

Научная статья
УДК 622.7. 502/504
DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-3-56-65

Использование природных цеолитов для снижения вредных выбросов при сжигании углей

Константин Константинович Размахнин¹, Алиса Николаевна Хатькова²,
Лидия Владимировна Шумилова³, Татьяна Сергеевна Номоконова⁴

^{1,2,3,4}Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

¹constantin-const@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2944-7642>,

²alisa1965.65@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>,

³shumilovalv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>,

⁴krutikova_1995@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-9096-864X>

Информация о статье

Статья поступила
в редакцию 28.06.2023

Одобрена после
рецензирования 07.08.2023

Принята к публикации
10.08.2023

Ключевые слова:

природные цеолиты, угли,
сжигание, газовоздушные
выбросы, отходящие газы,
диоксид серы, газовая
смесь, сорбционная
колонна, газоочистка,
моделирование,
аппаратурная реализация,
устройство

В статье представлены результаты исследований по изучению возможности применения природных цеолитов Забайкалья для очистки отходящих дымовых газов котельных и теплоэлектростанций горнопромышленных предприятий от диоксида серы и окислов азота, оказывающих существенное негативное воздействие на окружающую среду. Цель исследований – оценка возможности эффективной газоочистки отходящих дымовых газов от диоксида серы сорбционным методом. Объект исследований – газовоздушные смеси, содержащие диоксид серы и окислы азота. Предмет исследований – технологии и природные цеолиты, обеспечивающие газоочистку. Определены основные задачи исследований, исследованы сорбционные свойства природных цеолитов Забайкалья при газоочистке от диоксида серы. Приведены результаты экспериментов по изучению поглощения диоксида серы природными цеолитами. Разработана схема лабораторной установки для проведения исследований по газоочистке. Выполнено моделирование установки промышленного типа для очистки отходящих дымовых газов от диоксида серы. Установлены основные параметры процесса газоочистки. Предложена схема газоочистки от диоксида серы. Рекомендовано устройство для очистки отходящих дымовых газов котельных и теплоэлектростанций горнопромышленных предприятий от диоксида серы и окислов азота, основанное на применении в качестве адсорбентов природных цеолитов. Установлена эффективность применения природных цеолитов Забайкалья для очистки отходящих дымовых газов котельных и ТЭС горнопромышленных предприятий от сероводорода, меркаптана и сернистого ангидрида, обусловленная достаточно высоким показателем сорбционной емкости цеолитов по сернистым соединениям (не менее 16 % масс.). Определено, что модификация растворами железа и марганца в значительной степени повышает сорбционную способность цеолитов.

Благодарность: Работа выполнена в рамках реализации проекта РНФ 22-17-00040 «Научное обоснование и разработка экологически чистых безотходных технологий переработки природного и техногенного минерального сырья» (2022–2023 гг.).

Original article

The use of Natural Zeolites to Reduce Harmful Emissions from Coal Combustion

Konstantin K. Razmakhnin¹, Alisa N. Khatkova²,
Lidia V. Shumilova³, Tatyana S. Nomokonova⁴

^{1,2,3,4}Transbaikal State University, Chita, Russia

¹constantin-const@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2944-7642>,

²alisa1965.65@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>,

³shumilovalv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>,

⁴krutikova_1995@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-9096-864X>

Information about the article

Received 28 June, 2023

Approved after review
7 August, 2023

Accepted for publication
10 August, 2023

Keywords:

natural zeolites, coals,
combustion, gas-air
emissions, exhaust gases,
sulfur dioxide, gas mixture,
sorption column, gas
cleaning, modeling, hardware
implementation, device

The article presents the results of the research on the study of the possibility of using natural zeolites of Transbaikalia for cleaning flue gases from boilers and thermal power plants of mining enterprises from sulfur dioxide and nitrogen oxides, which have a significant negative impact on the environment. The purpose of the research is to assess the possibility of effective gas cleaning of flue gases from sulfur dioxide by the sorption method. The object of the research is gas-air mixtures containing sulfur dioxide and nitrogen oxides. The subject of the research is technologies and natural zeolites that provide gas cleaning. The main tasks of the research are determined, the sorption properties of natural zeolites of Transbaikalia during gas purification from sulfur dioxide are studied. The results of experiments on studying the absorption of sulfur dioxide by natural zeolites are presented. A scheme of a laboratory installation for conducting research on gas cleaning has been developed. Modeling of an industrial-type plant for the purification of flue gases from sulfur dioxide has been carried out. The main parameters of the gas cleaning process have been established. A scheme for gas purification from sulfur dioxide is proposed. A device is recommended for cleaning flue gases from boilers and thermal power plants of mining enterprises from sulfur dioxide and nitrogen oxides, based on the use of natural zeolites as adsorbents. The effectiveness of the use of natural zeolites of Transbaikalia for the purification of exhaust flue gases from boiler houses and thermal power plants of mining enterprises from hydrogen sulfide, mercaptan and sulfurous anhydride, due to a rather high sorption capacity of zeolites for sulfur compounds (at least 16 wt %), has been established. It has been determined that modification with solutions of iron and manganese significantly increases the sorption capacity of zeolites.

Acknowledgment: The work was carried out as part of the implementation of the RSF project 22-17-00040 "Scientific justification and de-velopment of environmentally friendly waste-free technologies for processing natural and technogenic mineral raw materials" (2022–2023).

Введение. Промышленные выбросы котельных и теплоэлектростанций предприятий горнодобывающего и горноперерабатывающего секторов экономики характеризуются высоким содержанием сернистых газов [1]. При этом одной из важнейших природоохранных задач является газоочистка от диоксида серы (SO₂) [1; 6].

В настоящее время атмосферный воздух характеризуется постоянным присутствием таких газов, как окислы азота, двуокись серы, озон, водород и метан. Среднее содержание данных газов в воздухе приведено в табл. 1 [8].

Необходимо отметить, что традиционные методы охраны окружающей среды, в том числе путём нейтрализации диоксида серы с помощью щелочных агентов, представляют собой достаточно трудоёмкий, дорогостоящий и сложнореализуемый в аппаратурном

оформлении процесс [3; 10]. В этой связи требуется разработка эффективных технологий и поиск доступных и дешевых материалов для газоочистки и обеспечения соответствия выбросов отходящих газов котельных и теплоэлектростанций (ТЭС) нормам предельно-допустимых концентраций.

Таблица 1 / Table 1

Среднее содержание газов в атмосферном воздухе /
Average content of gases in atmospheric air

Газ / Gas	Содержание, % (объём.) / Content, % (vol.)
Метан / Methane	1,5 x 10 ⁻⁴
Оксид углерода / Carbon monoxide	6,0 x 10 ⁻⁶ – 4,0 x 10 ⁻⁴
Двуокись серы / Sulfur dioxide	1,0 x 10 ⁻⁴
Закись азота / Nitrous oxide	5,0 x 10 ⁻⁵

Окончание табл. 1 / End the table 1

Газ / Gas	Содержание, % (объём.) / Content, % (vol.)
Озон / Ozone	$1,0 \times 10^{-6} - 1,0 \times 10^{-5}$
Двуокись азота / Nitrogen dioxide	$5,0 \times 10^{-8} - 2,0 \times 10^{-5}$
Оксид азота / Nitric oxide	Следы
Водяной пар / Water vapor	От следов до 4,0

Актуальность темы исследования. Загрязнение атмосферы предприятиями топливно-энергетического сектора и горной промышленности выбросами сернистого ангидрида относится к числу наиболее актуальных экологических проблем [2; 3; 11]. Вместе с тем, систематически происходит ужесточение экологических требований относительно норм выбросов загрязняющих веществ, что является следствием необходимости использования дорогостоящих и достаточно сложных в обслуживании многоступенчатых систем очистки отходящих газов [4; 12]. Данные обстоятельства в совокупности со стремлением промышленных предприятий обеспечить требуемую эффективность газоочистки определяет целесообразность внедрения технологий, основанных на применении высококачественных сорбентов, в частности, природных цеолитов, характеризующихся своей доступностью и способностью к регенерации. Природные цеолиты обладают уникальными сорбционными свойствами и могут быть эффективно использованы в технологиях газоочистки от таких соединений как диоксид серы, меркаптан и сероводород [5; 13].

Следует отметить, что на территории Забайкальского края сосредоточено около 70 % запасов природных цеолитов России, что обуславливает возможность их применения в мероприятиях по охране окружающей среды, в том числе, для газоочистки выбросов котельных и теплостанций горнопромышленных предприятий [7]. В этой связи были проведены исследования по изучению возможности использования природных цеолитов Забайкалья для очистки отходящих газов от диоксида серы сорбционным методом.

Соответственно, **объектом исследований** являются газозвушные смеси, содержащие диоксид серы и окислы азота. **Предметом исследований** являются технологии и природные цеолиты, обеспечивающие газоочистку.

Целью исследований является оценка возможности эффективной газоочистки отходящих дымовых газов от диоксида серы сорбционным методом.

К **задачам исследования** следует отнести следующие: разработка схемы лабораторной установки для проведения исследований по газоочистке от диоксида серы и окислов азота; определение эффективности очистки отходящих дымовых газов от диоксида серы и окислов азота сорбционным методом, основанного на использовании природных цеолитов, в том числе, модифицированных металлами (железа и марганца); рекомендовать эффективную аппаратную схему для реализации предлагаемой сорбционной технологии в промышленных условиях.

Методология и методы исследования. Информационный анализ, патентный поиск, оценка существующих научных разработок в области газоочистки отходящих дымовых газов котельных и ТЭС, определение физико-химических свойств природных цеолитов, методы проведения теоретических и экспериментальных исследований с использованием экспериментальных лабораторных методов исследования сорбционных характеристик цеолитов по отношению к химическим компонентам, содержащимся в газозвушных смесях, адсорбционной ёмкости цеолитов, методов контроля химического состава газозвушных смесей, количественного определения диоксида серы в дымовых газах.

Исследование сорбционных свойств природных цеолитов Забайкалья при газоочистке от SO_2 осуществлялось по следующей методике: через сорбционную колонну с природным цеолитом пропускалась газозвушная смесь, содержащая 15 и 100 % SO_2 (диоксид серы). Через сорбционную колонну пропускалось 170 л SO_2 . При этом продолжительность насыщения цеолитов SO_2 составляла от 2,5 часов.

Схема экспериментальной установки для газоочистки представлена на рис. 1.

Лабораторная установка для проведения экспериментальных исследований состоит из сорбционных колонн, реометров, предназначенных для замера скоростей потоков газов, термометра и системы колб с воронкой для приготовления и донасыщения газозвушной смеси.

Газозвушная смесь подавалась в сорбционную колонну по направлению сверху вниз, при этом необходимый напор газового потока обеспечивался вакуумом. Отбор дымовых газов для проведения необходимого анализа осуществлялся посредством воздухоудовки. Адсорбционная ёмкость цеолитов определялась на газах с одним компонентом (монокомпонентный газ).

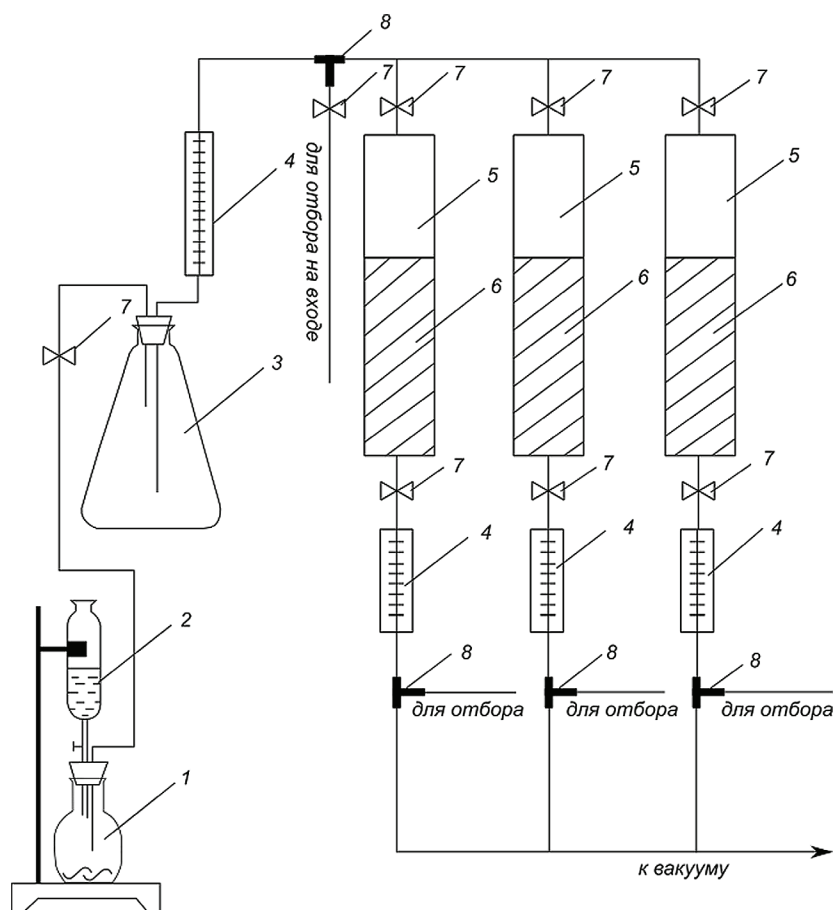


Рис. 1. Схема лабораторной установки для газоочистки (1 – ёмкость с отводом; 2 – воронка делительная; 3 – ёмкость для донасыщения газа; 4 – ротаметр; 5 – сорбционная колонна; 6 – цеолит; 7 – вентиль; 8 – тройник) / **Fig. 1.** Scheme of a laboratory installation for gas cleaning (1 – tank with a tap; 2 – separating funnel; 3 – tank for gas saturation; 4 – rotameter; 5 – sorption column; 6 – zeolite; 7 – valve; 8 – tee)

Перед каждым экспериментом навеска сорбента (цеолита) продувалась газоздушным потоком, не содержащим SO_2 , до постоянного веса. Для измерения расхода газоздушной смеси использовался капилляр и реометр. Термостатирование сорбционной колонны производилось при помощи термостата, температура эксперимента поддерживалась перманентной (± 2 °C).

Разработанность темы. Процессы очистки отходящих дымовых газов от диоксида серы (SO_2) применяются с конца XIX в. Развитие технологий очистки происходило от разработки многочисленных модификаций поглотителей до мокрых способов улавливания. В середине 50-х гг. прошлого века широкое внедрение стали получать сухие способы очистки от диоксида серы, основанные на избирательных свойствах сорбентов. При этом поглощение SO_2 сухим способом доступно практически при любой температуре. Сухой

процесс адсорбции диоксида серы является экономичным при использовании сравнительно дешевых поглотителей, к которым можно отнести природные цеолиты [8].

Проведённый информационный поиск и анализ его результатов позволил установить, что во многих зарубежных странах (КНР, США, Япония, Австралия) для очистки отходящих дымовых газов котельных и ТЭС достаточно широко используются цеолиты природного происхождения [14–16]. При этом многие страны также видят перспективу в применении технологий очистки дымовых газов от диоксида серы, основанных на использовании таких доступных сорбентов как цеолиты. В частности, результаты проведённых исследований по изучению возможности применения природных цеолитов расположенных в Румынии месторождений «Мирсид» и «Пиглица», для очистки газов от SO_2 позволили установить, что величина адсорбции SO_2

при равновесной объёмной концентрации 1,145 % и температуре газов 25 °С составила для цеолитов месторождения «Мирсид» 8,43 %, а для цеолитов месторождения «Пиглица» – 7,96 %. Определено, что величина адсорбции с изменением температуры до 150 °С уменьшается практически в два раза [8; 17; 18].

Результаты исследования. В процессе проведения экспериментальных исследований установлено, что при добавлении воздуха к диоксиду серы в пропорции 1:10 и последующем пропускании полученной газовой смеси через сорбционную колонну с цеолитом при скорости потока 1 л/мин, полное насыщение сорбента (цеолитов) газами происходит через 17 часов непрерывного процесса очистки. При этом прошедшее через сорбционную колонну количество газовой смеси составило 950 л.

Результаты проведённых исследований позволили выполнить моделирование установки промышленного типа для очистки отходящих дымовых газов от диоксида серы. При этом установлены следующие параметры процесса газоочистки: сорбционная колонна с 2,5 т природных цеолитов способна поглотить порядка 400 кг SO₂ (при содержании диоксида серы в газовой смеси 4 %), т. е. в объёме 3,4 тыс. м³. Результаты прове-

дённых исследований по газоочистке природными цеолитами представлены в табл. 2.

Установлено, что эффективность очистки природными цеолитами отходящих дымовых газов от SO₂ составляет от 90 до 95 %.

Следует отметить, что большое значение при организации процесса газоочистки имеет выбор необходимого оборудования. В этой связи, аппаратную реализацию предлагаемой сорбционной технологии очистки дымовых газов от SO₂ рационально реализовывать с применением традиционной схемы (рис. 2). При этом рекомендуется применять устройство для очистки дымовых газов, разработанное в Забайкальском государственном университете (Патент РФ 123341), которое необходимо устанавливать после золоуловителя (рис. 3).

Данное устройство предполагает использование в качестве сорбента природных цеолитов и обеспечивает высокую степень газоочистки (до 95 %).

Вместе с тем, на основе имеющейся практики применения сорбционных установок для очистки отходящих дымовых газов, содержащих окислы азота и серы, и соответствующих научных разработок [1; 8; 15], в качестве адсорбента для газоочистки возможно использование модифицированных серной кислотой и насыщенных ионами железа природных цеолитов.

Таблица 2 / Table 2

Результаты поглощения диоксида серы природными цеолитами Забайкалья / Results of absorption of sulfur dioxide by natural zeolites of Transbaikalia

Месторождение / Deposit	Состав газовой смеси / Composition of the gas-air mixture	Скорость подачи газовой смеси, л/мин / The rate of supply of gas-air mixture, l/min	Продолжительность подачи газа с SO ₂ из колонны до полного насыщения, ч Duration of gas supply with SO ₂ from the column until full saturation, h	Ёмкость цеолита по SO ₂ , г/кг / Zeolite SO ₂ capacity	Влажность, % / Humidity, %
Шивиртуйское / Shivyrtuyskoye	100 % SO ₂	1,0	2,5	146,7	7
	10 % SO ₂ в газовой смеси / in gas mixture	1,0	17	149,9	7
Бадинское / Bading-skoye	100 % SO ₂	1,0	2,3	146,4	7
	10 % SO ₂ в газовой смеси / in gas mixture	1,0	16,5	149,6	7
Холинское / Kholinskoye	100 % SO ₂	1,0	2,4	146,7	7
	10 % SO ₂ в газовой смеси / in gas mixture	1,0	16,6	149,5	7
Талан-Гозагорское / Talan-Gozagorskoye	100 % SO ₂	1,0	2,8	147,3	7
	10 % SO ₂ в газовой смеси / in gas mixture	1,0	17,5	150,4	7

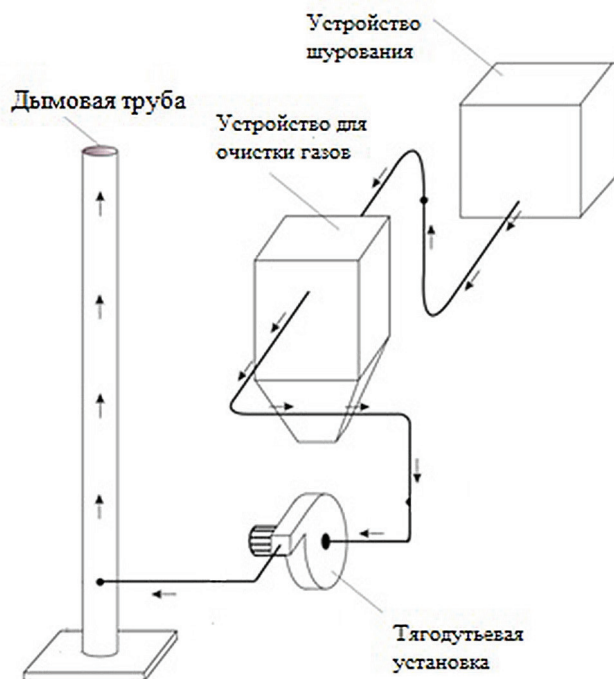


Рис. 2. Схема газоочистки от диоксида серы /
Fig. 2. Scheme of gas purification
from sulfur dioxide

В результате проведения исследований установлено, что в интервале принятых для проведения эксперимента концентраций (SO_2) диоксида серы 1,0–2,5 г/л, природные цеолиты, насыщенные солями металлов (железа; марганца) и проявляют активность аналогично природному цеолиту, не подвергнутому модификации, в течение 2–3 часов. Далее наступает насыщение сорбента и при продолжении процесса пропускания через него газовой смеси, диоксид серы начинает выделяться обратно в поток. Вместе с тем с применением сернокислотного модифицирования и последующим насыщением природных цеолитов солью двухвалентного железа достигается значительное повышение эффективности процесса очистки газа, содержащего один компонент (монокомпонентный газ). Следует отметить, что при солевом и кислотном модифицировании природных цеолитов Забайкалья (Шивиртуйское месторождение) и насыщением их двухвалентным железом, получены наиболее высокие показатели степени газоочистки от окислов азота (~77 %), с сорбцией до 60 г окислов азота на 1 кг цеолита. При этом показатели сорбции природного цеолита, модифицированного железом, до 2 раз выше, в сравнении с не подвергавшимся обработке.

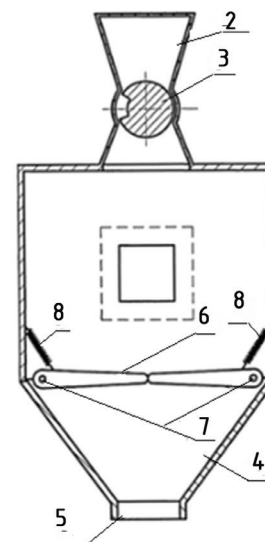


Рис. 3. Устройство для газоочистки
(1 – адсорбер; 2 – бункер-устройство для подачи
цеолита; 3 – питатель; 4 – бункер насыщенного
цеолита; 5 – патрубок; 6 – днище адсорбера;
7 – оси крепления створок днища адсорбера; 8 –
пружины) [1] / **Fig. 3.** Device for gas cleaning
(1 – adsorber; 2 – hopper-device for supplying
zeolite; 3 – feeder; 4 – saturated zeolite hopper;
5 – branch pipe; 6 – adsorber bottom; 7 – adsorber
bottom flap attachment axes; 8 – springs) [1]

Известно [8], что процесс очистки отходящих дымовых газов основан на законах динамики адсорбции, при которой массопередача происходит в части слоя цеолитов. Данная часть слоя сорбентов, в частности, его высота, характеризует влияние как равновесных факторов, так и кинетических, что позволяет использовать данный показатель при расчетах необходимого для данных сорбционных процессов оборудования и его технологических показателей. Вместе с тем, в случае выпуклых изотерм сорбции, характерных для диоксида серы, распределение концентрации адсорбтива (SO_2) по слою цеолитов, с течением времени, образует «фронт постоянного профиля», который по мере формирования начинает перемещаться по сорбентам, представляющим собой зернистый материал, с постоянной скоростью. При этом направление движения данного слоя является параллельным самому себе [8]. Математическим выражением данной модели является уравнение [9]

$$\tau_{\text{np}} = K(L - h),$$

$$K = 1/U,$$

$$U = WC_0/C_0 + a,$$

где K – коэффициент защитного действия;
 U – скорость движения фронта сорбции; W –

скорость газового потока, отнесенная к единице сечения устройства; L – высота слоя цеолита; h – величина «мертвого слоя»; $\tau_{пр}$ – время до появления адсорбтива за слоем цеолита; C , a – концентрация адсорбтива в газовой фазе и равновесная с ним концентрация в твердой фазе.

Таким образом, относительная простота математической модели позволяет отнести динамику сорбции, имеющей изотермический характер, к достаточно удобным объектам для определения сравнительных кинетических характеристик сорбционного процесса.

Выводы. Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод об эффективности применения природных це-

олитов Забайкалья для очистки отходящих дымовых газов котельных и ТЭС горнопромышленных предприятий от сероводорода, меркаптана и сернистого ангидрида, что обусловлено достаточно высоким показателем сорбционной емкости цеолитов по сернистым соединениям (не менее 16 % масс.). При этом модификация растворами таких металлов, как железо и марганец в значительной степени повышает сорбционную способность цеолитов. Аппаратурную реализацию сорбционной технологии очистки отходящих дымовых газов рекомендуется осуществлять с применением соответствующего устройства, разработанного в Забайкальском государственном университете (Патент РФ 123341).

Список литературы

1. Батухтин А. Г., Хатькова А. Н., Кобылкин М. В., Риккер Ю. О. Проблемы подавления газовых выбросов угольных ТЭС: монография. Чита: ЗабГУ, 2021. 308 с.
2. Власова В. В., Артемова О. С., Фомина Е. Ю. Определение направлений эффективного использования отходов ТЭС // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21, № 11. С. 36–41. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-36-41.
3. Ивлиева М. С. Анализ методов очистки газов, основанных на нейтрализации сернистого ангидрида // Известия Тульского государственного университета. 2021. № 5. С. 163–167. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-163-168.
4. Кожанова Е. А., Черных А. А. Состояние вопроса очистки дымовых газов от диоксида серы. Текст: электронный // Вестник Белгородского государственного технического университета им. В. Г. Шухова. 2015. С. 180–182. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-voprosa-ochistki-dymovyh-gazov-ot-dioksida-sery> (дата обращения: 21.06.2023).
5. Куклина Г. Л., Мязин В. П., Сверкунова Т. П., Метелев В. А. Комплексная геолого-технологическая переоценка качества ископаемых углей Восточного Забайкалья и перспективы их многоцелевого использования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 2. С. 321–330.
6. Мязин В. П., Мязина В. И., Размахнин К. К., Шумилова Л. В. Исследования техногенных образований ТЭК Забайкалья как сложных геосистем и нетрадиционных источников минерального сырья // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: в 3 ч. Чита: ЗабГУ. 2017. Ч. 1. С. 152–159.
7. Размахнин К. К. Обоснование и разработка технологий обогащения и модификации цеолитосодержащих пород Восточного Забайкалья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 3. С. 148–157.
8. Смола В. И. Поглощение двуокиси серы природными цеолитами. Москва: Полиграф сервис, 2009. 324 с.
9. Шилов Н. А., Лепинь Л. К., Вознесенский С. А. К вопросу об адсорбции постороннего газа из тока воздуха // Журнал Русского физико-химического общества. 1929. Т. 61, № 7. С. 1107–1123.
10. Barabanshchikov Y., Fedorenko I., Kostyrya S., Usanova K., Cold-Bonded Fly Ash Lightweight Aggregate Concretes with Low Thermal Transmittance // Review. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. No. 983. P. 858–866. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_84.
11. Ivanova M., Vishnetskaya M., Skrepleva I., Tomsky K. Catalytic Purification of Gas Emissions from Carbon Dioxide and Sulfur // Ecology and Industry of Russia. 2019. No. 23. P. 46–49. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-1-46-49.
12. Luo C., Dong W., Gu Y. Theory-guided access to efficient photodegradation of the simplest perfluorocarboxylic acid: trifluoroacetic acid. Chemosphere. 2017. Vol. 181. P. 26–36. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.118.
13. Kolev N. N., Ljutzkanov L. A., Kolev D. N., Dzhonova-Atanasova D. B., Razkazova-Velkova E. N. New technology for purification of the flue gas from sulfur dioxide // Journal of International Scientific Publication: Materials, Methods & Technologies. 2011. Vol. 5. P. 375–382.
14. Papurello D., Gandiglio M., Kafashan J., Lanzini A. Biogas purification: a comparison of adsorption performance in D4 siloxane removal between commercial activated carbons and waste wood-derived char using isotherm equations // Processes. 2019. Vol. 7, no. 10. P. 774–784. DOI: 10.3390/pr7100774.

15. Sasi T., Mighani M., Örs E., Tawani R., Gräbner M. Prediction of ash fusion behavior from coal ash composition for entrained-flow gasification // *Fuel Processing Technology*. 2018. No. 176. P. 64–75. DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.03.018.
16. Sassykova L. R., Sendilvelan S., Bhaskar K., Zhumakanova A. S., Aubakirov Y. A., Abildin T. S., Kubekova Sh. N., Mataeva Z. T., Zhakupova A. A. Norms of emissions of harmful substances generated from vehicles in the different countries of the world // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, series of geology and technology sciences*. 2019. No. 434. P. 181–189. DOI: 10.32014/2019.2518-170X.53.
17. Sözer H., Sözen H. Waste capacity and its environmental impact of a residential district during its life cycle // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. P. 286–296. DOI:10.1016/j.egy.2020.01.008.
18. Yemelyanova V. S., Dossumova B. T., Shakieva T. V., Sassykova L. R., Sendilvelan S. Processing fly ash from the thermal power stations for gas emissions purification from sulfur dioxide // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*. 2019. Vol. 9, iss. 4. P. 1027–1036. DOI: 10.24247/ijmperdaug2019105.

References

1. Batukhtin A. G., Khatkova A. N., Kobylkin M. V., Rikker Yu. O. Problems of suppression of gas emissions from coal-fired thermal power plants: monograph. Chita: Transbaikal State University, 2021. (In Rus.).
2. Vlasova V. V., Artemova O. S., Fomina E. Yu. Determining the directions of efficient use of TPP waste. *Ecology and industry of Russia*, vol. 21, no. 11, pp. 36–41, 2017. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-36-41. (In Rus.).
3. Ivlieva M. S. Analysis of gas purification methods based on the neutralization of sulfur dioxide. *Proceedings of the Tula State University*, no. 5, pp. 163–167, 2021. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-163-168. (In Rus.).
4. Kozhanova E. A., Chernykh A. A. The state of the issue of flue gas purification from sulfur dioxide. *Bulletin of the Belgorod State Technical University named after V. G. Shukhov*, pp. 180–182, 2015. Web. 21.06.2023. <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-voprosa-ochistki-dymovyh-gazov-ot-dioksida-sery>. (In Rus.).
5. Kuklina G. L., Myazin V. P., Sverkunova T. P., Metelev V. A. Complex geological and technological reassessment of the quality of fossil coals of Eastern Transbaikalia and prospects for their multipurpose use. *Mining information and analytical Bulletin*, no. 2, pp. 321–330, 2004.
6. Myazin V. P., Myazina V. I., Razmakhnin K. K., Shumilova L. V. Studies of technogenic formations of the Transbaikal fuel and energy complex as complex geosystems and unconventional sources of mineral raw materials. *Kulagin readings: technique and technologies of production processes: in 3 parts*. Chita: Transbaikal State University, 2017. (In Rus.).
7. Razmakhnin K. K. Substantiation and development of technologies for enrichment and modification of zeolite-containing rocks of Eastern Transbaikalia. *Physico-technical problems of mineral development*, no. 3, pp. 148–157, 2021.
8. Resin V. I. Absorption of sulfur dioxide by natural zeolites. Moscow: Polygraph Service, 2009. (In Rus.).
9. Shilov N. A., Lepin L. K., Voznesensky S. A. On the issue of adsorption of foreign gas from the air current. *Journal of the Russian Physico-Chemical Society*, vol. 61, no. 7, pp. 1107–1123, 1929. (In Rus.).
10. Barabanschikov Yu., Fedorenko I., Kostyrya S., Usanova K., Cold-Bonded Fly Ash Lightweight Aggregate Concretes with Low Thermal Transmittance. *Review. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, no. 983, pp. 858–866. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_84. (In Eng.).
11. Ivanova M., Vishnetskaya M., Skrepleva I., Tomsky K. Catalytic Purification of Gas Emissions from Carbon Dioxide and Sulfur. *Ecology and Industry of Russia*, no. 23, pp. 46–49, 2019. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-1-46-49. (In Eng.).
12. Luo C., Dong W., Gu Y. Theory-guided access to efficient photodegradation of the simplest perfluorocarboxylic acid: trifluoroacetic acid. *Chemosphere*, vol. 181, pp. 26–36, 2017. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.118. (In Eng.).
13. Kolev N. N., Ljutzkanov L. A., Kolev D. N., Dzhonova-Atanasova D. B., Razkazova-Velkova E. N. New technology for purification of the flue gas from sulfur dioxide. *Journal of International Scientific Publication: Materials, Methods & Technologies*, vol. 5, pp. 375–382, 2011. (In Eng.).
14. Papurello D., Gandiglio M., Kafashan J., Lanzini A. Biogas purification: a comparison of adsorption performance in D4 siloxane removal between commercial activated carbons and waste wood-derived char using isotherm equations // *Processes*, vol. 7, no. 10, pp. 774–784, 2019. DOI: 10.3390/pr7100774. (In Eng.).
15. Sasi T., Mighani M., Örs E., Tawani R., Gräbner M. Prediction of ash fusion behavior from coal ash composition for entrained-flow gasification. *Fuel Processing Technology*, no. 176, pp. 64–75, 2018. DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.03.018. (In Eng.).
16. Sassykova L. R., Sendilvelan S., Bhaskar K., Zhumakanova A. S., Aubakirov Y. A., Abildin T. S., Kubekova Sh. N., Mataeva Z. T., Zhakupova A. A. Norms of emissions of harmful substances generated from vehicles in the different countries of the world. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Ka-*

zakhstan, series of geology and technology sciences, no. 434, pp. 181–189, 2019. DOI: 10.32014/2019.2518–170X.53. (In Eng.).

17. Sözer H., Sözen H. Waste capacity and its environmental impact of a residential district during its life cycle. *Energy Reports*, vol. 6, pp. 286–296, 2020. DOI:10.1016/j.egy.2020.01.008. (In Eng.).

18. Yemelyanova V. S., Dossumova B. T., Shakieva T. V., Sassykova L. R., Sendilvelan S. Processing fly ash from the thermal power stations for gas emissions purification from sulfur dioxide. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, vol. 9, iss. 4, pp. 1027–1036, 2019. DOI: 10.24247/ijmperdaug2019105. (In Eng.).

Информация об авторах

Размахнин Константин Константинович, д-р техн. наук, доцент, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; constantin-const@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2944-7642>. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, геоэкология, обращение с отходами.

Хатькова Алиса Николаевна, д-р техн. наук, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; alisa1965.65@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, геоэкология, обращение с отходами, химические технологии.

Шумилова Лидия Владимировна, д-р техн. наук, доцент, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; shumilovalv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, геоэкология, обращение с отходами, экологическая безопасность.

Номоконова Татьяна Сергеевна, аспирант, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; krutikova_1995@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-9096-864X>. Область научных интересов: геоэкология, обращение с отходами, химические технологии.

Information about the authors

Razmakhnin Konstantin K., doctor of engineering sciences, associate professor, Transbaikal State University, Chita, Russia; constantin-const@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2944-7642>. Research interests: mineral processing, geocology, waste management.

Khatkova Alisa N., doctor of engineering sciences, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia; alisa1965.65@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>. Research interests: mineral processing, geocology, waste management, chemical technologies.

Shumilova Lidiya V., doctor of engineering sciences, associate professor, Transbaikal State University, Chita, Russia; shumilovalv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>. Research interests: mineral processing, geocology, waste management, environmental safety.

Nomokonova Tatyana S., postgraduate, Transbaikal State University, Chita, Russia; krutikova_1995@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-9096-864X>. Research interests: geocology, waste management, chemical technologies.

Вклад авторов в статью

К. К. Размахнин – разработка методологии исследования, исследование возможности применения природных цеолитов Шивыртуйского месторождения для очистки сточных и оборотных вод гидрозолоотвала Читинской ТЭЦ-1 от загрязняющих компонентов, проведение сравнительной оценки эффективности применения природных цеолитов для очистки сточных вод гидрозолоотвала, проведение в динамическом режиме экспериментальных исследований по извлечению мышьяка из сточных и оборотных вод гидрозолоотвала.

А. Н. Хатькова – определение основных методов очистки сточных и оборотных вод ТЭЦ и гидрозолоотвалов, разработка схемы сорбционной установки с последовательным введением цеолита.

Л. В. Шумилова – разработка схемы непрерывной сорбционной установки на основе применения в качестве сорбента природных цеолитов.

Т. С. Номоконова – сбор материалов, библиографии, написание текста.

The authors' contribution to the article

К. К. Razmakhnin – development of research methodology, study of the possibility of using natural zeolites of the Shivyrtuiskoye deposit for the treatment of waste and recycled water from the hydroash disposal site of the Chita TPP-1 from polluting components, conducting a comparative assessment of the effectiveness of the use of natural zeolites for the treatment of waste water from the hydroash disposal site, conducting dynamic experimental studies on extraction of arsenic from waste and recycled waters of the hydraulic ash dump.

A. N. Khatkova – determination of the main methods of treatment of waste and circulating waters of thermal power plants and hydraulic ash dumps, development of a scheme for a sorption plant with the sequential introduction of zeolite

L. V. Shumilova – development of a scheme of a continuous sorption plant based on the use of natural zeolites as a sorbent.

T. S. Nomokonova – collection of materials, bibliographies, text writing.

Для цитирования

Размахнин К. К., Хатькова А. Н., Шумилова Л. В., Номоконова Т. С. Использование природных цеолитов для снижения вредных выбросов при сжигании углей // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 3. С. 56–65. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-3-56-65.

For citation

Razmakhnin K. K., Khatkova A. N., Shumilova L. V., Nomokonova T. S. The use of Natural Zeolites to Reduce Harmful Emissions from Coal Combustion // Transbaikal State University Journal. 2023. Vol. 29, no. 3. P. 56–65. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-3-56-65.