, поскольку топливо используется в течение нескольких дней или недель, а образующийся  $\text{CO}_2$  не улавливается [25].

### Бетон и строительные материалы

Утилизация диоксида углерода в производстве строительного материала предполагает хранение диоксида углерода в бетоне и строительных материалах в виде твердых карбонатов. К 2050 году существуют реальные перспективы, в которых  $\text{CO}_2$  используется в качестве отвердителя цемента на мировом рынке сборного железобетона и на 70 % рынка жидкого цемента. Помимо цемента и железобетона, диоксид углерода может применяться в переработке промышленных отходов, таких как сталелитейный шлак, цементная пыль, и летучая зола (муниципальные отходы, уголь и т.д.) для производства заполнителей, которые характеризуются большей экологичностью. Одной из основных причин, тормозящих утилизацию уловленного  $\text{CO}_2$  при производстве строительных материалах, является нормативные барьеры, для преодоления которых нужно пересмотреть действующие стандарты и требования к готовым изделиям [26].

### Заключение

На сегодняшний день небольшое количество существующих технологий не находят широкого применения ввиду различных факторов. Среди них можно отметить ранние стадии развития технологий, низкий или убыточный экономический эффект, невозможность масштабирования процессов, ограниченную логистику. Процессы утилизации диоксида углерода, которые часто сопровождаются его переработкой в другие полезные продукты, не решают проблему уменьшения его концентрации в атмосфере, а лишь продлевают его жизненный цикл. Процессы улавливания жидкими растворителями являются наиболее коммерциализуемы на сегодня, а процессы технологии с использованием твердых поглотителей являются относительно новыми. Однако наиболее перспективным выглядит технология ККЦ, главными преимуществами которой являются низкая стоимость сорбирующего материала, высокая доступность и низкая экологическая опасность для окружающей среды.

**Список литературы:**

1. Statistical Review of World Energy 2022. – British Petroleum, 2022. – P. 15.
2. A review of CO<sub>2</sub> capture by absorption and adsorption / C.H. Yu [et al.] // Aerosol and Air Quality Research. – 2012. – V. 12. – № 5. – P. 745–769.
3. NOAA Annual 2021 Global Climate Report. [Электронный ресурс]: NOAA. – URL : <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202113>
4. Марченко Г.Н., Алтынбаева Э.Р. Перспективы использования новых видов топлива и развития возобновляемых источников энергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2011. – Т. 7. – № 4. – С. 6–13.
5. Townsend A., Raji N., Zapantis A. The value of carbon capture and storage (CCS) // Global CCS Institute: Docklands, Australia. – 2020.
6. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality / S. Chen [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – V. 167. – P. 112537.
7. Print media representations of carbon capture utilization and storage (CCUS) technology in China / K. Jiang [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – V. 155. – P. 111938.
8. Rosa L., Mazzotti M. Potential for hydrogen production from sustainable biomass with carbon capture and storage // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – V. 157. – P. 112123.
9. Techno-Economic Assessment of Calcium Looping for Thermochemical Energy Storage with CO<sub>2</sub> Capture / Castilla G. Martinez [et al.] // Energies. – 2021. – V. 14. – № 11. – P. 3211.
10. Климчук М.Н. Императивы развития предприятий альтернативной энергетики: акцент на инновации // Journal of Economic Regulation (Вопросы регулирования экономики). – 2012. – Т. 3. – № 4. – С. 142–149.
11. Приходько С.В. Повышение эффективности систем улавливания диоксида углерода из дымовых газов котельных установок. – М., 2013. – С. 7.
12. Ахметова В.Р., Смирнов О.В. Улавливание и хранение диоксида углерода-проблемы и перспективы // Башкирский химический журнал. – 2020. – Т. 27. – № 3. – С. 103–115.
13. Carbon capture and storage (CCS): the way forward / M. Bui [et al.] // Energy & Environmental Science. – 2018. – V. 11. – № 5. – P. 1062–1176.
14. Olivier J.G.J., Peters J.A.H.W., Janssens-Maenhout G. Trends in global CO<sub>2</sub> emissions. 2012 report. – 2012.
15. Салахов И.И., Шафеев Н.М., Черкасова Е.И. Технологии улавливания диоксида углерода // Булатовские чтения. – 2022. – Т. 2. – С. 132–137.
16. Overlooked pitfalls in CaO carbonation kinetics studies nearby equilibrium: Instrumental effects on calculated kinetic rate constants / J. Arcenegui-Troya [et al.] // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – V. 61. – № 8. – P. 6129–6138.
17. Scaling-up the calcium-looping process for CO<sub>2</sub> capture and energy storage / C. Ortiz [et al.] // KONA Powder and Particle Journal. – 2021. – V. 38. – P. 189–208.
18. Calcium Looping technology demonstration in industrial environment: the CLEANKER project and status of the CLEANKER pilot plant / M. Fantini [et al.] // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – V. 197. – P. 08006.
19. Fossil fuels in a trillion tonne world / V. Scott [et al.] // Nature Climate Change. – 2015. – V. 5. – № 5. – P. 419–423.
20. Haszeldine R.S. Carbon capture and storage: how green can black be? // Science. – 2009. – V. 325. – № 5948. – P. 1647–1652.
21. GCCSI G. Global status of CCS: 2020. – 2020.
22. CO<sub>2</sub> sequestration monitoring and verification technologies applied at Krechba, Algeria / A. Mathieson [et al.] // The Leading Edge. – 2010. – V. 29. – № 2. – P. 216–222.
23. The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal / C. Hepburn [et al.] // Nature. – 2019. – V. 575. – № 7781. – P. 87–97.
24. Воробьев К.А., Щерба В.А. Диоксид углерода как химическое сырье // География: развитие науки и образования. – 2021. – P. 149–157.
25. Султанова А.Р. Методы получения топлива из углекислого газа // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2018. – С. 8–10.
26. Applications of fly ash for CO<sub>2</sub> capture, utilization, and storage / A. Dindi [et al.] // Journal of CO<sub>2</sub> Utilization. – 2019. – V. 29. – P. 82–102.

**List of references:**

1. Statistical Review of World Energy 2022. – British Petroleum, 2022. – P. 15.
2. A review of CO<sub>2</sub> capture by absorption and adsorption / C.H. Yu [et al.] // Aerosol and Air Quality Research. – 2012. – V. 12. – № 5. – P. 745–769.



3. NOAA Annual 2021 Global Climate Report. [Электронный ресурс]: NOAA. – URL : <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202113>
4. Marchenko G.N., Altynbayeva E.R. Prospects for the use of new fuels and the development of renewable energy sources // Bulletin of Kazan State Energy University. – 2011. – V. 7. – № 4. – P. 6-13.
5. Townsend A., Raji N., Zapantis A. The value of carbon capture and storage (CCS) // Global CCS Institute: Docklands, Australia. – 2020.
6. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality / S. Chen [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – V. 167. – P. 112537.
7. Print media representations of carbon capture utilization and storage (CCUS) technology in China / K. Jiang [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – V. 155. – P. 111938.
8. Rosa L., Mazzotti M. Potential for hydrogen production from sustainable biomass with carbon capture and storage // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – V. 157. – P. 112123.
9. Techno-Economic Assessment of Calcium Looping for Thermochemical Energy Storage with CO<sub>2</sub> Capture / Castilla G. Martinez [et al.] // Energies. – 2021. – V. 14. – № 11. – P. 3211.
10. Klimchuk M.N. Imperatives of Development of Alternative Energy Enterprises: Focus on Innovation // Journal of Economic Regulation. – 2012. – V. 3. – № 4. – P. 142–149.
11. Prikhodko S.V. Increasing the efficiency of carbon dioxide capture systems from flue gases of boiler plants. – M., 2013. – P. 7.
12. Akhmetova V.R., Smirnov O.V. Carbon dioxide capture and storage-problems and prospects // Bashkir Chemical Journal. – 2020. – V. 27. – № 3. – P. 103–115.
13. Carbon capture and storage (CCS): the way forward / M. Bui [et al.] // Energy & Environmental Science. – 2018. – V. 11. – № 5. – P. 1062–1176.
14. Olivier J.G.J., Peters J.A.H.W., Janssens-Maenhout G. Trends in global CO<sub>2</sub> emissions. 2012 report. – 2012.
15. Salakhov I.I., Shafeev N.M., Cherkasova E.I. Technologies of carbon dioxide capture // Bulatov readings. – 2022. – V. 2. – P. 132–137.
16. Overlooked pitfalls in CaO carbonation kinetics studies nearby equilibrium: Instrumental effects on calculated kinetic rate constants / J. Arcenegui-Troya [et al.] // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – V. 61. – № 8. – P. 6129–6138.
17. Scaling-up the calcium-looping process for CO<sub>2</sub> capture and energy storage / C. Ortiz [et al.] // KONA Powder and Particle Journal. – 2021. – V. 38. – P. 189–208.
18. Calcium Looping technology demonstration in industrial environment: the CLEANKER project and status of the CLEANKER pilot plant / M. Fantini [et al.] // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – V. 197. – P. 08006.
19. Fossil fuels in a trillion tonne world / V. Scott [et al.] // Nature Climate Change. – 2015. – V. 5. – № 5. – P. 419–423.
20. Haszeldine R.S. Carbon capture and storage: how green can black be? // Science. – 2009. – V. 325. – № 5948. – P. 1647–1652.
21. GCCSI G. Global status of CCS: 2020. – 2020.
22. CO<sub>2</sub> sequestration monitoring and verification technologies applied at Krechba, Algeria / A. Mathieson [et al.] // The Leading Edge. – 2010. – V. 29. – № 2. – P. 216–222.
23. The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal / C. Hepburn [et al.] // Nature. – 2019. – V. 575. – № 7781. – P. 87–97.
24. Vorobyev K.A., Shcherba V.A. Carbon dioxide as a chemical raw material // Geography: development of science and education. – 2021. – P. 149–157.
25. Sultanova A.R. Methods of obtaining fuel from carbon dioxide // Contemporary problems of humanities and natural sciences. – 2018. – P. 8–10.
26. Applications of fly ash for CO<sub>2</sub> capture, utilization, and storage / A. Dindi [et al.] // Journal of CO<sub>2</sub> Utilization. – 2019. – V. 29. – P. 82–102.