

## РАЗРАБОТКА АДСОРБЕНТА ИЗ ОТХОДОВ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ТЭС ДЛЯ УДАЛЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА<sup>1</sup>

© 2025 г. А. А. Филимонова<sup>а</sup>, А. Ю. Власова<sup>а</sup>\*, Н. Д. Чичирова<sup>а</sup>, Р. Ф. Камалиева<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Казанский государственный энергетический университет, Красносельская ул., д. 51, г. Казань, 420066 Россия

\*e-mail: vlasovaay@mail.ru

Поступила в редакцию 17.07.2024 г.

После доработки 11.09.2024 г.

Принята к публикации 25.09.2024 г.

На сегодняшний день снизить эмиссию вредных веществ в окружающую среду при эксплуатации промышленных предприятий можно с помощью очистки выбросов и модернизации действующего технологического оборудования. Обследование установок очистки показало, что более доступными и простыми являются сорбционные технологии. Адсорбция – эффективный физико-химический процесс улавливания углекислого газа. На современном рынке представлен большой ассортимент адсорбентов, которые могут быть использованы для улавливания вредных веществ, но, как правило, по соображениям экономической эффективности выгоднее применять вторичные ресурсы – отходы производства. На предприятиях энергетического сектора при выработке тепловой и электрической энергии образуются различные отходы. Так, при подготовке теплоносителя на установках водоочистки сточные воды после осветлителей и ионообменных фильтров могут быть утилизированы для создания сорбционного материала, способного улавливать диоксид углерода – один из основных парниковых газов. Получение адсорбентов из отходов водоподготовительных установок позволит сократить объемы шламонакопителей или совсем отказаться от их использования. Отходы предприятий являются вторичным сырьем и, как правило, в исходном виде уступают традиционным промышленным адсорбентам по значению показателя активности, характеризующего способность улавливать углекислый газ. Поэтому для получения высокой емкости поглощения отходы комбинируют и активируют. Представлен адсорбент, полученный из отходов водоподготовительных установок ТЭС. В качестве отходов были использованы стоки шламовых вод и отработанные регенерационные растворы после фильтра умягчения. Описаны компонентный состав адсорбента и способ его приготовления путем активации и подготовки отходов. Эффективность разработанного адсорбента была проверена на лабораторной установке. Приведены сравнительные результаты лабораторных исследований с наиболее часто используемыми адсорбентами. Представлены результаты определения прочности, пористости, коэффициента проницаемости и удельной площади поверхности исследуемых адсорбентов.

*Ключевые слова:* углекислый газ, отходы водоподготовительной установки, адсорбент, шламонакопитель, коэффициент проницаемости, активация, шламовые воды, регенерационные растворы

**DOI:** 10.56304/S0040363624700620

На предприятиях энергетического сектора сжигается углеводородное топливо, поэтому доля углекислого газа в выбросах ТЭС довольно большая. Чтобы уменьшить ее, разрабатываются технологии улавливания, в которых используются сорбционные материалы, содержащие пористые и твердые вещества, в том числе на основе кремнеземов и цеолитов. Потенциально они могут служить эффективной альтернативой аминовой

хемосорбции при селективном удалении углекислого газа [1–3].

Адсорбенты с химическим механизмом действия имеют развитую поверхность и обладают способностью образовывать прочные связи с поглощаемым веществом при химической реакции. Отличительные признаки таких адсорбентов – необратимость и специфичность реакций взаимодействия, их высокий тепловой эффект, мономолекулярная хемосорбция [4].

Одним из главных преимуществ применения твердых адсорбентов с физическим механизмом действия является их способность избирательно

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки “Изучение процессов в гибридной энергетической установке топливный элемент – газовая турбина” (шифр проекта FZSW-2022-0001 от 30.08.2022).

адсорбировать  $\text{CO}_2$  без образования химической связи, что ведет к значительному сокращению энергии, требуемой для процесса десорбции углекислого газа с поверхности адсорбента. Также при использовании природных твердых адсорбентов экологические риски снижаются [5].

Углекислый газ может адсорбироваться в порах твердых материалов за счет сил межмолекулярного взаимодействия и большого квадрупольного момента [6], поэтому в углеродном адсорбенте наблюдается выраженная зависимость адсорбционной емкости по углекислому газу от количества кислородсодержащих функциональных групп. Чем выше плотность активных центров, тем больше количество адсорбированного газа. Но природа адсорбционных сил может быть различна. Помимо сил межмолекулярного взаимодействия существуют и валентные силы, вызывающие образование поверхностных химических соединений. Также стоит учитывать существование промежуточных вариантов между физической и химической адсорбцией. Большое значение при адсорбции имеет форма поверхности раздела фаз: если она плоская, вещество поглощается непосредственно на поверхности, если слабо или сильно искривленная — то в порах адсорбента [7].

Разработка и получение пористых материалов, которые способны улавливать углекислый газ в присутствии дымовых газов, — весьма актуальная область исследований. Но еще более перспективная задача — определить, какие отходы предприятий энергетического сектора обладают свойствами физических и химических адсорбентов и могут быть использованы в качестве основных сырьевых материалов для их изготовления. При организации на водоподготовительных установках (ВПУ) традиционного умягчения к стокам после ионообменных фильтров добавляются сточные воды после аппаратов предварительной подготовки. В данной работе наибольшее внимание авторов уделено шламовым стокам и отработанным регенерационным растворам Na-катионитного фильтра.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

На сегодняшний день существуют различные способы улавливания углекислого газа: физическая абсорбция, хемосорбция, адсорбция, каталитическое гидрирование, мембранные технологии разделения, электрохимическое извлечение и использование ферментов. Абсорбция углекислого газа водой — весьма интересный метод для промышленной реализации, имеющий, однако, два серьезных недостатка: низкая емкость поглощения и недостаточная чистота выделяемого газа [8].

Для улавливания углекислого газа применяются биотехнологии, в которых используются

микроводоросли и цианобактерии, фототрофные зеленые бактерии, водородокисляющие бактерии, карбоксидобактерии и метаногенные археи. Недостаток таких технологий — для очистки дымовых газов, имеющих температуру  $100\text{--}200^\circ\text{C}$ , требуется предварительное их охлаждение, которое сложно осуществить в промышленном масштабе [9].

Адсорбционные способы очистки наиболее подходят и приемлемы для промышленных предприятий. В качестве твердых адсорбентов широко используются цеолиты, относящиеся к классу твердых пористых алюмосиликатов. Природные цеолиты обладают высокой адсорбционной емкостью по углекислому газу ( $0.9\text{--}1.4$  ммоль/г) и способностью к регенерации в процессе последующей переработки, что значительно увеличивает срок их службы и обуславливает более высокую эффективность по сравнению с активированным углем [10]. Цеолиты способны улавливать углекислый газ даже при его низкой концентрации благодаря химическому составу, природе внекаркасных катионов и размеру зерен [11].

В [12] приведены результаты исследований на опытно-промышленной установке цеолитного сорбента, обладающего более высокой динамической емкостью по сравнению с синтетическим цеолитом NaX.

В патенте [13] предложен адсорбент, в состав которого вошли кристаллы цеолита А небольших размеров с низкими основностью и кислотностью, содержащие кальциевые агломерированные глины, железо. Данный сорбент обладает высокой динамической емкостью и органической каталитической активностью при образовании монооксида углерода.

Один из главных недостатков применения цеолитов в качестве твердых адсорбентов — влияние температуры и парциального давления адсорбата на поглощающую способность [14]. Стоит также отметить особую чувствительность цеолитов к водяному пару, значительно снижающую их селективность, что ограничивает их использование в области газоочистки [15].

Для газоочистки в промышленном масштабе применяются твердые адсорбенты на основе щелочных и щелочно-земельных металлов, обладающие способностью обратимого улавливания углекислого газа. Особое внимание уделяется адсорбенту на базе оксида кальция вследствие его высокой селективности по отношению к диоксиду углерода, возможности быстрой карбонизации и регенерации, а также относительно низкой стоимости. Сорбенты на основе CaO имеют хорошую сорбционную емкость по углекислому газу [42–62% (по массе)], которая остается стабильной в течении 20 циклов сорбции и десорбции [16–21]. В процессе поглощения углекислого

газа и дальнейшей регенерации производительность данных немодифицированных адсорбентов будет значительно снижаться в результате уменьшения объема пор при спекании частиц. Устойчивость к спеканию может быть достигнута путем добавления в состав адсорбента огнеупорных материалов (оксидов алюминия, магния и циркония) [17–19].

В литературных источниках рассматривается также применение твердых адсорбентов на основе MgO, обладающих максимальным поглощением CO<sub>2</sub>, которое может достигать 110% (по массе) [22–24]. Однако в процессе улавливания углекислого газа происходит образование карбоната магния MgCO<sub>3</sub>, непроницаемый слой которого иммобилизует активный оксид магния MgO, что при практическом применении адсорбента приводит к значительному снижению сорбционной емкости – вплоть до 10% (по массе) [25]. В настоящее время большая часть исследований по разработке адсорбента на базе оксида магния посвящена улучшению его поглощательной способности за счет физико-химических модификаций, в частности использования нитратов щелочных металлов [26–28].

Адсорбенты на основе углеродных материалов благодаря своей термической стабильности и высокой адсорбционной емкости широко распространены в области газоочистки. В последние годы большое внимание уделяется утилизации золы-уноса, в том числе использованию ее в качестве предшественников недорогих и эффективных адсорбентов CO<sub>2</sub>. Главными компонентами золы-уноса угольных электростанций являются SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с различным содержанием углерода, кальция, магния и серы [29]. Для улучшения улавливания углекислого газа возможны обработка и пропитка сорбентов на базе золы-уноса метилдиэтаноломином, диэтаноломином, моноэтаноломином или другими аммиачными соединениями, однако это приводит к увеличению эксплуатационных затрат [30–32].

При подготовке питательной и добавочной воды на электростанциях образующийся шлам ВПУ направляют на шламоотвал. Химический состав шлама варьируется в зависимости от применяемого коагулянта. Известны различные методы повторного использования шлама и его коммерциализации. В недавних исследованиях было предложено применять шлам ВПУ при получении адсорбентов для улавливания углекислого газа при невысоких температурах [29].

Если провести анализ результатов научных исследований, представленных в литературных источниках, можно сделать вывод, что направление использования отходов предприятий для производства эффективных адсорбентов для очистки газовых сред развито слабо. Поэтому целью дан-

ного исследования являлась разработка многокомпонентного адсорбента, в состав которого входят преимущественно отходы водоочистной установки ТЭС.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Апробирование эффективности сорбционных материалов проводили на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 1. В трехгорлой колбе-реакторе проходила химическая реакция взаимодействия углекислого натрия с раствором соляной кислоты, поступающей из капельной системы. Газовая смесь, состоявшая из углекислого газа, образовавшегося в результате химической реакции, и воздуха, подаваемого в колбу-реактор компрессором, затем направлялась в адсорбер, заполненный сорбционным материалом. На выходе из адсорбера устанавливалась колба с поглощающим (принимающим) раствором (гидроксидом натрия) концентрацией 0.01 моль-экв/дм<sup>3</sup>, который окрашивали в розовый цвет индикатором фенолфталеином. Полное обесцвечивание раствора свидетельствовало о прохождении реакции нейтрализации щелочи кислотой и наступлении конечной точки титрования.

Перед началом эксперимента был проведен холостой опыт без загрузки адсорбера сорбционным материалом. Принимающий раствор уловил 60% углекислого газа, расхождение результатов трех последующих измерений составило ±1%.

Для разработки адсорбента в качестве активных компонентов использовали отходы водоподготовительной установки, работающей на тепловой электростанции по схеме: предварительная очистка в осветлителе (коагуляция, известкование) – Na-катионирование. Состав шламовых

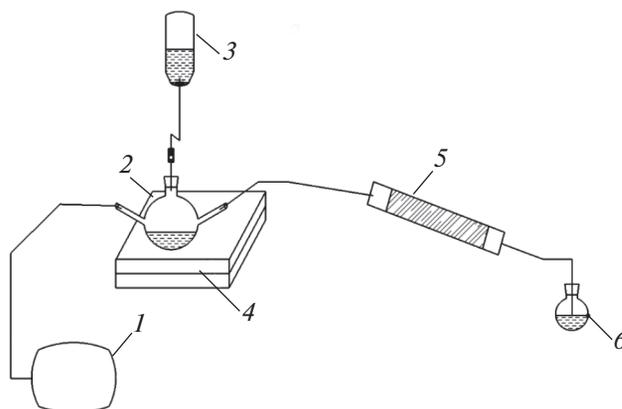


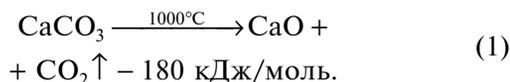
Рис. 1. Лабораторная установка для определения сорбционной эффективности.

1 – компрессор; 2 – трехгорлая колба-реактор; 3 – капельная система с соляной кислотой; 4 – магнитная мешалка; 5 – адсорбер; 6 – колба с поглощающим раствором

вод зависит от качества исходной (природной) воды, а также от концентрации химических реагентов, дозируемых в осветлитель (коагулянта, флокулянта, известкового молока). Согласно [33] шлам водоподготовки более чем на 80% состоит из карбоната кальция, оставшаяся часть — это гидроксиды магния, сульфаты кальция и магния, коагулянт и скоагулировавшиеся взвешенные вещества.

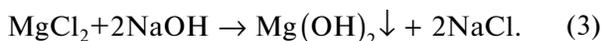
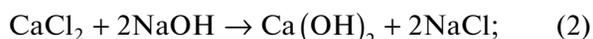
Следующим активным компонентом являются отработанные регенерационные растворы Na-катионитных фильтров, состоящие преимущественно из хлоридов кальция и магния. Данные стоки необходимо сконцентрировать до получения насыщенного раствора.

Перед использованием шлама в качестве активного компонента проводили его активацию (обезвоживание, прокаливание, получение натронной извести). Обезвоженный шлам прокаливали в течение 3 ч при температуре 1000°C, нагрев и остывание осуществляли при равномерном изменении температуры. Так как большую часть шлама составляет карбонат кальция, то при нагревании (более 840°C) происходит его разложение с выделением углекислого газа и оксида кальция (негашеная известь):



После предварительной обработки в активированный шлам добавляли сухую натриевую щелочь в соотношении 83/17 и дистиллированную воду. Смесь разогревали, и после остывания активированный шлам можно было использовать в качестве активного компонента.

На следующем этапе насыщенный раствор отработанных стоков после установки умягчения концентрацией 42% (по массе) смешивали с гидроксидом натрия концентрацией 16% (по массе) до загустения с образованием кальциевых и магниевых оснований:



Далее к полученной массе при тщательном перемешивании добавляли метасиликат натрия концентрацией 17% (по массе), который повышает прочностные характеристики полученного адсорбента. После этого смешивали все компоненты (натронную известь из шлама, гидроксиды кальция и магния из отработанных регенерационных растворов, метасиликат натрия) в соотношении 21/65/14, смесь перемешивали до образования однородной массы, помешали в формы (молды) и высушивали при температуре 110°C в течение 2 ч. Фотоснимок полученного адсорбента представлен на рис. 2.

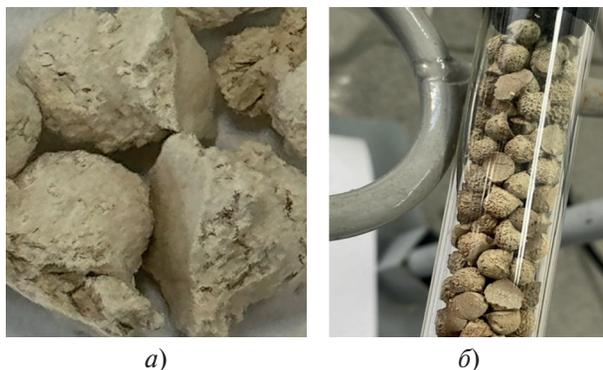


Рис. 2. Фотоснимки гранул адсорбента при 25-кратном увеличении (а) и лабораторного адсорбера (б)



Рис. 3. Фотоснимок частиц прокаленной бентонитовой глины

Чтобы сравнить по эффективности разработанный состав с другими часто используемыми в промышленном масштабе адсорбентами, были апробированы в равных условиях цеолит синтетический NaX, химический поглотитель известковый ХП-И, бентонитовая глина, прокаленная при температуре 400°C. Состав на основе бентонитовой глины был подготовлен путем смешивания ее с водой с последующим прокаливанием. В процессе прокаливания глины были получены твердые, умеренно пористые частицы сложной формы (рис. 3).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В таблице представлены результаты исследования свойств адсорбентов. Определение прочности на истирание проводили в соответствии с [34]. Пористость, проницаемость и удельную площадь поверхности исследовали с помощью порозиметра и установки, принцип действия которой основан на измерении давления на входе в нее и выходе из нее и контроле расхода воздуха и времени эксперимента.

## Характеристики сорбционных материалов

Адсорбент	$a$ , мг/г	$G$ , %	$\Pi$ , %	$k \times 10^9$ , м <sup>2</sup>	$f$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>
Синтетический цеолит NaX	34.1	1	31	2.55	3294
Разработанный сорбент из отходов ВПУ	75.6	17	15	1.21	1552
Прокаленная бентонитовая глина	68.3	25	19	1.65	1874
Химический поглотитель известковый	44.7	0.2	14	2.05	1047

Примечание.  $a$  – удельная адсорбция;  $G$  – истираемость;  $\Pi$  – пористость;  $k$  – коэффициент проницаемости;  $f$  – удельная площадь поверхности.

Согласно результатам исследований удельная адсорбция углекислого газа выше у состава, полученного из отходов ВПУ (75.6 мг CO<sub>2</sub>/г сорбента), т.е. на 55% больше, чем у синтетического цеолита NaX, который в рамках эксперимента показал наихудший результат.

Для физической адсорбции большое значение имеет пористость. Чем выше пористость и меньше размер пор, тем больше удельная площадь поверхности адсорбента. С увеличением пористости возрастает число узких микропор. Удельная площадь поверхности адсорбентов также зависит от проницаемости. По полученным результатам удельная площадь поверхности разработанного сорбента из отходов ВПУ больше, чем у известкового химического поглотителя, но значительно меньше, чем у синтетического цеолита.

Таким образом, согласно результатам лабораторных экспериментальных исследований можно рассматривать разработанный состав из отходов ВПУ как адсорбент с высокой поглощающей способностью по углекислому газу, обладающий одновременно химическим и физическим механизмами взаимодействия с адсорбатом.

Химическое взаимодействие происходит благодаря присутствию в составе адсорбента активных компонентов шлама, полученных после прокалывания оксида кальция, оксидов других металлов (железа, алюминия), а также продуктов реакции взаимодействия отработанных регенерационных растворов Na-катионитных фильтров с гидроксидом натрия. Механизм физической адсорбции связан с наличием пор в разработанном адсорбенте из-за присутствия метасиликата натрия и глинистых компонентов шлама.

Удаление углекислого газа из выбросов промышленных предприятий с помощью разработанного адсорбента дает хороший экологический эффект благодаря сокращению объема отходов, направляемых на захоронение, и возможности утилизировать углекислый газ.

## ВЫВОДЫ

1. В результате лабораторных исследований образцов адсорбентов выявлено, что наибольшей улавливающей способностью по углекислому га-

зу и оптимальными физическими характеристиками обладает состав, который представляет собой смесь натронной извести из шлама ВПУ (21%), гидроксида натрия и отработанных регенерационных растворов Na-катионитных фильтров (65%), метасиликата натрия (14%).

2. Разработанный многокомпонентный адсорбент обладает высокой удельной поглощающей способностью (75.6 мг CO<sub>2</sub>/г) при удельной площади поверхности 1552 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Адсорбент является экологически безопасным, а его производство позволит использовать шлам для очистки дымовых газов от оксида углерода и уменьшить тем самым объемы шламонакопителей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Очистка** водородсодержащих отходов нефтеперерабатывающих производств от углекислого газа адсорбционным способом / А.А. Филимонова, А.Ю. Власова, Н.Д. Чичирова, Р.Ф. Камалиева // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 6. С. 30–34.
2. **Способы** очистки газообразных отходов нефтехимического производства от углекислого газа для использования в твердооксидных топливных элементах / А.А. Филимонова, А.А. Чичириков, А.Ю. Власова, Р.Ф. Камалиева // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер.: Техника и технологии. 2023. Т. 16. № 8. С. 944–955.
3. **Lu A.-H., Hao G.-P.** Porous materials for carbon dioxide capture. Annual Reports on the Progress of Chemistry, Section A // Inorg. Chem. 2013. V. 109. P. 484–503. <https://doi.org/10.1039/c3ic90003g>
4. **Физико-химические** и электрохимические методы защиты среды обитания / Н.Д. Письменская, С.А. Мареев, Д.Ю. Бутыльский, В.В. Никоненко. Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2019.
5. **NETL.** Cost and performance baseline for fossil energy plants // Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity. 2015. V. 1.
6. **Carbon dioxide capture in metal-organic frameworks** / K. Sumida, D.L. Rogow, J.A. Mason, T.M. McDonald, E.D. Bloch, Z.R. Herm, T.H. Bae, J.R. Long // Chem. Rev. 2012. V. 112. Is. 2. P. 724–781. <https://doi.org/10.1021/cr2003272>
7. **Никифоров И.А.** Адсорбционные методы в экологии. Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2011.

8. **Ахметова В.Р., Смирнов О.В.** Улавливание и хранение диоксида углерода – проблемы и перспективы // Башкир. хим. журн. 2020. Т. 27. № 3. С 103–115.
9. **Глазунова Д.М., Галицкая П.Ю., Селивановская С.Ю.** Секвестрация углерода атмосферы с использованием микроводорослей // Уч. зап. Казан. унта. Сер.: Естественные науки. 2024. Т. 166. № 1. С. 82–125.
10. **Su H., Cui L.** Research on absorption method and mechanism of carbon dioxide // J. Environ. Sci. Manage. 2006. V. 31. P. 79–81.
11. **CO<sub>2</sub>** adsorption capacities in zeolites and layered double hydroxide materials / C. Megías-Sayago, R. Bingre, L. Huang, G. Lutzweiler, Q. Wang, B. Louis // Front. Chem. 2019. V. 7. P. 551.  
<https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00551>
12. **Пат. RU1211216.** Способ получения цеолитного сорбента для очистки воздуха от углекислого газа / Ф.М. Бобонич, В.Г. Ильин, Н.В. Турутина, Я.В. Маслякевич, Л.В. Максимова, С.С. Петухов, Ю.П. Блазнин. Оpubл. 15.02.1986.
13. **Пат. RU12127631.** Цеолитовый адсорбент для обесщелачивания газов и его применение для обработки газов, содержащих CO<sub>2</sub> / А.М. Цыбулевский, В.И. Мушин, Д. Плэ, Ф. Майоле. Оpubл. 20.05.1999.
14. **Sharma U., Tyagi B., Jasra R.V.** Synthesis and characterization of Mg–Al–CO<sub>3</sub> layered double hydroxide for CO<sub>2</sub> adsorption // Ind. Eng. Chem. Res. 2008. V. 47. P. 9588–9595.  
<https://doi.org/10.1021/ie800365t>
15. **Sircar S., Golden T.C., Rao M.B.** Activated carbon for gas separation and storage // Carbon. 1996. V. 34. P. 1–12.  
[https://doi.org/10.1016/0008-6223\(95\)00128-x](https://doi.org/10.1016/0008-6223(95)00128-x)
16. **Hashem S.M., Karami D., Mahinpey N.** Solution combustion synthesis of zirconia-stabilized calcium oxide sorbents for CO<sub>2</sub> capture // Fuel. 2020. V. 269. P. 117432.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117432>
17. **Influence** of morphology, porosity and crystal structure of CaCO<sub>3</sub> precursors on the CO<sub>2</sub> capture performance of CaO-derived sorbents / M. Olivares-Marín, E.M. Cuerda-Correa, A. Nieto Sánchez, S. García, C. Pevida, S. Román // Chem. Eng. J. 2013. V. 217. P. 71–81.  
<https://doi.org/10.1021/ef700751g>
18. **CO<sub>2</sub>** sorbents derived from capsule-connected Ca–Al hydrotalcite-like via low-saturated coprecipitation / X. Kou, C. Li, Y. Zhao, S. Wang, X. Ma // Fuel Process. Technol. 2018. V. 177. P. 210–218.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.04.036>
19. **Yoon H.J., Lee K.B.** Introduction of chemically bonded zirconium oxide in CaO-based high-temperature CO<sub>2</sub> sorbents for enhanced cyclic sorption // Chem. Eng. J. 2019. V. 355. P. 850–857.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.148>
20. **CO<sub>2</sub>** capture by a novel CaO/MgO sorbent fabricated from industrial waste and dolomite under calcium looping conditions / X. Yan, Y. Li, X. Ma, J. Zhao, Z. Wang, H. Liu // New J. Chem. 2019. V. 43. P. 5116–5125.  
<https://doi.org/10.1039/C8NJ06257A>
21. **Pore** structure modified CaO-based sorbents with different sized templates for CO<sub>2</sub> capture / S. Wei, R. Han, Y. Su, J. Gao, G. Zhao, Y. Qin // Energy Fuels. 2019. V. 33. P. 5398–5407.  
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00747>
22. **Progress** in MgO sorbents for cyclic CO<sub>2</sub> capture: A comprehensive review / Y. Hu, Y. Guo, J. Sun, H. Li, W. Liu // J. Mater. Chem. 2019. V. 7. P. 20103–20120.  
<https://doi.org/10.1039/C9TA06930E>
23. **CO<sub>2</sub>** capture and regeneration properties of MgO-based sorbents promoted with alkali metal nitrates at high pressure for the sorption enhanced water gas shift process / B.W. Hwang, J.H. Lim, H.J. Chae, H.J. Ryu, D. Lee, J.B. Lee, H. Kim, S.C. Lee, J.C. Kim // Process Saf. Environ. Prot. 2018. V. 116. P. 219–227.  
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.02.008>
24. **Mesoporous** MgO promoted with NaNO<sub>3</sub>/NaNO<sub>2</sub> for rapid and high-capacity CO<sub>2</sub> capture at moderate temperatures / X. Zhao, G. Ji, W. Liu, X. He, E.J. Anthony, M. Zhao // Chem. Eng. J. 2017. V. 332. P. 216–226.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.068>
25. **Твердые** сорбенты для улавливания диоксида углерода после сжигания топлива. Краткий обзор / Г. Ергазиева, К. Досумов, Н. Макаева, М. Анисова, М. Мамбетова, Н. Худайбергенов, Б. Серкебаев, А. Кабылбек, Е. Акказин // Горение и плазмохимия. 2023. Т. 21. С. 29–43.
26. **Structure-performance** relationships of magnesium-based CO<sub>2</sub> adsorbents prepared with different methods / Y. Guo, C. Tan, P. Wang, J. Sun, W. Li, C. Zhao, P. Lu // Chem. Eng. J. 2019. V. 379. P. 122277.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122277>
27. **Synthesizing** MgO with a high specific surface for carbon dioxide adsorption / Y.D. Ding, G. Song, X. Zhu, R. Chen, Q. Liao // RSC Adv. 2015. V. 5. P. 30929–30935.  
<https://doi.org/10.1039/C4RA15127E>
28. **Hanif A., Dasgupta S., Nanoti A.** Facile synthesis of high-surface-area mesoporous MgO with excellent high-temperature CO<sub>2</sub> adsorption potential // Ind. Eng. Chem. Res. 2016. V. 55. P. 8070–8078.  
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00647>
29. **Olivares-Marín M., Maroto-Valer M.** Development of adsorbents for CO<sub>2</sub> capture from waste materials: A review // Greenhouse Gases: Sci. Technol. 2012. V. 2. Is. 1. P. 20–35.  
<https://doi.org/10.1002/ghg.45>
30. **Chapel D.G., Mariz C.L., Ernest J.** Recovery of CO<sub>2</sub> from flue gases: commercial trends // The 1st National Conf. on Carbon Sequestration. NETL Publications. 2001.
31. **Methanol** synthesis from flue-gas CO<sub>2</sub> and renewable electricity: A feasibility study / D. Mignard, M. Sahibzada, J.M. Duthie, H.W. Whittington // Int. J. Hydrogen Energy. 2003. V. 28. No. 4. P. 455–464.  
[https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00082-4)
32. **Industrial** wastes derived solid adsorbents for CO<sub>2</sub> capture: A mini review / A. Kaithwas, M. Prasad, A. Kulshreshtha, S. Verma // Chem. Eng. Res. Des. 2012. V. 90. Is. 10. P. 1632–1641.  
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.02.011>
33. **Филимонова А.А.** Научно-технологическое обеспечение ресурсосбережения системы водопользования для индустриально-энергетического комплекса Республики Татарстан: дис. ... докт. техн. наук. Казань: КГУУ, 2022.
34. **ГОСТ 6555-88.** Поглотитель химический известковый ХП-И. М.: Стандартинформ, 1988.

## Development of Adsorbent out of Waste from a Thermal Power Plant's Water-Treatment Plant for Removal of Carbon Dioxide

A. A. Filimonova<sup>a</sup>, A. Yu. Vlasova<sup>a, \*</sup>, N. D. Chichirova<sup>a</sup>, and R. F. Kamaliev<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, 420066 Russia

\*e-mail: vlasovaay@mail.ru

**Abstract**—It is possible at present to reduce the emission of harmful substances into the environment during the operation of industrial enterprises by cleaning emissions and modernizing existing technological equipment. A survey of purification plants showed that sorption technologies are more accessible and simpler. Adsorption is an effective physical and chemical process for capturing carbon dioxide. The modern market offers a wide range of adsorbents that can be used to capture harmful substances, but, as a rule, for reasons of economic efficiency, it is more profitable to use secondary resources: production waste. At energy sector enterprises, various wastes are generated during the generation of thermal and electrical energy. Thus, when preparing a heat carrier at water-treatment plants, wastewater after clarifiers and ion exchange filters can be utilized to create a sorption material capable of capturing carbon dioxide, one of the main greenhouse gases. Obtaining adsorbents from waste from water-treatment plants will reduce the volume of sludge-storage facilities or eliminate their use altogether. Industrial waste is a secondary raw material and, as a rule, is inferior in its original form to traditional industrial adsorbents in terms of the activity indicator, which characterizes the ability to capture carbon dioxide. Therefore, to obtain high absorption capacity, waste is combined and activated. An adsorbent obtained from waste from water-treatment plants of thermal power plants is presented. The waste used was sludge water discharges and spent regeneration solutions after the softening filter. The component composition of the adsorbent and the method of its preparation by activation and preparation of waste are described. The efficiency of the developed adsorbent was tested on a laboratory setup. Comparative results of laboratory studies with the most frequently used adsorbents are presented. The results of determining the strength, porosity, permeability coefficient, and specific surface area of the studied adsorbents are presented.

*Keywords:* carbon dioxide, waste from water-treatment plant, adsorbent, sludge collector, permeability coefficient, activation, sludge water, regeneration solutions