



МЕТОДЫ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТВЕРДООКСИДНОМ ТОПЛИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: 0000-0001-8520-5432, vlasovaay@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Определение эффективных методов улавливания и утилизации углекислого газа, поиск перспективных решений и апробирование методов улавливания двуокиси углерода на лабораторной установке. Наиболее популярны абсорбционные методы улавливания CO_2 , где газ реагирует с жидким абсорбентом. МЕТОДЫ. Лабораторная установка включает сам источник CO_2 (газовый баллон), компрессор, абсорбер и колбу с раствором гидроксида натрия для анализа эффективности поглощения. Эффективность оценивается титриметрическим способом, где в качестве титранта используют раствор соляной кислоты, в качестве индикаторов выступает фенолфталеин и метиловый оранжевый. РЕЗУЛЬТАТЫ. Для анализа были выбраны доступные абсорбенты, которые есть на большинстве тепловых электрических станциях. В результате лабораторного эксперимента было обнаружено, что наибольшей сорбционной способностью обладает раствор гидроксида натрия 6%. На основе полученных данных разработана технологическая установка по улавливанию и утилизации двуокиси углерода. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Декарбонизация промышленного энергетического сектора является сложным процессом, который требует глобальных перемен в топливной политике, а именно переход на безуглеродные энергетические ресурсы. Альтернативным энергетическим ресурсом является водородная энергетика, но даже тут присутствуют выбросы двуокиси углерода. Улавливание и утилизация помогут декарбонизировать основные источники загрязнения. Промышленное улавливание двуокиси углерода обладает большим потенциалом, который кроется в разнообразии использования сорбционных материалов.

Ключевые слова: углекислый газ; твердооксидный топливный элемент; тепловые электрические станции.

Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки «Изучение процессов и гибридной энергетической установке топливный элемент – газовая турбина» шифр проекта FZSW-2022-0001

Для цитирования: Филимонова А.А., Власова А.Ю., Камалиева Р.Ф. Методы декарбонизации процесса получения электроэнергии в твердооксидном топливном элементе / 2022. Т.24. № 6. С. 72-82. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-72-82.

GENERATING ELECTRICITY IN A SOLID OXIDE FUEL CELL DECARBONIZATION METHODS

AA. Filimonova, AY. Vlasova, RF. Kamaliev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: 0000-0001-8520-5432, vlasovaay@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. Determination of effective methods of carbon dioxide capture and utilization, search for promising solutions and testing of carbon dioxide capture methods at a laboratory facility. The most popular absorption methods of CO_2 capture, in which the gas reacts with a liquid absorbent. METHODS The laboratory setup includes the CO_2 source itself (gas cylinder), an absorber, and a flask with sodium hydroxide solution to analyze absorption efficiency. Efficiency is evaluated by the titrimetric method, where a solution of hydrochloric acid is used as a titrant, phenolphthalein and methyl orange act as indicators. RESULTS. For

the analysis, available absorbents were selected, which are available at most thermal power plants. As a result of a laboratory experiment, it was found that a quicklime suspension of 6% has the highest sorption capacity. **CONCLUSION.** The decarbonization of the industrial energy sector is a complex process that requires global changes in fuel policy, namely the transition to carbon-free energy resources. An alternative energy resource is hydrogen energy, but even here carbon dioxide emissions are present. Capture and disposal will help decarbonize the main sources of pollution. Industrial carbon dioxide capture has great potential, which lies in the variety of uses of sorption materials.

Keywords: carbon dioxide; solid oxide fuel cell; thermal power plants.

Results obtained with the financial support of the Ministry of Education «Study of processes and hybrid power plant fuel cell - gas turbine» cipher project FZSW-2022-0001

For citation: Filimonova AA, Vlasova AY, Kamaliev RF. Generating electricity in a solid oxide fuel cell decarbonization methods. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):72-82. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-72-82.

Введение

Быстрый экономический рост стал толчком к резкому увеличению спроса на различные энергетические ресурсы. Следствием этого послужило увеличение добычи и использования традиционных видов топлива (природный газ, продукты нефтепереработки, каменный уголь). Однако, широкое использование ископаемых видов топлива неблагоприятно воздействует на окружающую среду.

На сегодняшний день мы наблюдаем, как все больше промышленно развитых стран стремятся к полному запрещению вредных газовых выбросов. В смеси газовых выбросов преобладают окиси углерода, серы, азота, большая часть приходится на содержание углекислого газа. Поэтому современное общество стремится к снижению выбросов во всех направлениях развития. Объем выбросов углекислого газа распределяется следующим образом (рисунок 1) [1-2].



Рис. 1. Выбросы углекислого газа по секторам

Fig. 1. Carbon dioxide emissions by sector

Экологические проблемы, связанные с выбросами парниковых газов, а вследствие и с резким повышением температуры, стали проблемами мирового масштаба. Доля парниковых газов значительно возросла со времен промышленной революции, а глобальная концентрация углекислого газа выросла на 37%. Исследования показали, что повышенный уровень парниковых газов в атмосфере вызывает глобальное потепление, а без внедрения политики снижения парниковых газов их выбросы к 2030 году могут увеличиться до 25 – 90% по сравнению с 2000 годом [1].

Углекислый газ, метан, закись азота и фторированные газы являются парниковыми газами, среди которых углекислый газ составляет значительную долю по отношению к его количеству, присутствующему в атмосфере. Согласно прогнозу Межправительственной группы экспертов по изменению климата, к 2100 году в атмосфере может содержаться до 570 частей на миллион CO_2 , что приводит к повышению средней глобальной температуры примерно на 2°C . Поэтому сокращение выбросов парниковых газов является постоянно растущей проблемой для производственных подразделений и тепловых электрических станций, работающих на

органическом топливе. Решение данной проблемы ориентировано на применение альтернативных технологий декарбонизации. Декарбонизация производственных процессов приведет к фундаментальным изменениям, которые потребуют специальных индивидуальных решений.

На сегодняшний день, многие страны применяют различные подходы по сокращению выбросов углекислого газа в атмосферу, включающие в себя использование низкоуглеродистого топлива (ядерное топливо, водород и др.), использование возобновляемых видов энергии (энергия ветра, солнечная энергия, геотермальная энергия, низкопотенциальное тепло и др.), повышение энергоэффективности, внедрение геоинженерных подходов и подходов по энергосбережению, а также технологии по улавливанию и дальнейшей утилизации углекислого газа [2].

Тематика данной работы актуальна, так как большинство промышленных комплексов работает на органическом виде топлива и как следствие есть большие масштабы выброса углекислого газа в атмосферу.

Литературный обзор

В России политика декарбонизации представляет собой переход на водородную энергетику. Использование водородных топливных элементов признано лидирующим направлением в достижении политики декарбонизации и повышении эффективности энергетического производства. С помощью твердооксидного топливного элемента можно получать как электрическую так и тепловую энергию, однако, при работе такого топливного элемента, все равно происходит выделение углекислого газа, которую необходимо улавливать и утилизировать (рисунок 2).

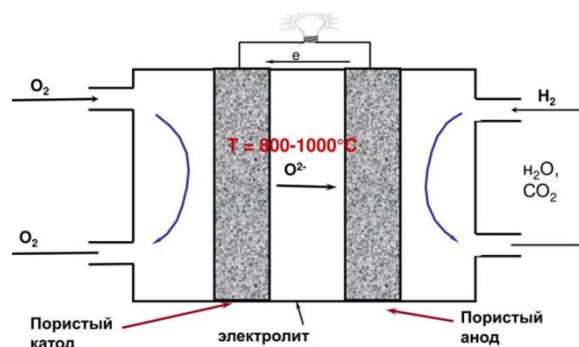


Рис 2. Твердооксидный топливный элемент

Fig. 2. Solid Fuel Cell

Работа твердооксидного элемента базируется на реакции между водородсодержащим топливом и кислородом, при высокой температуре происходит реакция, продуктами которой является углекислый газ и пары воды. Данную смесь необходимо уловить.

Улавливание углекислого газа из дымовых газов тепловых электрических станций и нефтехимических технологических потоков было признано одной из важнейших стратегий, необходимых для снижения выбросов парниковых газов в атмосферу. Чтобы поддерживать парниковые газы на приемлемом уровне, требуется значительное сокращение выбросов углекислого газа за счет его разделения и дальнейшей утилизации. В странах зарубежья существуют региональные кластеры, которые представляют собой сообщества промышленные предприятия прямо или косвенно связанных между собой. Деятельность кластеров нацелена на извлечении всеобщей выгоды от выработки качественной продукции по более низкой цене за счет использования общих ресурсов. Подобная политика распространяется и на другие отрасли, такие как: технологические потоки, транспортная инфраструктура, профессиональный опыт. Кластер предназначен для объединения нескольких промышленных предприятий и электростанций общей инфраструктурой улавливания, транспортировки и утилизации углекислого газа. [2]

Первым этапом в политике декарбонизации является технология улавливания CO_2 . Углекислый газ может быть уловлен несколькими способами:

- выделение CO_2 в химическом технологическом процессе, когда весь газовый поток направляется в общую сеть;
- при наличии в газовой смеси достаточного количества кислорода, согласно стехиометрическим коэффициентам, сгорание газа является возможным способом при

организации процесса с отводом тепла от внешнего источника. В качестве источников внешнего тепла выделяют бойлеры, теплоэлектростанции, промышленные печи для обжига и цементные заводы. При смежных отраслях промышленности возможно более рациональное использование;

- использование современных технологий по улавливанию, которые базируются на использовании жидких, твердых или иных форм поглощающих материалов, которые могут селективно сорбировать углекислый газ.

На сегодняшний день применение специальных материалов для улавливания углекислого газа является рациональным и быстрым решением в данной проблеме. Данный метод практически не имеет ограничений и носит масштабный характер. Также этот метод может быть использован дополнительно на линии доочистки газа. такая линия может совместно использоваться различными источниками промышленных выбросов. Пути улавливания CO₂ представлены на рисунке 3. [2]



Рис. 3. Технологии улавливания CO₂.

Fig. 3. CO₂ capture technologies

Авторы Лемпорт П.С. и Бобрикова А.А. делают акцент на улавливание углекислого газа абсорбционным способом. Их изобретение основывается на контакте газа с абсорбентом, который представляет собой смесь соли щелочного металла либо гидроксид щелочного металла, полиамин, алкоаноламин. Среди алканоламинов чаще всего используется моноэтаноламин (МЭА), диэтаноламин (ДЭА), триэтаноламин (ТЭА), метилдиэтаноламин (МДЭА). Из большого многообразия видов полиаминов основное внимание авторов завоевал пиперазин. Пиперазин имеет большое число производных, которые обладают различными свойствами и отличной эффективностью. Среди производных выделили следующие виды: N-(2-гидроксиэтил) пиперазин, N,N'-бис-(2-гидроксиэтил)-пиперазин, N-(2-аминоэтил)пиперазин и другие соединения данного класса, а также некоторые производные этилен-1,2-диамина. Данные реагенты могут быть применимы для улучшения поташной очистки газовых потоков. [3,4, 11]

В патенте 2244586 представлен способ улавливания углекислого газа за счет адсорбции, где в качестве адсорбента используется оксид алюминия с нанесением из карбоната калия. [5]

В патенте 2252063 описан способ стадийной очистки с применением различных аминов. Так на первой стадии применяется первичный амин, как наиболее эффективный, на второй стадии очистки (доочистки) применяется комбинированный состав из вторичных и третичных аминов. [6]

В зарубежных странах улавливание углекислого газа осуществляется с применением водных смесей алканоламинов, с добавлением солей щелочных металлов. Данный метод хорошо описан в следующих патентах: US 4971718, US 4336233 [7-11.]

Помимо абсорбционных методов существуют адсорбционные способы улавливания. Так авторами Кустовым Л.М. и Гусейновым Ф.И. был предложен адсорбент на основе мезопористой металлоорганической каркасной структуры, выбранной из структур IRMOF3, MOF177, HKUST1 (MOF199), ZIF8, MIL100, MOF200, MOF210, MIL101 или MIL53. Для эффективного использования, основу необходимо подготовить, для этого использовали раствор соли цинка. После обработки водным раствором производят нагревание в атмосфере инертным газом. В результате образуется оксид цинка, который используется в качестве модифицирующей добавки [11-13].

Авторы Елисеев А.А. и Петухов Д.И. предложили мембранный метод разделения

газовой смеси. Устройство мембранного контактора представляет собой Мембранный модуль, подключенный входами и выходами к линиям подачи и сброса газовой и жидкой фаз, содержащий один или несколько размещенных в горизонтальной плоскости и соединенных параллельно контакторных элементов. Мембрана используется нанопористая. Среди зарубежных разработок тоже есть аналоговые, которые изложены в патенте US 5753009. Данный патент опирается на разделение газовых смесей с применением контактора. Контактёр представляет собой мембранное устройство, где в качестве мембран используются полые волокна с двухслойным мембранным материалом. Мембрана состоит из пористого и непористого слоя. Непористый слой предназначен для селективной очистки и является селективно-проницаемым для отделяемого газа [8].

Выделение углекислого газа в различных технологических процессах сопровождается отличными объемами выделяющегося газа. Поэтому создание единой системы транспортировки CO_2 приведет к преодолению технических и экономических барьеров, связанных с созданием транспортной инфраструктуры и использования реальной экономии за счет роста производства [2].

После улавливания и концентрирования углекислого газа возможно либо утилизировать, либо захоронить на длительный срок. Для осуществления подземного хранения необходимо специально разработанное пространство, но данный способ зарекомендовал себя как безрисковое техническое решение. Углекислый газ возможно использовать в качестве сырья для химической промышленности или в качестве жидкости для повышения нефтеотдачи пласта. Перспективным направлением по утилизации CO_2 является превращение в ценные химические продукты и материалы. Например, превращение CO_2 под действием катализатора в продукты с высокой добавленной стоимостью. Но каждый процесс является весьма дорогостоящим с технической стороны. На сегодняшний день возможны к реализации в промышленном масштабе получение мочевины, салициловой кислоты, этиленкарбоната и метанола (рисунок 4).[2]

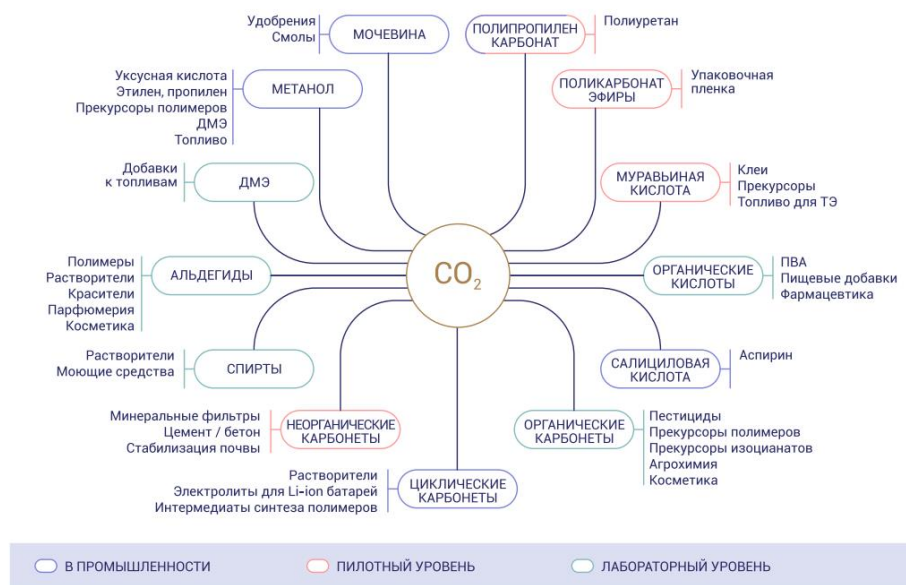


Рис. 4. Возможное получение продукции из CO_2

Fig. 4. Possible CO_2 products

Основываясь на литературных данных и на представленных способах улавливания углекислого газа необходимо апробирование их в лабораторных условиях и определение эффективности использования данных способов. Актуальность данной работы состоит в том, что после проведения лабораторных экспериментов были определены сорбирующие вещества, обладающие наибольшей эффективностью. На основании данных экспериментов была предложена технологическая установка с возможностью регенерации абсорбента и многократное его использование на установке.

Материалы и методы

Абсорбционные методы улавливания CO_2 весьма распространены на промышленных предприятиях. Поэтому провели ряд экспериментов в лабораторных

условиях на поглощение углекислого газа абсорбентами. Для проведения эксперимента была собрана лабораторная установка (рисунок 5).

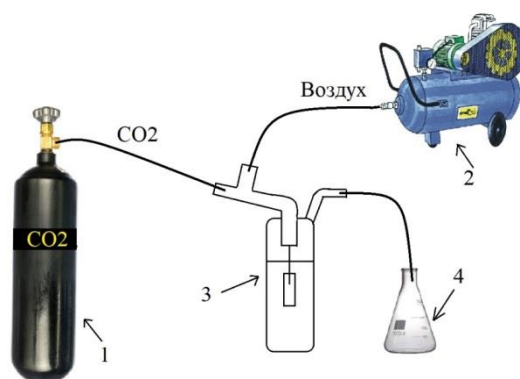


Рис.5 Лабораторная установка с использованием абсорбера
1- газовый баллон с CO₂, 2-компрессор, 3-абсорбер, 4- коническая колба с щелочным раствором.

Fig. 5 Laboratory installation with absorber
1-CO₂ gas cylinder, 2-compressor, 3-absorber, 4- cone with alkaline solution.

В качестве источника углекислого газа использовали баллон CO₂ 1 с редуктором. На редукторе установили расход газа 0,1 л/мин. Подачу углекислого газа осуществляли совместно с подачей воздуха в соотношении 1:3 соответственно (расход воздуха 0,3 л/мин). Воздух подавали с помощью воздушного компрессора 2.

Смесь газов подается в абсорбер 3 через трубку, на конце трубки установлен воздушный камень для разбивания пузырьков газа на более мелкие. Контакт газовой фазы и абсорбента при такой разбивке максимальный. Продувка газовой смесью осуществляется в течение 4 мин. Из абсорбера, после поглощения, газ переходит в колбу 4 с щелочным раствором гидроксида натрия. Концентрация раствора гидроксида натрия составляет 0,01 Н. Реальное изображение установки изображено на рисунке 6.



Рис. 6. Реальная лабораторная установка с использованием абсорбера

Fig. 6. Actual laboratory installation using absorber

Выбор именно такой методики определения основывается на том, что оставшаяся углекислого газа после абсорбера реагирует с раствором гидроксида натрия 0,01 Н, при этом углекислый газ переходит в гидрокарбонаты. Дальнейшее определение гидрокарбонатов определяли с помощью титрования.

Титрование проводили согласно ГОСТ 31957-2012 «Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов».[12] Данная методика позволяет определить общую щелочность и массовые концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. В качестве титранта используют раствор HCl 0,1 Н. Титрование проводили с применением индикаторов фенолфталеин и метиловый оранжевый.

Экспериментальные исследования

Цель экспериментальной части заключалась в определении «рабочих» раствором абсорбентов, которые эффективно улавливают углекислый газ. В качестве абсорбентов были использованы: проточная вода (холостая проба), раствор гидроксида

натрия 10%, раствор водного аммиака 10%, хеламин 1%, раствор гидроксида кальция, суспензия гидроксида кальция 6%, раствор карбоната натрия 25%, суспензия негашеной извести 6%, раствор хлорида кальция 6%, раствор шлама предварительной очистки ВПУ 6%. Выбор данных абсорбентов обоснован их доступностью и небольшой стоимостью. Так как метод улавливания углекислого газа актуален для энергетических предприятий, то все имеющиеся реактивы есть в наличии на станциях и используются в других блоках.

Хеламин – это реагент на основе аминов и полиаминов, чаще всего используется для корректировки водно-химического режима котлов. Состав хеламина незначительно меняется и возможно наличие поликарбоксилатов, а также наличие летучих аминов таких как аммиак.

Шлам предварительной очистки ВПУ – это природная устойчивая смесь элементов, содержание которых зависит от химического состава поступающей на водоподготовительные установки сырой воды. Более 80% шлама составляет карбонат кальция, оставшиеся 20% делят между собой сульфаты, гидроксиды силикаты. Шлам обладает довольно высокой механической прочностью, о чем свидетельствуют однородный гранулометрический состав измельченного образца. Шлам является инертным материалом и имеет 5 класс опасности.[4, 13-17] Шлам возможно использовать для очистки дымовых газов от двуокиси углерода. Существует определенная технология подготовки шлама, а именно приготовление гранулированного шлама со связыванием с жидким натриевым стеклом в объемном соотношении 2:1 соответственно.[16-20]

Результаты лабораторных экспериментов приведены в таблице 1

Таблица 1

Результаты лабораторного эксперимента по абсорбции двуокиси углерода

Сорбент	Тем-ра, °C	В воде присутствуют ионы	Щелочность, мг экв/л		
			гидратная	карбонатная	бикарбонатная
Вода	25	HCO_3^-	-	-	95
Раствор NaOH 10%	25	OH^- , CO_3^{2-}	75	-	-
Раствор аммиака 10%	25	OH^- , CO_3^{2-}	159	-	-
Хеламин 1%	25	CO_3^{2-} , HCO_3^-	-	36	52
Раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$	25	HCO_3^-	-	-	96
Раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 6%	25	HCO_3^-	-	-	85
Раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 6%	95	CO_3^{2-} , HCO_3^-	-	50	38
Раствор Na_2CO_3 25%	25	HCO_3^-	-	-	84
Раствор Na_2CO_3 25%	95	HCO_3^-	-	-	78
Раствор CaO 6%	25	CO_3^{2-} , HCO_3^-	-	76	9
Раствор CaO 6%	95	CO_3^{2-} , HCO_3^-	-	56	35
Раствор CaCl_2 6%	25	CO_3^{2-} , HCO_3^-	-	22	74
Шлам предочистки 6%	25	HCO_3^-	-	-	92

По результатам экспериментов видно, что лучшие результаты по улавливанию углекислого газа проявили растворы гидроксида натрия 6% и негашеной извести 6%.

Для определения погрешности экспериментов в качестве контрольного образца был использован аттестованный раствор. Анализ погрешности проводился на основе сравнения результатов отдельно взятой контрольной процедуры с нормативом контроля. Абсолютная погрешность составляет $P=0,95$.

Технологическая установка по улавливанию и утилизации двуокиси углерода

На основе полученных экспериментальных лабораторных исследований была разработана технологическая схема по улавливанию и утилизации углекислого газа.

(рисунок 7).

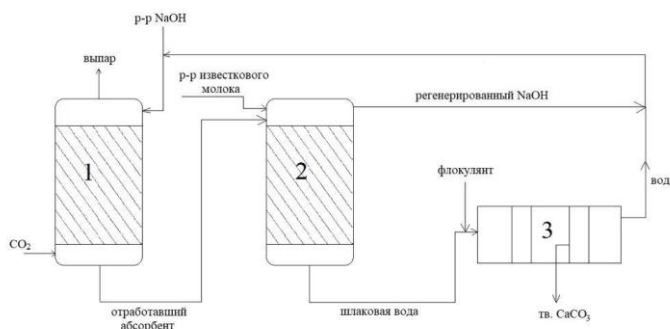


Рис. 7. Технологическая установка по улавливанию и утилизации углекислого газа. 1- абсорбер, 2- контактная емкость, 3- фильтр пресс.

Fig. 7. Carbon capture and recovery technology. 1- absorber, 2- contact container, 3- filter press.

Углекислый газ поступает в абсорбер 1, где взаимодействует с раствором гидроксида натрия 6%, который поступает через распределительное устройство сверху аппарата. Распределительное устройство необходимо для разбивания на мелкие капли, при таком разбрызгивании контакт между газовой и жидкой фазой протекает более полно. Отработавший абсорбент для регенерации поступает в контактную емкость 2, где происходит смешивание с раствором известкового молока. В результате реакции образуется твердая фаза в виде карбоната кальция, который выпадает и удаляется с нижней части аппарата в виде шламовой воды. В шламовую воду перед фильтром-прессом 3 дозируется флокулянт на основе полиакриламида для улучшения отделения твердой фазы от водной среды и сокращения времени обезвоживания шлама. Регенерированный раствор гидроксида натрия после контактной емкости 2 смешивается с оставшейся водой после обезвоживания шлама и поступает заново в абсорбер 1. Таким образом, цикл получается замкнутый. Такая технология позволяет улавливать и утилизировать углекислого газа. Оставшийся обезвоженный шлам может использоваться в строительной сфере.

Выводы

Развитие водородной энергетики играет важную роль в отказе от использования углеводородных видов топлива. Поэтому рациональное использование водородного топлива масштабная задача для всего общества. На сегодняшний день разработанные технологии с использованием твердооксидного топливного элемента имеют выбросы углекислого газа. Поэтому CO_2 необходимо улавливать и утилизировать. Наиболее перспективны в улавливании газа сорбционные установки. Чаще всего предпочтение отдается абсорбционным методам, где улавливание производится с применением жидкого абсорбента. Существует абсорбенты, которые могут быть эффективны в улавливании углекислого газа, но есть ряд ограничений по санкциям и ценовой политики. Поэтому были рассмотрены и апробированы доступные абсорбенты, которые есть почти на каждой тепловой электрической станции.

Экспериментальная часть заключалась в сборе установки для осуществления процесса абсорбции и определения эффективности выбранных абсорбентов. По экспериментальным результатам выявили, что наибольшей эффективностью обладает раствор гидроксида натрия и негашеной извести 6%. Определение эффективности улавливания проводилось по методике титрования.

На основе полученных данных была разработана технологическая схема улавливания и утилизации углекислого газа, где газ абсорбируется раствором гидроксида натрия. Отработавший абсорбент регенерируется раствором известкового молока и заново возвращается в цикл. В результате реакции регенерации образуется твердый отход в виде шлама, который обезвоживается на фильтре-пресс и дальше утилизируется.

Данная технология позволяет улавливать и утилизировать углекислого газа согласно направлению политики декарбонизации энергетики.

Литература

1. Kelemen Peter, Benson Sally M., Pilorgé Hélène, Psarras Peter, Wilcox Jennifer. An

Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geological Formations, *Frontiers in Climate Vol 1* (2019) DOI:10.3389/fclim.2019.00009.

2. Gonzalez-Diaz A., Jiang L., Roskilly AP., Smallbone A. J. The potential of decarbonising rice and wheat by incorporating carbon capture, utilisation and storage into fertiliser production. Issue 3, *Green Chemistry*, The Royal Society of Chemistry (2020) <http://dx.doi.org/10.1039/C9GC03746B>.

3. Praveen Bains, Peter Psarras, Jennifer Wilcox, CO₂ capture from the industry sector, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 63, 2017, Pages 146-172, ISSN 0360-1285, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.07.001>.

4. Лемпорт П.С., Бобрикова А.А., Дахнави Э.М. Способ очистки газовых потоков от диоксида углерода, патент № 2589166, 2014.

5. Шаронов В.Е., Окунев А.Г., Губарь А.В., Поглотитель диоксида углерода и способ удаления диоксида углерода из газовых смесей, патент № 2244586.

6. Бадал Г.П., Бадалян Г.П., Гридин И.Д. Способ очистки газовых смесей от диоксида углерода (варианты) и устройство для очистки газовых смесей от диоксида углерода (варианты), патент №2252063, 2004.

7. John G. McCullough, Joseph A. Faucher, Daniel J. Kubek, Alkanolamine gas treating composition and process, US4971718A.

8. Max Appl, Ulrich Wagner, Hans J. Henrici, Removal of CO₂ and/or H₂S and/or CO_s from gases containing these constituents, US4336233A.

9. Елисеев А.А., Петухов Д.И., Поярков А.А. Мембранный контактор для очистки природных и технологических газов от кислых компонентов, патент № 2672452, 2018.

10. Патент JP5753009B2, Imaging device, wireless system, 2011.

11. Кустов Л.М., Гусейнов Ф.И., Исаева В.И., Адсорбент для улавливания, концентрирования и хранения диоксида углерода, патент № 2576634, 2014.

12. ГОСТ 31957-2012, Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов.

13. Николаева Л.А., Хуснутдинов А.Н., Очистка газовых выбросов в химической технологии и энергетике карбонатным шламом // Казанский государственный энергетический университет, 2021, С.104.

14. Балабеков, О. С. Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппараты // Москва: Химия, 1991. С. 256.

15. Николаева Л.А., Хуснутдинова Э.М., Комбинированный адсорбер для очистки газовых выбросов от диоксида серы, патент № 206221, 2021.

16. Хуснутдинов А. Н. Очистка газовых выбросов предприятий химической промышленности карбонатным шламом //XXI Аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный «Дню энергетика» : материалы докладов. Казань : КГЭУ, 2017, С. 102.

17. Николаева Л.А. Адсорбционная очистка промышленных сточных вод модифицированным карбонатным шламом: специальность 03.02.08 Экология (по отраслям) : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук //Казанский государственный энергетический университет. – Казань, 2016. С. 267.

18 Акбалина З.Ф, Минигазимов Н.С., Белан Л.Н. Состояние проблемы обращения с промышленными отходами на предприятиях Республики Башкортостан // Уральский экологический вестник, 2015, № 1, С. 41–44.

19. Сучков, В. П. Способ утилизации шлама химводоподготовки ТЭЦ и отхода аккумуляторной кислоты // Известия высших учебных заведений. Строительство, 2008, № 9 (597), С. 30–32.

20. Романовский В.И., Федоренчик А. А., Гуринович А. Д., Проблемы утилизации отходов водоподготовки и очистки сточных вод в Беларуси // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2011. № 2 (68). С. 66–69.

Авторы публикации

Филимонова Антонина Андреевна – д-р. техн. наук, доцент кафедры «Химия и водородная энергетика», Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Власова Алена Юрьевна – кан. тех. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» (АТЭС), Казанский государственный энергетический

университет (КГЭУ).

Камалиева Рузина Фарсировна – студентка, бакалавриат 3 курс, кафедра «Атомные и тепловые электрические станции» Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

References

1. Kelemen Peter, Benson Sally M., Pilorgé Hélène, Psarras Peter, Wilcox Jennifer. An Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geological Formations, *Frontiers in Climate* Vol 1 (2019) doi:10.3389/fclim.2019.00009.
2. Gonzalez-Diaz A, Jiang L, Roskilly AP, et al. *The potential of decarbonising rice and wheat by incorporating carbon capture, utilisation and storage into fertiliser production*. Issue 3, Green Chemistry, The Royal Society of Chemistry (2020) <http://dx.doi.org/10.1039/C9GC03746B>.
3. Praveen Bains, Peter Psarras, Jennifer Wilcox, CO₂ capture from the industry sector, *Progress in Energy and Combustion Science*. 2017;63:146-172, ISSN 0360-1285, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.07.001>.
4. Lempert PS, Bobrikova AA, Dakhnavi EM. *Method for cleaning gas streams from carbon dioxide*. Patent No. 2589166, 2014.
5. Sharonov VE, Okunev AG, Gubar AV. *Carbon dioxide absorber and method for removing carbon dioxide from gas mixtures*. Patent No. 2244586.
6. Badal GP, Badalyan GP, Gridin ID. *A method for cleaning gas mixtures from carbon dioxide (variants) and a device for cleaning gas mixtures from carbon dioxide (variants)*. Patent No. 2252063, 2004.
7. John G. McCullough Joseph A. Faucher Daniel J. Kubek. *Alkanolamine gas treating composition and process*, US4971718A.
8. Max Appl Ulrich Wagner Hans J. Henrici, *Removal of CO₂ and/or H₂S and/or COS from gases containing these constituents*, US4336233A.
9. Eliseev AA, Petukhov DI, Poyarkov AA, *Membrane contactor for purification of natural and technological gases from acidic components*. Patent No. 2672452, 2018.
10. Patent JP5753009B2, *Imaging device, wireless system*, 2011.
11. Kustov LM, Huseynov FI, Isaeva VI. *Adsorbent for trapping, concentration and storage of carbon dioxide*. Patent No. 2576634, 2014.
12. GOST 31957-2012, *Methods for determining the alkalinity and mass concentration of carbonates and hydrocarbonates*.
13. Nikolaeva LA, Khusnutdinov AN. Purification of gas emissions in chemical technology and power engineering with carbonate sludge. *Kazan State Power Engineering University*, 2021, p.104.
14. Balabekov OS. Purification of gases in the chemical industry. *Processes and apparatuses*. Moscow: Khimiya, 1991. p. 256.
15. Nikolaeva LA, Khusnutdinova EM. *Combined adsorber for cleaning gas emissions from sulfur dioxide*. Patent No. 206221, 2021.
16. Khusnutdinov AN. *Purification of gas emissions of chemical industry enterprises with carbonate sludge*. XXI Postgraduate-master's scientific seminar dedicated to the Day of the power engineer : materials of reports. Kazan : KSEU, 2017, p. 102.
17. Nikolaeva LA. *Adsorption treatment of industrial wastewater with modified carbonate sludge*: specialty 03.02.08 Ecology (by industry) : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. *Kazan State Power Engineering University*. Kazan, 2016. p. 267.
18. Akbalina ZF, Minigazimov NS, Belan LN. *The state of the problem of industrial waste management at enterprises of the Republic of Bashkortostan*. *Ural Ecological Bulletin*, 2015;1:41-44.
19. Suchkov VP. Method of disposal of sludge of chemical water treatment of CHP and waste of battery acid. *News of higher educational institutions. Construction*, 2008;9 (597):30-32.
20. Romanovsky VI, Fedorenchik AA, Gurinovich A.D., Problems of waste disposal of water treatment and wastewater treatment in Belarus. *Bulletin of the Brest State Technical University. Water management construction, thermal power engineering and geoecology*. 2011;2(68):66-69.

Authors of the publication

Antonina A. Filimonova – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Hydrogen Energy of Kazan State Energy University (KGEU).

Alyona Yu. Vlasova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Nuclear and Thermal Power Plants" (APEC) of Kazan State Energy University (KGEU).

Ruzina F. Kamaliev – student, bachelor 3rd year, Department of Nuclear and Thermal Power Plants, Kazan State Energy University (KGEU).

Получено **21.11.2022г.**

Отредактировано **28.11.2022г.**

Принято **01.12.2022г.**