



УДК 665

ТЕХНОЛОГИИ УЛАВЛИВАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

CARBON DIOXIDE CAPTURE TECHNOLOGIES

Салахов Ильзат Илшатович

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

Шафеев Нияз Мирхатович

студент
кафедры «Химической технологии переработки нефти и газа»,
Казанский национальный исследовательский
технологический университет
nshafeev@bk.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. В статье представлены и систематизированы результаты литературного обзора по существующим технологиям улавливания диоксида углерода методом абсорбции и адсорбции.

Ключевые слова: диоксид углерода, изменение климата, технологии улавливания, абсорбция, адсорбция.

Salakhov Ilzat Ilshatovich

Student of Department of Chemical
Technology of Petroleum and Gas Processing,
Kazan National Research
Technological University
lizat.salakhov@gmail.com

Shafeev Niyaz Mirkhatevich

Student of Department of Chemical
Technology of Petroleum and Gas Processing
Kazan National Research
Technological University
nshafeev@bk.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. The article presents an analytical review of existing technologies for capturing carbon dioxide by absorption and adsorption.

Keywords: carbon dioxide, climate change, capture technologies, absorption, adsorption.

Введение

Повышенное потребление ресурсов истощает природные запасы планеты, приводит к изменениям климата, загрязнению окружающей среды и другим экологическим проблемам. Климат постоянно меняется, но за последнее время эти изменения стали более экстремальными из-за действий человека. Ключевым фактором, влияющим на изменение климата, являются выбросы парниковых газов, которые продолжают расти и в настоящее время. Россия находится на четвертом месте по парниковым выбросам в мире [1].

Среди парниковых газов углекислый газ (CO_2) способствует глобальному потеплению более чем на 60 % из-за его очень значительного количества выбросов. Концентрация CO_2 в атмосфере в настоящее время близка к 400 ppm (parts per million), что значительно выше доиндустриального уровня около 300 ppm [2, 3]. Поэтому возникла необходимость создания систем, обеспечивающих значительное сокращение текущего уровня эмиссии CO_2 и его стабилизацию в атмосфере Земли.

Такие меры, как повышение энергетической эффективности и использование альтернативных источников энергии, могут в какой-то мере обеспечить снижение эмиссии CO_2 . Однако учитывая, что почти 80 % мировых потребностей в электроэнергии удовлетворяется за счет использования ископаемых видов топлива, нельзя ожидать в ближайшем будущем отказа от применения таких видов топлива без нанесения значительного ущерба мировой экономике [4].

Несмотря на продолжающиеся усилия по внедрению технологий производства возобновляемой энергии для замены ископаемых видов топлива [5], рост спроса на энергию поддерживает постоянную (около 80 %) долю ископаемого топлива в спросе на первичную энергию [6]. И как следствие, глобальные выбросы CO_2 продолжают расти [7]. Большинство будущих сценариев, которые соответствуют Парижскому соглашению, включают большую долю возобновляемой энергии, такой как энергия ветра и солнца, а также существенную роль улавливания и хранения углерода [8].

Технологии улавливания и захоронения углерода (carbon capture and storage technology – CCS) считаются особенно важными для снижения темпа роста температуры на планете в пределах 1,5–2 °C к 2050 г. Применение этих технологий – эффективный способ существенно снизить объем выбросов



«грязных» предприятий [9]. Технология CCS предусматривает улавливание CO_2 , вместо стравливания в атмосферу в результате промышленной деятельности предприятия, и последующее хранение в глубоководных залегающих породах или для использования в промышленных процессах.

Межправительственная группа по климатическим изменениям ООН и Международное энергетическое агентство согласны в том, что технология улавливания и хранения CO_2 является одной из наиболее важных низкоуглеродных технологий, необходимых для достижения социально-значимых целей по управлению изменениями климата при наиболее низких затратах. Кроме того, технология CCS является одной из немногих, которые сделали бы декарбонизацию возможной для таких секторов как нефтепереработка, химическая, цементная и сталелитейная промышленность.

Таким образом, данная проблема актуальной является с ресурсосберегательной, экологической и экономической точек зрения [10].

В работе рассмотрены перспективные и актуальные технологии улавливания диоксида углерода.

Методы

На сегодняшний день методы очистки газов от диоксида углерода разделяют на следующие две группы:

1) Физические методы:

– физическая абсорбция основана на различной растворимости углекислого газа в полярных растворителях (вода, метанол). При физической абсорбции процесс поглощения не сопровождается химической реакцией;

– адсорбция основана на поглощении диоксида углерода различными твердыми поглотителями (карбонаты, цеолиты, твердые амины);

– мембранное извлечение основано на различной способности газов проходить через полупроницаемую перегородку;

– электрохимическое извлечение основано на реакции восстановления CO_2 в CO , осуществляемой на Au-, Ag- или Pd-электродах.

2) Химические методы:

– химическая абсорбция основана на химическом взаимодействии диоксида углерода с соединениями щелочного характера (этанолламины, растворы карбонатов);

– каталитическое гидрирование основано на реакции метанирования в присутствии металлов VIII группы – рутений, родий, платина, никель, палладий;

– ферментативное извлечение основано на применении органических веществ белковой природы.

В данной статье будут рассмотрены технологии улавливания углекислого газа методом абсорбции и адсорбции.

Абсорбция водой – метод улавливания диоксида углерода из газов, представляющий собой типичный процесс физической абсорбции. Основные преимущества метода – доступность и дешевизна абсорбента, простота конструкции, отсутствие теплообменников. Недостатки – невысокая поглотительная способность водой диоксида углерода (8 кг CO_2 на 100 кг абсорбента), небольшая селективность, чрезмерно большие потери газа при высоком давлении вследствие повышения его растворимости. Наряду с диоксидом углерода в воде растворяются водород, оксид углерода, азот и др. Поэтому выделяющийся диоксид углерода недостаточно чистый [11, 12].

Абсорбция метанолом («ректисол-процесс») – метод улавливания углекислого газа, который используется преимущественно при температуре до минус 60 °С. При низкой температуре резко повышается поглотительная способность метанола. Так, при минус 60 °С и атмосферном давлении в 1 г метанола может раствориться до 600 см³ диоксида углерода. Селективность данного метода по отношению к CO_2 значительно выше, чем у водной абсорбции. Абсорбция происходит в 3 стадии:

– охлаждение газа до минус 35 °С при прямом контакте с 60 % водным раствором метанола;

– абсорбция в колонне при температуре минус 35 – минус 60 °С и давлении 2 МПа;

– десорбция путем последовательного снижения давления до 800, 130, 60 и 25 кПа.

Полная регенерация метанола достигается его кипячением.

Данный процесс наиболее целесообразно применять при очистке газа с большим содержанием примесей, например, коксового газа, а также в тех случаях, когда газ в конечном итоге должен подвергаться глубокому охлаждению [13, 14].

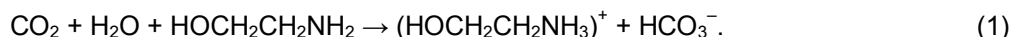
До последнего времени промышленное применение находила очистка газа от CO_2 **растворами карбоната калия**, активированного различными металлами. Данный процесс основан на абсорбции диоксида углерода водными растворами карбонатов калия или натрия, содержащими активирующие добавки поливалентных металлов (As, Se, Te, Sb) или циклических органических соединений. В промышленности наибольшее распространение в качестве таких активирующих добавок получили соединения мышьяка, вводимые в растворы, как правило, в виде мышьяковистого ангидрида. Для повышения растворимости диоксида углерода в нем сорбенте скорости процесса поглощения используют горячие растворы карбонатов (110–120 °С) [15].



Аминовая очистка является одним из старейших и широко используемых в мировой практике методом очистки газовых потоков от углекислого газа. В отличие от физических растворителей, где абсорбция обусловлена относительно слабыми межмолекулярными силами между растворителем и CO₂, в химических растворителях при абсорбции CO₂ образуются химические связи.

Алкоаноламины широко используются в качестве абсорбентов для улавливания углекислого газа. Структуры этаноламинов включают первичные, вторичные, третичные амины, содержащие по крайней мере одну гидроксильную и аминогруппу. Наиболее распространёнными являются моноэтаноламин (МЭА), диэтаноламин (ДЭА) и N-метилдиэтаноламин (МДЭА). Абсорбционная способность данных аминов по отношению к CO₂ составляет 7000, 1200 и 3,5 м³/с·кмоль при 25 °С для МЭА, ДЭА и МДЭА соответственно [16].

Таким образом, максимальной абсорбционной способностью по отношению к диоксиду углерода обладает моноэтаноламин. Фундаментальная химическая реакция этого процесса, следующая (уравнение 1):

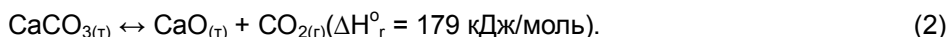


В процессе хемосорбции обычно применяют 15–20 % растворы моноэтаноламина. Давление процесса составляет около 1 бар, а температура в абсорбере и отпарной колонне обычно находится в пределах 40–60 °С и 120–140 °С соответственно. Теоретически минимальная энергия, необходимая для извлечения CO₂ из дымовых газов и сжатия CO₂ до 150 бар, составляет 0,396 ГДж/тону CO₂ [17, 18].

Недостатками данного метода являются высокая скорость коррозии оборудования, высокие энергозатраты при высокотемпературной регенерации абсорбента, большой размер оборудования.

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

Процесс ККЦ основан на многоциклическом прокаливании CaCO₃ (уравнение 2), который может быть получен из известняка как второго наиболее распространенного материала на земле после воды. Что касается улавливания CO₂, процесс ККЦ особенно выгоден из-за его высокой эффективности и низких затрат, позволяющих избежать выброса CO₂.



Карбонизация является экзотермической реакцией и обычно протекает при температуре около 650 °С. Реакция карбонизации характеризуется быстропротекающей фазой химической реакции, которая резко переходит в медленную фазу, которая определяется диффузией. Переход от быстрой к медленной фазе связан с накоплением слоя CaCO₃, достаточного для значительного замедления дальнейшей конверсии (вместо химической реакции начинает протекать диффузия CO₂ через твердый CaCO₃). В результате степень конверсия CaO в CaCO₃ обычно ограничивается примерно 70 % в первом цикле карбонизации продолжительностью около 10 минут. При экзотермической реакции карбонизации, протекающей при температуре около 650 °С, образуется избыток тепла, которое может быть использовано повторно или использоваться в отдельном паровом цикле [19].

Техническая реализация кальциево-карбонатного цикла заключается в циркуляции сорбента CaO между двумя реакторами с кипящим слоем, в одном из которых при более низкой температуре происходит поглощение CO₂, а в другом при более высокой температуре – разложение карбоната кальция с образованием CO₂. Технология с использованием реактора с псевдоожиженным слоем является подходящей для цикла карбонизация-кальцинация, так как эта технология широко применяется и есть возможность контакта газа с твердыми частицами при однородной температуре слоя (рис. 1) [20, 21].

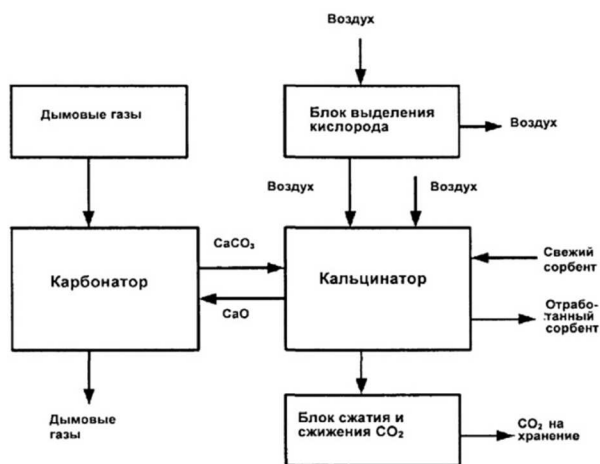
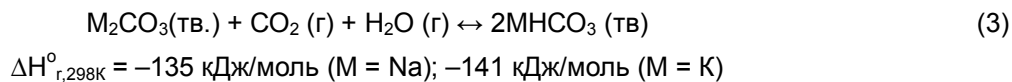


Рисунок 1 – Схема кальциево-карбонатного цикла



Адсорбция CO_2 с помощью сухих, регенируемых карбонатов металлов первой группы (щелочных металлов) также является промышленно освоенной технологией. Сухие карбонаты натрия или калия могут реагировать с CO_2 в присутствии пара с образованием бикарбонатов и выделением тепла (реакция происходит при температуре 60–110 °С) (уравнение 3):



Эта реакция становится обратной при более высокой температуре (120–200 °С) с выделением CO_2 и пара.

Как показывает практика, применение неподвижного слоя или систем псевдооживленного слоя плотной фазы не является рациональным, так как в таком процессе образуется избыток тепла при экзотермической адсорбции. Это весомерно увеличивает температуру слоя и таким образом снижается избирательная способность улавливания CO_2 . Поэтому следует использовать прямоточный адсорбер с гравитационным движением потока, который позволит уменьшить перепад давления в газовом потоке и, таким образом, снизит потребление энергии газодувками [22].

Адсорбенты из карбонатов щелочных металлов должны находиться в инертной среде для усиления их устойчивости к истиранию при использовании в больших адсорберах, что существенно уменьшает их способность к улавливанию CO_2 (от 70 до 90 %). Поэтому важно применение поддерживающих материалов, таких как оксид алюминия, активированный уголь, цеолиты, оксид магния и диоксид кремния. Достаточной стабильностью обладает карбонат натрия Na_2CO_3 на основе оксида алюминия. Важно отметить, что при использовании этого сорбента температура регенератора должна быть ограничена значением 150 °С, чтобы избежать постоянной его деактивации ввиду образования $\text{NaAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$, несмотря на то, что более высокие температуры являются более благоприятными для эндотермической декарбонизации. Более предпочтительным является сорбент $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ с активной фракцией карбонатов 10–40 % (вес), удельной поверхности 100–120 м²/г и коэффициентом истирания Дэвисона равным 12, который успешно применяется на демонстрационных установках с улавливанием более 90 % CO_2 [23, 24].

Химически активные твердые сорбенты ранее не рассматривались для использования в промышленных масштабах из-за плохих физических и экономических показателей. Однако в настоящее время в связи с использованием наноструктурных материалов стали возможным дальнейшие разработки новых твердых сорбентов с лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с жидкими сорбентами.

В отличие от жидких аминов **твердые аминовые сорбенты** лишены многих недостатков. Дисперсия, иммобилизация и локализация функциональных аминогрупп в пористом твердом носителе позволяет создавать более стабильные, более эффективные по массопереносу, менее токсичные и менее коррозионные материалы, чем жидкие аминовые сорбенты. Чтобы избежать существенных энергозатрат, которые связаны с нагревом и испарением большого количества воды в твердых аминовых сорбентах осуществляется сухой способ улавливания CO_2 .

Ниже представлены некоторые технологические особенности процесса улавливания CO_2 с помощью твердых аминовых сорбентов:

- поскольку пар может равномерно и быстро нагреть слой адсорбента до необходимой температуры, именно он используется для десорбции CO_2 . Пар также участвует в переносе CO_2 из зоны адсорбера;

- по окончании процесса десорбции проводится продувка слоя сорбента воздухом для охлаждения при подготовке к следующему циклу адсорбции. Этот воздух также используется для удаления избытка влаги при конденсации пара;

- адсорбция осуществляется при температуре 95 °С, а десорбция происходит при температуре 135 °С. Такое изменение температуры приводит к энергозатратам 756 кДж/кг CO_2 [25, 26].

Также адсорбентами для диоксида углерода могут служить **цеолиты (молекулярные сита), активированный уголь** и др. Для очистки газов обычно используют по меньшей мере два адсорбента (например, активированный уголь и молекулярные сита или силикагель), которые могут быть соединены вместе или располагаться в виде отдельных слоев. Диоксид углерода следует удалять из сухого воздушного потока, поэтому газовый поток нужно предварительно пропустить через слой силикагеля для удаления воды, но данный процесс рассматривается для каждого типа улавливания отдельно [27].

Для поглощения CO_2 при низком давлении активированные угли менее эффективны, чем цеолит. Однако, поскольку эффективность активированного угля увеличивается с повышением давления, то при давлениях более 5 бар поглощение CO_2 углем становится больше, чем для цеолита благодаря большей удельной поверхности и большему объему пор.

Дабы повысить степень поглощения CO_2 возможна иммобилизация аминов на цеолитах. Крайне высокая сорбционная емкость по отношению к CO_2 (110 мг/г) появляется у обогащенного азотом активированного угля. При повышенной температуре (80 °С) после пропитывания амином емкость сорбента



возрастает в два раза в диапазоне давлений от 0,1 до 10 бар. Это объясняется активной хемосорбцией с образованием карбонатов на поверхности сорбентов. Хотя активированные угли применяются в некоторых процессах разделения газов, но их недостатком является низкая селективность при разделении CO_2 и N_2 , что ограничивает их использование для удаления диоксида углерода [28, 29].

Заключение

Все рассмотренные в работе технологии улавливания CO_2 имеют промышленные перспективы. Однако по степени промышленного освоения в данный момент их можно разбить на две категории: первого и второго поколений. Технологии первого поколения являются, в основном, промышленно освоенными – это аминовые растворы, охлажденный аммиачный раствор, кальциево-карбонатный цикл, карбонаты щелочных металлов. Россия, в настоящее время, стоит на пороге внедрения экологических технологий по улавливанию углекислого газа и уменьшению углеродного следа, так как от этого напрямую зависит экономический эффект от экспорта в Европу. Также рассматривается множество путей реализации полученного в ходе очистки дымовых газов углекислого газа – геологическое захоронение, легкая промышленность (пищевая), медицина и др.

Литература:

1. Statistical Review of World Energy 2021 // British Petroleum, 2021. – 15 p.
2. A review of CO_2 capture by absorption and adsorption / C.H. Yu [et al.] // Aerosol and Air Quality Research. – 2012. – Vol. 12. – № 5. – P. 745–769.
3. Ежова Н.Н., Сударева С.В. Современные методы очистки дымовых газов тепловых электростанций от диоксида углерода // Теплоэнергетика. – 2009. – № 1. – С. 14–19.
4. Приходько С.В. Повышение эффективности систем улавливания диоксида углерода из дымовых газов котельных установок. – М., 2013. – С. 7.
5. 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.
6. 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.
7. Olivier J.G.J., Peters J.A.H.W., Janssens-Maenhout G. Trends in global CO_2 emissions. 2012 report. – 2012.
8. Techno-Economic Assessment of Calcium Looping for Thermochemical Energy Storage with CO_2 Capture / G. Martinez Castilla [et al.] // Energies. – 2021. – Vol. 14. – № 11. – P. 3211.
9. Ахметова В.Р., Смирнов О.В. Улавливание и хранение диоксида углерода-проблемы и перспективы // Башкирский химический журнал. – 2020. – Т. 27. – № 3. – С. 103–115.
10. Beckwith R. Carbon capture and storage: a mixed review // Journal of Petroleum Technology. – 2011. – Vol. 63. – № 05. – P. 42–45.
11. Способ очистки газовой смеси от CO_2 методом многоступенчатой абсорбции / Л.А. Акулов [и др.]. – 2007.
12. Корнюшенко Д.А., Блиничев В.Н., Бондарева Т.И. Абсорбция диоксида углерода водой при импульсном высокоэнергетическом воздействии // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2003. – Т. 46. – № 5. – С. 14–16.
13. Highlights and challenges in the selective reduction of carbon dioxide to methanol / S. Navarro-Jaén [et al.] // Nature Reviews Chemistry. – 2021. – Vol. 5. – № 8. – P. 564–579.
14. Рахимова С.Ж., Крахмалева Т.М. Очистка природного газа от примесей. – 2017.
15. Солодова Н.Л., Минигулов Р.Р., Емельянычева Е.А. Водород как перспективный энергоноситель. Современные методы получения водорода // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 3. – С. 137–140.
16. Bishnoi S., Rochelle G.T. Absorption of carbon dioxide in aqueous piperazine/methyldiethanolamine // AIChE Journal. – 2002. – Vol. 48. – № 12. – P. 2788–2799.
17. Solubility of carbon dioxide in aqueous solutions of piperazine in the low gas loading region / V. Ermatchkov [et al.] // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2006. – Vol. 51. – № 5. – P. 1788–1796.
18. Rochelle G.T. Amine scrubbing for CO_2 capture // Science. – 2009. – Vol. 325. – № 5948. – P. 1652–1654.
19. 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. – Vol. 61. – № 8. – P. 6129–6138.
20. Scaling-up the calcium-looping process for CO_2 capture and energy storage / C. Ortiz [et al.] // KONA Powder and Particle Journal. – 2021. – Vol. 38. – P. 189–208.
21. 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. – Vol. 197. – P. 08006.
22. Oxy-Fuel Combustion of Hard Coal, Wheat Straw, and Solid Recovered Fuel in a 200 kWth Calcium Looping CFB Calciner. Energies 2021 / J. Moreno [et al.]. – 2021. – Vol. 14. – P. 2162.
23. Na_2CO_3 promoted CaO -based heat carrier for thermochemical energy storage in concentrated solar power plants / Y. Xu [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2022. – P. 134852.
24. Modified Ca-Looping materials for directly capturing solar energy and high-temperature storage / L. Teng [et al.] // Energy Storage Materials. – 2020. – Vol. 25. – P. 836–845.
25. Портякова И.С., Мишин И.В., Кустов Л.М. Исследование структурных и адсорбционных свойств высоко-температурных адсорбентов углекислого газа на различных носителях // Журнал физической химии. – 2020. – Т. 94. – № 1. – С. 131–135.



26. Воробьев К.А., Щерба В.А. Диоксид углерода как химическое сырье // География: развитие науки и образования. – 2021. – С. 149–157.
27. Сааведра Х.Х.А. Адсорбционные и молекулярно-ситовые свойства цеолитов // Научный форум: медицина, биология и химия. – 2017. – С. 58–61.
28. К вопросу об адсорбции углекислого газа окислами металлов / В.В. Нахалов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1977. – Т. 214. – С. 103–105.
29. Брюханов И.А., Ларин А.В., Ковалев В.Л. Исследование прочностных свойств цеолитов при адсорбции углекислого газа // Авиакосмические технологии (АКТ-2012). – 2012. – С. 29–35.

References:

1. Statistical Review of World Energy 2021 // British Petroleum, 2021. – 15 p.
2. A review of CO₂ capture by absorption and adsorption / C.H. Yu [et al.] // Aerosol and Air Quality Research. – 2012. – Vol. 12. – № 5. – P. 745–769.
3. Ezhova N.N., Sudareva S.V. Modern methods of cleaning flue gases of thermal power plants from carbon dioxide. *Teploenergetika*. – 2009. – № 1. – P. 14–19.
4. Prikhodko S.V. Improving the efficiency of systems for capturing carbon dioxide from flue gases of boiler plants. – M., 2013. – P. 7.
5. Marchenko G.N., Altynbaeva E.R. Prospects for the use of new types of fuel and the development of renewable energy sources // *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*. – 2011. – Vol. 7. – № 4. – P. 6–13.
6. Klimchuk M.N. Imperatives for the Development of Alternative Energy Enterprises: Emphasis on Innovation // *Journal of Economic Regulation (Issues of Economic Regulation)*. – 2012. – Vol. 3. – № 4. – P. 142–149.
7. Olivier J.G.J., Peters J.A.H.W., Janssens-Maenhout G. Trends in global CO₂ emissions. 2012 report. – 2012.
8. Techno-Economic Assessment of Calcium Looping for Thermochemical Energy Storage with CO₂ Capture / G. Martinez Castilla [et al.] // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – № 11. – P. 3211.
9. Akhmetova V.R., Smirnov O.V. Capture and storage of carbon dioxide – problems and prospects // *Bashkir Chemical Journal*. – 2020. – Vol. 27. – № 3. – P. 103–115.
10. Beckwith R. Carbon capture and storage: a mixed review // *Journal of Petroleum Technology*. – 2011. – Vol. 63. – № 05. – P. 42–45.
11. A method of cleaning a gas mixture from CO₂ by the method of multistage absorption / L.A. Akulov [et al.]. – 2007.
12. Korniyushenko D.A., Blinichev V.N., Bondareva T.I. Absorption of carbon dioxide by water under pulsed high-energy impact. *Izvestiya of higher educational institutions // Chemistry and chemical technology*. – 2003. – Vol. 46. – № 5. – P. 14–16.
13. Highlights and challenges in the selective reduction of carbon dioxide to methanol / S. Navarro-Jaén [et al.] // *Nature Reviews Chemistry*. – 2021. – Vol. 5. – № 8. – P. 564–579.
14. Rakhumova S.Zh., Krakhmaleva T.M. Purification of natural gas from impurities. – 2017.
15. Solodova N.L., Minigulov R.R., Emelyanycheva E.A. Hydrogen as a promising energy carrier. Modern methods of obtaining hydrogen // *Bulletin of the Kazan Technological University*. – 2015. – Vol. 18. – № 3. – P. 137–140.
16. Bishnoi S., Rochelle G.T. Absorption of carbon dioxide in aqueous piperazine/methyldiethanolamine // *AIChE Journal*. – 2002. – Vol. 48. – № 12. – P. 2788–2799.
17. Solubility of carbon dioxide in aqueous solutions of piperazine in the low gas loading region / V. Ermatchkov [et al.] // *Journal of Chemical & Engineering Data*. – 2006. – Vol. 51. – № 5. – P. 1788–1796.
18. Rochelle G.T. Amine scrubbing for CO₂ capture // *Science*. – 2009. – Vol. 325. – № 5948. – P. 1652–1654.
19. 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. – Vol. 61. – № 8. – P. 6129–6138.
20. Scaling-up the calcium-looping process for CO₂ capture and energy storage / C. Ortiz [et al.] // *KONA Powder and Particle Journal*. – 2021. – Vol. 38. – P. 189–208.
21. 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. – Vol. 197. – P. 08006.
22. Oxy-Fuel Combustion of Hard Coal, Wheat Straw, and Solid Recovered Fuel in a 200 kWth Calcium Looping CFB Calciner. *Energies 2021* / J. Moreno [et al.]. – 2021. – Vol. 14. – P. 2162.
23. Na₂CO₃ promoted CaO-based heat carrier for thermochemical energy storage in concentrated solar power plants / Y. Xu [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2022. – P. 134852.
24. Modified Ca-Looping materials for directly capturing solar energy and high-temperature storage / L. Teng [et al.] // *Energy Storage Materials*. – 2020. – Vol. 25. – P. 836–845.
25. Portyakova I.S., Mishin I.V., Kustov L.M. Investigation of the structural and adsorption properties of high-temperature carbon dioxide adsorbents on various carriers // *Journal of Physical Chemistry*. – 2020. – Vol. 94. – № 1. – P. 131–135.
26. Vorobyov K.A., Shcherba V.A. Carbon dioxide as a chemical raw material // *Geography: development of science and education*. – 2021. – P. 149–157.
27. Saavedra H.H.A. Adsorption and molecular sieve properties of zeolites // *Scientific forum: medicine, biology and chemistry*. – 2017. – P. 58–61.
28. On the issue of carbon dioxide adsorption by metal oxides / V.V. Nakhalov [et al.] // *Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. – 1977. – Vol. 214. – P. 103–105.
29. Bryukhanov I.A., Larin A.V., Kovalev V.L. Study of the strength properties of zeolites during the adsorption of carbon dioxide // *Aerospace Technologies (АКТ-2012)*. – 2012. – P. 29–35.