ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(2):151-167
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 502.13 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_2_0_151

# ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЗОЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ СЕКВЕСТРАЦИИ И УТИЛИЗАЦИИ $CO_2$

**О.П. Стебелева[1], Л.В. Кашкина[1], О.А. Баюков[2], А.В. Минаков[1,3], Е.В. Пикурова[1,4]**

[1] Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, e-mail: opstebeleva@mail.ru
[2] ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
[3] Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
[4] Институт химии и химической технологии СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

***Аннотация:*** Утилизация является одним из способов обращения с опасными промышленными отходами, такими как зола уноса и зольный остаток. Энергия ископаемого топлива останется основным источником глобального электроснабжения в ближайшие годы, поэтому отсутствие эффективных стратегий управления усугубит проблему отходов золы в окружающей среде. Улавливание, утилизация и хранение углерода открывают возможности для использования золы различными способами – как улавливающий материал, как среда для постоянного хранения $CO_2$ путем минерализации, а также в качестве катализатора или носителя катализатора для процессов утилизации углекислого газа. Рассмотрена эффективность использования гидродинамической кавитационной обработки для оптимизации технологии хранения и улавливания парникового газа $CO_2$. Исследовались зольные порошки, полученные после сжигания Канско-Ачинских углей, а также отходы производства керамических материалов из этих порошков, обработанные в гидродинамическом генераторе роторного типа. Анализ изменения физико-химических свойств порошков проведён методами оптической микроскопии, рентгенофазового анализа, электронно-парамагнитного (ЭПР) и ядерного гамма-резонанса (эффект Мессбауэра). В результате гидродинамической обработки образцов наблюдалось существенное уменьшение размеров частиц золы, а также разделение фаз марганца и железа, сверхтонкое изменение заполненности железа разной валентности в железосодержащей части образцов пенокерамики. Эти эффекты могут способствовать существенному повышению реакционной активности исследуемых образцов в технологиях секвестрации и утилизации $CO_2$. Вывод согласуется с имеющимися литературными данными.

***Ключевые слова:*** кавитация, секвестрация $CO_2$, гидродинамическая обработка, утилизация $CO_2$, углекислый газ, зола, карбонизация, минерализация.

***Благодарность:*** Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2020-0012). Исследование оптических свойств образцов выполнено в рамках государственного задания Института химии и химической технологии СО РАН (проект FWES-2021-0014) с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

© О.П. Стебелева, Л.В. Кашкина, О.А. Баюков, А.В. Минаков, Е.В. Пикурова. 2024.

***Для цитирования:*** *Стебелева О. П., Кашкина Л. В., Баюков О. А., Минаков А. В., Пикурова Е. В.* Изучение возможностей применения гидродинамической кавитационной обработки зольных материалов в технологиях секвестрации и утилизации $CO_2$ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 2. – С. 151–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_2_0_151.

# Applicability of hydrodynamic cavitation treatment of ash materials in sequestration and utilization of $CO_2$

**O.P. Stebeleva[1], L.V. Kashkina[1], O.A. Bayukov[2], A.V. Minakov[1,3], E.V. Pikurova[1,4]**

[1] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: opstebeleva@mail.ru
[2] Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Krasnoyarsk, Russia
[3] Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
[4] Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

***Abstract:*** Utilization is a way of reclamation of toxic industrial waste such as fly ash and ash residue. Fossil fuel energy is going to remain the main source of the global energy supply in the coming years. The lack of the effective control strategy can aggravate the problem connected with ash content in the environment therefore. Capture, utilization and storage of carbon open opportunities for various-way utilization of ash–as a capture material, as a permanent storage medium of $CO_2$ through mineralization, as well as a catalyst or a catalyst carrier for the processes of carbon dioxide utilization. This article discusses the efficiency of hydrodynamic cavitation treatment in optimization of capture and storage of greenhouse gas $CO_2$. The test materials were ash powders of Kansk–Achinsk coal combustion and waste of ceramic production from these powders, treated in rotary hydrodynamic generator. The changes in the physicochemical properties of the powders were analyzed using optical microscopy, X-ray phase analysis, electron paramagnetic resonance (EPR) and nuclear gamma resonance (Mossbauer effect). As a result of the hydrodynamic treatment of the test samples, substantial reduction in size of ash particles, separation of manganese and iron phases, as well as ultra fine variation in population of various-valency iron in iron-bearing part of the samples of ceramic foams were observed. These effects can promote an increase in reactivity of the test samples in the technologies of sequestration and utilization of $CO_2$. This inference agrees with the data from the available literature sources.

***Key words:*** cavitation, $CO_2$ sequestration, hydrodynamic treatment, utilization of $CO_2$, carbon dioxide, ash, carbonization, mineralization.

***Acknowledgements:*** The study was carried out under the state contract with the Siberian Federal University, Contract No. FSRZ-2020-0012. The optical analysis of the test samples was carried out under the state contract with the Institute of Chemistry and Chemical Technology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Project No. FWES-2021-0014, using equipment of the Shared Use Center at the Krasnoyarsk Science Center SB RAS.

***For citation:*** Stebeleva O. P., Kashkina L. V., Bayukov O. A., Minakov A. V., Pikurova E. V. Applicability of hydrodynamic cavitation treatment of ash materials in sequestration and utilization of $CO_2$. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(2):151-167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_2_0_151.

**Введение**

Парниковые газы, такие как метан, оксид азота и в большей степени углекислый газ $CO_2$, являются причиной глобального изменения климата на планете. Развитие процессов промышленного и энергетического производства согласно Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. должно быть направлено на сокращение объемов использования углеводородного сырья и отходов теплоэнергетического комплекса. Если не принять немедленные меры по сокращению выбросов углекислого газа, то повышение глобальной средней приземной температуры невозможно будет удержать в пределах 1,5 °C, что повлечет катастрофические последствия для планеты [1]. Технологии улавливания, утилизации и хранения углерода (carbon capture, utilization and storage, CCUS), и в частности, секвестрации $CO_2$ (улавливание, транспортировка и захоронение) — это перспективное направление сокращения выбросов $CO_2$ в глобальном масштабе, которая открывает возможность использования золы уноса и зольного остатка. Показатели утилизации золы до сих пор остаются низкими из-за ограниченных возможностей использования. По данным Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления от 2022 г., в Российской Федерации утилизируется лишь 6—7% золошлаковых отходов. Методы утилизации и использования золошлаковых отходов в различных приложениях достаточно описаны в литературе [2], однако в большей степени масштабированы для строительной промышленности [3, 4].

Применение золы уноса для снижения парниковых газов $CO_2$ возможно при реализации всех технологий CCUS в виде самостоятельного компонента или в качестве сырья при создании более эффективных материалов (рис. 1). Различие химического состава золы, морфологии зольных частиц, характеристик угля, из которого производится зола уноса и зольный остаток, технических параметров оборудования сжигания угольного топлива и улавливающих устройств открывает широкие возможности для использования золы [5]. Непосредственная близость производства золы и углекислого газа на угольных электростанциях является преимуществом для внедрения технологий CCUS.

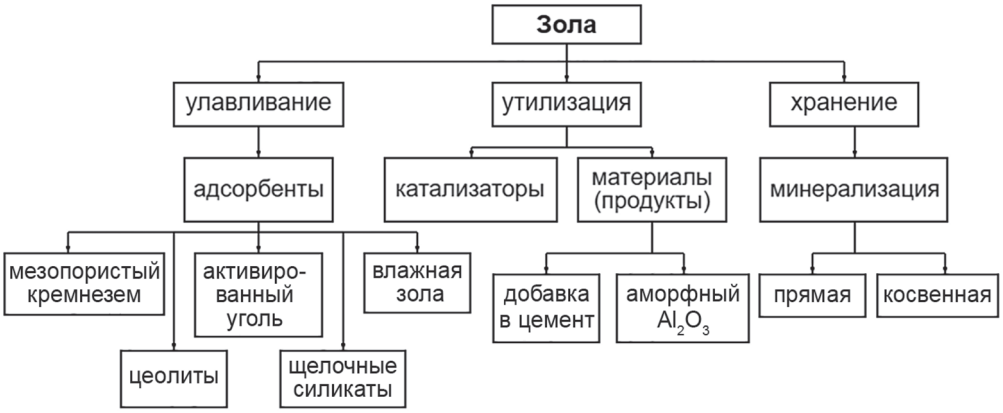



*Рис. 1. Использование золы в технологиях CCUS. Адаптировано из [5]*
*Fig. 1. Use of ash in CCUS technologies. Adapted from [5]*

Утилизация или использование углекислого газа с помощью золы сводится к получению новых материалов, таких как компоненты для строительных композиций с частичным или полным замещением цементного вяжущего карбонизированной золой [6], осажденный аморфный мелкодисперсный глинозем, полученный в постоянном потоке дымового газа [7], а также металлические катализаторы на зольном носителе для метанирования $CO_2$ [например, 8].

Технология захоронения углекислого газа с помощью золы в общем случае сводится к минерализации углерода — химической реакции, при которой углекислый газ поглощается минеральной составляющей золы с образованием карбонатов. Разделяют прямую минерализацию, при которой углекислый газ пропускают через сухую золу, влажную золу или водную суспензию золы [9—11], и косвенную, при которой из золы сначала выщелачивают катионы в раствор, а затем барботируют углекислым газом до получения чистых карбонатов Ca, Mg, Na [12]. Использование рассола — продукта нефтяной деятельности, для секвестрации $CO_2$ с образованием карбонатов ограничено низкой емкостью поглощения углекислого газа и низким pH раствора, при котором невозможна карбонизация. В этом случае добавление к рассолу золы, богатой источниками катионов Ca и Mg и повышающей pH раствора, может повысить эффективность процесса [13]. Минерализация углекислого газа считается жизнеспособной альтернативой геологическому хранению $CO_2$ [14], потому что карбонаты являются стабильными химическими соединениями, а при пластовом хранении практически исключены утечки углекислого газа.

Технологии утилизации и хранения $CO_2$ невозможны без улавливания газа. В процессах выделения и улавливания углекислого газа из дымовых выбросов чаще всего используют процессы адсорбции пористыми материалами, которые могут быть получены с помощью золы уноса или зольного остатка: мезопористый кремнезем [15, 16], активированный уголь [17], цеолит [18], щелочные силикаты [19]. Зола уноса содержит щелочные и щелочноземельные металлы (Ca, Mg, Na, K и т.д.), преимущественно в виде оксидов (CaO и MgO и т.д.), которые превращаются в карбонаты при контакте с $CO_2$, что может быть использовано непосредственно для адсорбционной очистки дымовых газов.

Содержание минеральной части в золе, pH водной суспензии золы определяют целесообразность ее использования в процессах CCUS. Дисперсность и степень обогащения кальцием, магнием, железом зольного порошка влияет на эффективность минерализации $CO_2$ [20]. Методы дополнительной обработки жидкой фазы, направленные на уменьшение размера частиц золы, повышение температуры, изменение массового соотношения Ca/Mg в технологиях CCUS могут заметно улучшить результаты улавливания $CO_2$. Например, ультразвуковая обработка смеси кальциевых сорбентов, золы и уксусной кислоты позволили достичь 100% конверсии CaO в кальциевой петле [21], глубина карбонизации золы увеличилась за счет высокой ионной силы и массообмена при активации в шаровой мельнице [22].

Потенциал гидродинамической кавитации (ГД), при которой происходит фазовый переход в жидкости при локальном гидродинамическом перепаде давления, в технологиях утилизации и секвестрации углекислого газа не раскрыт. Схлопывание кавитационных парогазовых пузырьков сопровождается локальным высоким повышением давления и температуры, образование ударных волн и активный массоперенос, повышение pH

Таблица 1

***Химический состав зольных материалов, масс, %***
***Chemical composition of ash materials, wt, %***

| Образец | $SiO_2$ | CaO | $Al_2O_3$ | MnO | $Fe_{[x]}O_{[y]}$ | MgO | $Na_2O$ | $SO_3$ | $TiO_2$ | $K_2O$ | ппп |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Пено-керамика | 45,00 — 54,00 | 15,00 — 33,00 | 5,00 — 12,00 | — | 7,00 — 11,00 | 3,00 — 6,00 | 0,10 — 1,00 | 0,10 — 0,60 | 0,10 — 0,30 | 0,80 — 1,50 | 0,6 — 2,00 |
| Пено-силикат | 43,00 — 45,00 | 30,00 — 33,00 | 6,00 — 8,00 | 4,00 — 5,00 | 1,00 — 1,50 | 0,71 | 0,16 | 0,10 — 0,60 | 0,17 | 1,82 | 0,6 — 2,00 |
| Примечание: ппп — потери при прокаливании. | | | | | | | | | | | |

жидкости при процессах диссоциации молекул воды при этом способствуют интенсификации химических реакций.

Цель работы — установить влияние гидродинамической кавитационной обработки на физико-химические свойства золы для определения возможности использования ее в технологической цепочке процессов CCUS.

## Объекты и методы исследования

Зольные порошки были получены из отходов производства керамических материалов (табл. 1). Это производство предполагает использование в качестве сырья техногенных отходов — золы, образующейся при сжигании угля Канско-Ачинского бассейна. Получение пеносиликата происходит при резком охлаждении нагретой зольной шихты в воде. При локальном нагревании пеносиликата возможно добиться сомораспространяющейся кристаллизации в пенокерамику, которая происходит за счет движения фронта тепловой волны по объему пеносиликата благодаря энергии фазового перехода «аморфное состояние — кристаллическое» [23]. В работе также исследована зола, полученная при сжигании угля Канско-Ачинского бассейна.

Гидродинамическая обработка водной суспензий зольных порошков проводилась в гидродинамическом генераторе роторного типа [24] с двухлопастной крыльчаткой клиновидного профиля со скоростью вращения ротора 10 000 об/мин в течение 2 мин, объем рабочей камеры составлял $3 \cdot 10^{-4}$ м$^3$. Суспензии были приготовлены из дистиллированной воды и зольного порошка 3 масс.%. После обработки в миксере часть дисперсной фазы выпадала в осадок, часть оставалась в состоянии стабильной взвеси. Осадок и взвесь высушивали в чашках Петри при температуре 250 °C. После полученные порошки исследовались методами оптической микроскопии, электронно-парамагнитного (ЭПР) и ядерного гамма-резонанса (эффект Мессбауэра), рентгенофазового анализа (РФА), pH и окислительно-восстановительный потенциал измерялись pH-метром Water Test Hanna Instrumets. Распределение по размерам частиц золы было построено с помощью программы IMDrops Image Tools при обработке фотографий с оптического микроскопа, объем выборки для каждого образца составлял не менее 180 частиц.

## Результаты и обсуждение

При обработке в гидродинамическом миксере возникает эффект кавитации — образование, рост и схлопывание пузырьков, заполненных газом, паром или их смесью при понижении давления в жидкости до давления насыщенных паров этой жидкости за счет повышения скорости тока жидкости. Независимо от источника кавитации, она является многокомпонентным процессом и сопровождается локальным повышением температуры и давления внутри взрывающегося пузырька, турбулентным перемешива-

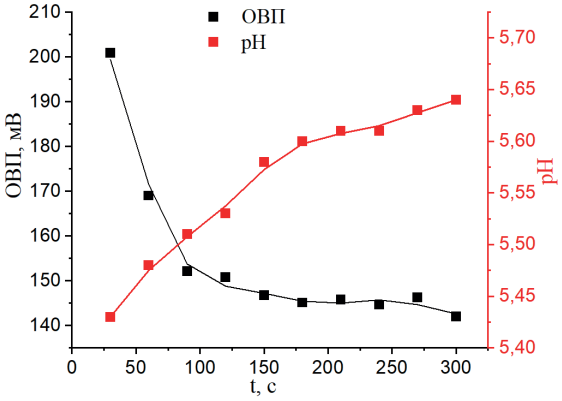



*Рис. 2. Изменение pH и ОВП дистиллированной воды в зависимости от времени кавитационной обработки t, c*

*Fig. 2. Change in pH and oxidation–reduction properties of distilled water as function of cavitation treatment time t, s*

нием и микроперемешиванием за счет образования микроструек при взрыве пузырька и термической диссоциацией молекул воды с образованием гидроксильных радикалов [25]. Процесс быстрого схлопывания пузырька происходит в адиабатическом состоянии, поскольку чрезвычайно короткое время схлопывания (менее 100 нс) препятствует теплообмену внутри и снаружи пузырька. При различном диаметре кавитационного пузырька (до 2 мкм) температура внутри его при схлопывании может достигать 5000 °С, а ударная волна при взрыве — до 500 МПа [26].

Совокупность физических и химических процессов при кавитации обязательно приводит к изменению свойств обрабатываемых жидкостей. Кавитационная обработка воды при начальной комнатной температуре в роторном гидродинамическом миксере показывает повышение pH и понижение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в зависимости от времени обработки (рис. 2). В воде после кавитационной обработки присутствуют ионы $H^+$ и $OH^-$, радикалы $H^*$ и $OH^*$, перекись водорода, которые могут интенсифицировать процессы химических реакций.

Повышенный pH увеличивает растворимость $CO_2$ в воде и может влиять, например, на опреснение рассола (пластовая вода, стоки) за счет этого. В комбинированных процессах улавливания $CO_2$ и удаления соли из отработанного

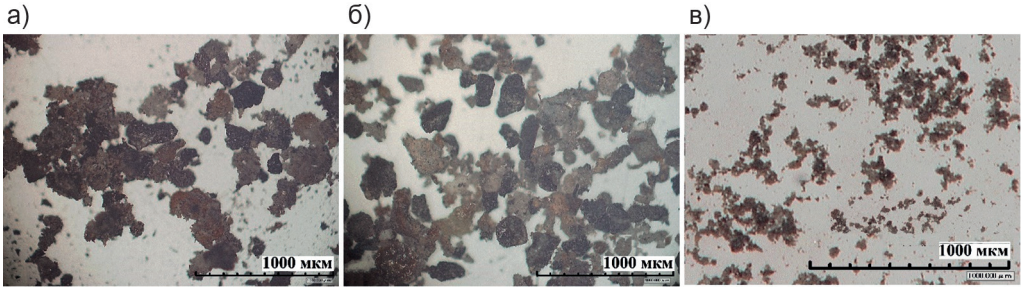



*Рис. 3. Поверхность частиц исходной золы (а), осадка (б) и взвеси (в) золы после кавитации (×140)*

*Fig. 3. Surface of particles of initial ash (a), bottom ash (b) and suspended ash (v) after cavitation (×140)*

Таблица 2

***Числовые характеристики выборок размеров частиц золы, осадка и взвеси золы после кавитации***
***Numerical characteristics of samples of particle sizes of ash, sediment and suspension of ash after cavitation***

| Образец | Среднее значение размера частиц, мкм | Среднеквадратичное отклонение |
|---|---|---|
| Исходная зола | 219,1 | 79,2 |
| Осадок золы | 132,3 | 71,8 |
| Взвесь | 18,4 | 8,4 |

рассола, например, модифицированный процесс Сольве [27], pH является ключевым параметром, определяющим ход реакций. При этом повышение pH за счет добавления ограниченной концентрации оксида кальция может быть достигнуто за счет кавитационной обработки.

Частицы исследуемой исходной золы имеют неровную поверхность, острые края, большой разброс по размерам (см. рис. 3, *а*); после кавитационной обработки и физического разделения образцы осадка и взвеси (рис. 3, *б*, *в*) характеризуются более гладкими краями.

При суперкавитационном режиме пузырьки локализуются в хвостовой части нестационарных суперкаверн, возникающих за ротором, и реализуется стабильное кавитационное воздействие на диспергируемую фазу без разрушения крыльчатки. Пузырьки, схлопываясь вблизи или на поверхности зольной частицы, действуют на зазоры и трещины, вызывая разрушение. Поэтому размер частиц исходной золы уменьшился после кавитации (рис. 4). Дисперсионный анализ размеров частиц показал, что эмпирические численные характеристики значимо различаются (табл. 2).

Условия приготовления пеносиликата предполагают резкое охлаждение расплава шихты в воде, при этом происходит стеклование массы с образованием аморфной фазы (рис. 5). После кавитационной обработки в образцах осадка и взвеси на спектрах РФА не различаются отдельные кристаллические фазы. Спектры представляют собой широкую одиночную компоненту — гало, соответствующую рентгеноаморфному состоянию образца. В образце взвеси это

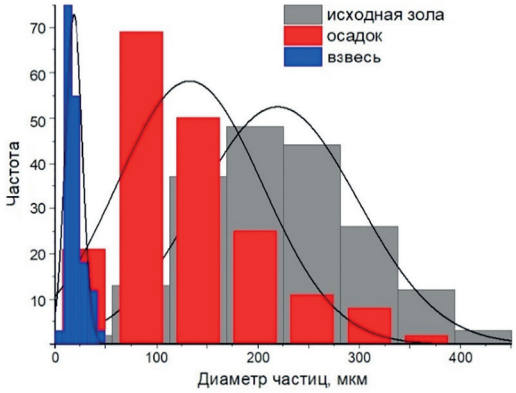



*Рис. 4. Гистограмма распределения частиц по размерам для исходной золы, осадка и взвеси после кавитации θ*
*Fig. 4. Bar chart of particle sizes in initial ash, bottom ash and suspended ash after cavitation θ*

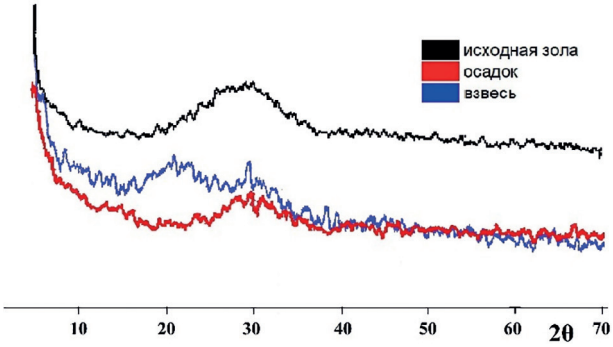



*Рис. 5. Спектры РФА исходного пеноситала и после кавитационной обработки*
*Fig. 5. X ray spectra of initial foam glass ceramic and after cavitation treatment*

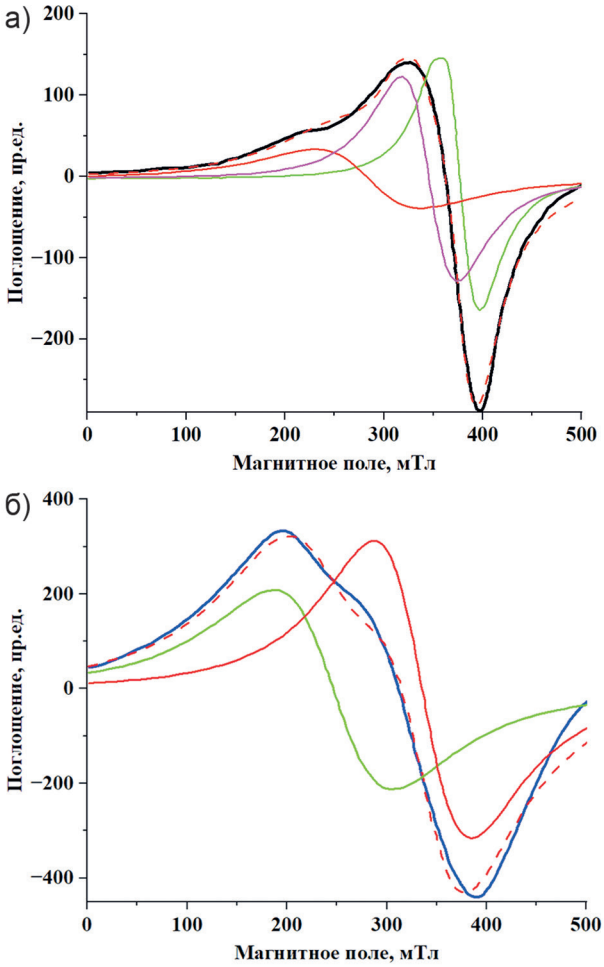



*Рис. 6. Спектры ЭПР исходной пенокерамики (а) и осадка после кавитационной обработки (б) при 293 К*
*Fig. 6. EPR spectra of initial foam ceramic (a) and bottom ash after cavitation treatment (b) at 293 K*

гало уширилось, что говорит об уменьшении размеров частиц.

Спектр ЭПР при комнатной температуре исходного образца пенокерамики представлен линией сложной формы, которая сформирована магнитными центрами, присутствующими в образце, линии которых перекрываются друг с другом (рис. 6, а). Моделирование спектра позволило выделить три центра: парамагнитный (фаза I, которая, возможно, относится к Ti и Cr) с параметрами *g*-фактора и ширины линии $g = 1{,}8$, $\Delta H = 35$ мТл; парамагнитная фаза, образованная, по-видимому, солями железа: магнетитом (шпинель) (фаза II) с параметрами $g = 1{,}9$, $\Delta H = 50$ мТл и гематитом (фаза III)) с параметрами $g = 2{,}3$, $\Delta H = 93$ мТл.

Некоторое различие величин *g*-факторов этих фаз обусловлено сложным составом пенокерамики, что также наблюдается в других исследованиях [28]. Полученные из ЭПР данные по намагниченности в произвольных единицах позволили определить вклад в магнетизм этих фаз (по степени увеличения): II — I — III. Температурное уширение II и III компонент и смещение в более низкие поля соответствует суперпарамагнетизму и свидетельствует о наноразмерности частиц. Некоторое отличие величин *g*-факторов от приведенных в [28] может быть связано с различием в матрицах композиционного материала, в который заселены магнитные частицы.

После диспергирования по спектрам ЭПР осадка пенокерамики фиксируется перестройка парамагнитной составляющей, связанная, возможно, с изменением валентности железа. Моделирование спектра позволяет выделить только две линии с параметрами $g = 1{,}94$, $\Delta H = 85$ мТл для фазы II и $g = 2{,}64$, $\Delta H = 104$ мТл для фазы III (рис. 6, *б*), величина которых совпадает с величинами *g*, $\Delta H$ для частиц магнетита и гематита, но в измененном состоянии. При понижении температуры линии смещаются в более низкие поля, их ширина уменьшается. Это можно связать с усилением обменного взаимодействия, сужающего линии, либо со структурными изменениями. Уширение линий после кавитации можно также связать с увеличением вклада поверхностной неоднородности при уменьшении размера наночастиц либо с увеличением размерной дисперсии. Величины *g*-факторов также немного изменились по этим же причинам.

Анализ спектров ЭПР исходного образца пеносиликата показал, что струк-

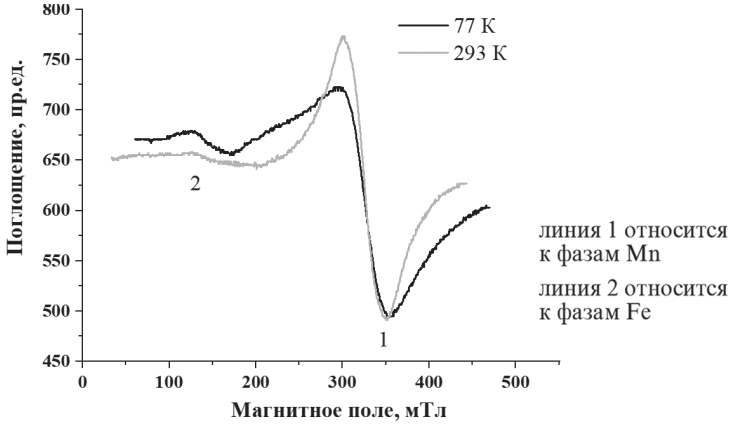



*Рис. 7. Спектры ЭПР исходного пеносиликата при 77 K (черная линия) и 293 K (серая линия)*
*Fig. 7. EPR spectra of initial foam ceramic at 77 K (black line) and at 293 K (grey line)*

тура стеклообразная, с развитой поверхностью, в нем содержатся оксиды марганца (рис. 7, линия *1*) и железа (рис. 7, линия *2*). Фракция, содержащая марганец, количественно преобладает. Параметры линии 1 при 293 K: $g$ = 2,0075, $\Delta H$ = 49,2 мТл; при 77 K: $g$ = 2,015, $\Delta H$ = 62 мТл. Снижение температуры приводит к сдвигу линии в более низкие поля и уширению линии. Такое поведение характерно для суперпарамагнитных частиц нанометровой размерности [28]. При температуре 77 K сигнал увеличивается, $g$-фактор, равный 4,54, характерен для низкосимметричного состояния железа, при этом состояние железных комплексов — парамагнитное.

После кавитационной обработки образец осадка пеносиликата содержит оксид марганца (рис. 8, линия *1*). Параметры линии изменились незначительно: $g$ = 2,013, ширина линии $\Delta H$ = 50,4 мТл. Примесь составляющей железа практически незаметна. В образце взвеси пеносиликата, полученном через две недели из оставшейся взвеси, преобладает компонента, содержащая железо, она сдвинута в более низкие поля: $g$ = 4,54 (см. рис. 8, линия *2*). Оксид марганца остается в значительно меньшем количестве, чем в первоначальном образце (рис. 8, линия *1*), параметры линии несколько изменились: $g$ = 2,038, $\Delta H$ = 53 мТл. Изменение параметров линий может быть связано с изменением поверхности частиц при обработке, а также увеличением дисперсности. Эффект обогащения зольных материалов определенными фазами металлов с разной степенью намагниченности может позволить выделять эти металлы из общей массы золы в процессе или после карбонизации.

Известно, что поглощение углекислого газа ископаемыми минеральными матрицами при закачке углекислого газа в пластовые пустоты значительно варьируется в зависимости от типа породы] [29]. Дунит, в состав которого входит $Fe_2SiO_4$, обладает привлекательной емкостью для хранения $CO_2$, но редко встречается в породах земной коры. Валентность железа и заселенность железосодержащими фазами зольной матрицы может быть важным фактором при выборе способа улавливания углекислого газа из газового потока — Fe (III) способен улавливать $CO_2$ при условии наличия восстановителя, способного превращать Fe (III) в Fe (II), и впоследствии осаждать $CO_2$. В качестве восстановителя возможно использовать диоксид серы $SO_2$, который является компо-

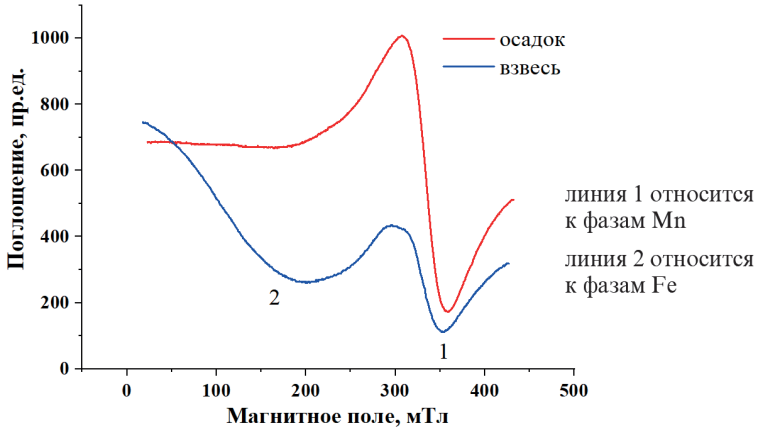
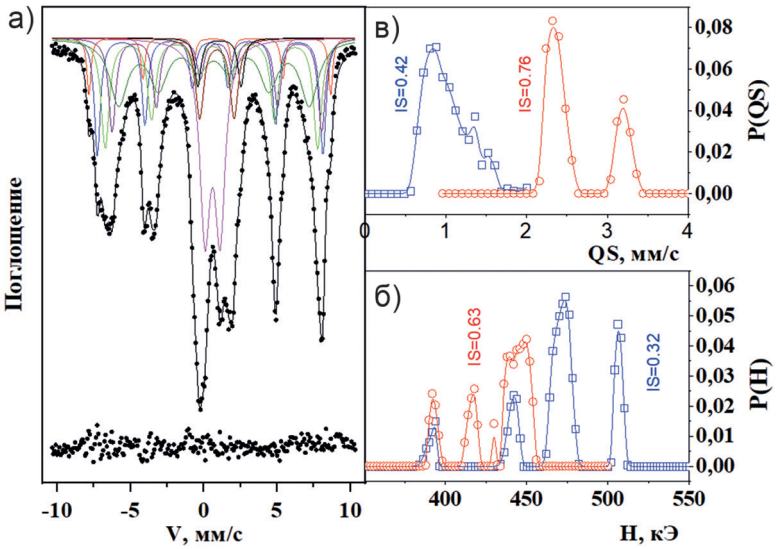


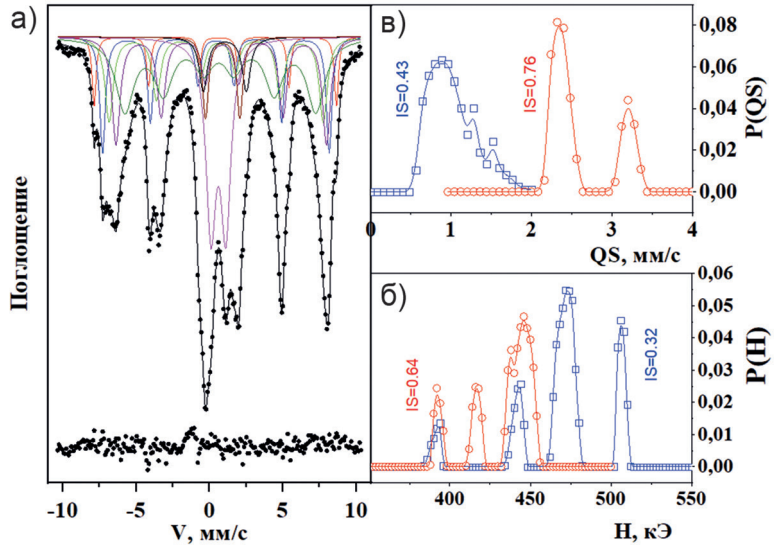

*Рис. 8. Спектры ЭПР пеносиликата после кавитационной обработки при 293 K*
*Fig. 8. EPR spectra of foamed silicate after cavitation treatment at 293 K*




Ниже спектра показана разность между вычисленным и экспериментальным спектром

*Рис. 9. Мессбауэровский спектр исходного образца пенокерамики (а) и распределение вероятности сверхтонких полей (б) и квадрупольных расщеплений (в) в экспериментальном спектре.*

*Fig. 9. Mossbauer spectrum of initial foamed ceramic sample (a) and probability distributions of ultra fine fields (b) and quadrupole splittings (v) in experimental spectrum. The difference between theoretical and experimental spectra is illustrated below*




Ниже спектра показана разность между вычисленным и экспериментальным спектром

*Рис. 10. Мессбауэровский спектр осадка после кавитации (а) и распределение вероятности сверхтонких полей (б) и квадрупольных расщеплений (в) в экспериментальном спектре*

*Fig. 10. Mossbauer spectrum of bottom ash after cavitation (a) and ability (a) and probability distributions of ultra fine fields (b) and quadrupole splittings (v) in experimental spectrum. The difference between theoretical and experimental spectra is illustrated below*

Таблица 3

***Мессбауэровские параметры катионов железа в образцах исходной пенокерамики и после диспергирования (осадок)***
***Mössbauer parameters of iron cations in initial ceramic foam samples and after dispersion (precipitate)***

| Образец | *IS*, мм/с ± 0,01 | *H*, кЭ ± 5 | ε, мм/с ± 0,02 | *W*, мм/с ± 0,02 | *A*, дол. % ± 0,03 | Позиция |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Пено-керамика | 0,36 | 510 | –0,22 | 0,33 | 0,05 | $\alpha$-$Fe_2O_3$ |
| | 0,28 | 476 | –0,01 | 0,49 | 0,14 | $Fe^{3+}$(4) |
| | 0,42 | 448 | –0,11 | 0,66 | 0,18 | $Fe^{3+}$(6) |
| | 0,74 | 442 | 0 | 0,58 | 0,13 | $Fe^{2,5+}$(6) |
| | 0,53 | 402 | 0,02 | 1,45 | 0,23 | $Fe^{2,5+}$(6) |
| | 0,44 | 0 | 1,03 | 0,84 | 0,18 | $Fe^{3+}$(6) |
| | 0,92 | 0 | 2,94 | 0,50 | 0,03 | $Fe^{2+}$(6) |
| | 0,74 | 0 | 2,35 | 0,67 | 0,06 | $Fe^{2+}$(4) |
| Осадок пено-керамики после диспергирования | 0,36 | 511 | –0,23 | 0,32 | 0,05 | $\alpha$-$Fe_2O_3$ |
| | 0,29 | 478 | –0,01 | 0,46 | 0,13 | $Fe^{3+}$(4) |
| | 0,38 | 451 | –0,15 | 0,66 | 0,14 | $Fe^{3+}$(6) |
| | 0,68 | 444 | –0,06 | 0,65 | 0,17 | $Fe^{2,5+}$(6) |
| | 0,53 | 403 | 0,11 | 1,47 | 0,26 | $Fe^{2,5+}$(6) |
| | 0,46 | 0 | 1,01 | 0,83 | 0,17 | $Fe^{3+}$(6) |
| | 0,89 | 0 | 2,93 | 0,66 | 0,04 | $Fe^{2+}$(6) |
| | 0,75 | 0 | 2,33 | 0,47 | 0,04 | $Fe^{2+}$(4) |

Примечание: *IS* — изомерный химический сдвиг относительно $\alpha$-Fe, *H* — сверхтонкое поле на ядре железа, ε — квадрупольное расщепление, *W* — ширина линии поглощения на полувысоте, *A* — долевая заселенность неэквивалентной позиции железа.

нентом дымовых газов при сжигании угольного топлива.

Мессбауэровские спектры пенокерамики, измеренные при комнатной температуре, представляют собой сумму зеемановских секстетов и квадрупольных дублетов. На рис. 9, *а* и 10, *а* цветными линиями показаны компоненты спектра, параметры которых сведены в табл. 3. Наличие в образцах исходной пенокерамики и осадка после кавитации неэквивалентных состояний и позиций железа определены с помощью распределения вероятности сверхтонких полей *P*(*H*) и квадрупольных расщеплений *P*(*QS*) в экспериментальных спектрах для трех валентных состояний железа, $Fe^{3+}$, $Fe^{2,5+}$ и $Fe^{2+}$ (рис. 9, *б*, *в* и 10, *б*, *в*). Пики на этих распределениях свидетельствуют о возможных неэквивалентных позициях. Модельный спектр, сформированный на информации о положении и интенсивности максимумов, подгонялся к экспериментальному спектру при варьировании всех параметров сверхтонкой структуры. При этой подгонке уточняются параметры действительных позиций, а заселенности ложных позиций зануляются.

В образцах присутствуют три железосодержащие фазы: гематит, магнетит и парамагнитная фаза. В соответствии с величинами изомерных химических сдвигов идентифицируются позиции железа с тетраэдрической (4) и октаэдрической (6) координацией по кислороду. Спектры и их состав почти идентичны для этих образцов, оба содержат неболь-

шую (~5%) примесь гематита $\alpha$-$Fe_2O_3$. Гематит дефектен, о чем свидетельствует меньшая величина сверхтонкого поля 510 кЭ в сравнении с 517 кЭ для стехиометричного гематита.

Фаза магнетита идентифицируется по присутствию железа смешанной валентности $Fe^{2,5+}$, которое сопровождает процесс быстрого электронного обмена $Fe^{3+} \leftrightarrow Fe^{2+}$. Заселенность позиций $Fe^{2,5+}$ здесь намного меньше, чем в стехиометричном магнетите. Это свидетельствует о значительной дефектности фазы магнетита. Дефектность обусловлена большим количеством катионных вакансий. Различие величин химических сдвигов для катионов $Fe^{2,5+}$, вероятно, вызвано различной степенью локализации быстрого электрона на соседних катионах. Парамагнитная фаза содержит как $Fe^{3+}$, так и $Fe^{2+}$. Возможно, эта фаза представляет собой позиции наноразмерных образований с нарушенной координацией по кислороду.

Влияние кавитации можно заметить по увеличению заселенности позиций смешанной валентности $Fe^{2,5+}$ по сравнению с исходным образцом и изменению параметров сверхтонкой структуры (выделенные строчки в табл. 3). Следовательно, при кавитации происходит частичное восстановление фазы магнетита. При этом трехвалентное железо в «переокисленном» магнетите в исходной пенокерамике в результате гидродинамической обработки восстанавливается до двухвалентного железа.

**Заключение**

Проведенный в работе анализ имеющихся литературных данных позволяет предположить, что потенциальная реакционная способность полученных зольных материалов для улавливания $CO_2$ после кавитационной гидродинамической обработки увеличилась. Этому способствовали существенное уменьшение размера частиц золы, разделение фаз Mn и Fe, сверхтонкие изменения заселенности железа разной валентности в железосодержащей части золы. Эти изменения происходят при фоновом увеличении pH дисперсионной среды.

Нормальные условия при реализации технологий CCUS с помощью зольных отходов желательны, поскольку связанные затраты должны быть сведены к минимуму. Таким образом, гидродинамическую кавитационную обработку промышленных отходов следует рассматривать как перспективный способ расширения возможностей процессов CCUS.

Следует отметить, что это предварительное исследование и еще предстоит рассмотреть влияние мощности гидродинамического устройства, продолжительности обработки, температуры на поглощение $CO_2$. Ожидается, что постановка активного эксперимента с варьированием параметров воздействия позволит выявить оптимальные и рациональные условия кавитационного диспергирования зольных отходов, поможет повысить их реакционную способность по отношению к двуокиси углерода, в первую очередь для утилизации за счет минерализации в водной суспензии золы. Будущие исследования должны сопровождаться подробным анализом экономической целесообразности, который определит осуществимость любого широкомасштабного процесса на основе кавитации. Понимание химических и физических процессов, происходящих при гидродинамической обработке золы уноса и зольного остатка, необходимо для отбора проб и эффективного улучшения процессов секвестрации $CO_2$.

Авторы выражают признательность за предоставление зольных образцов д-ру хим. наук, зав. отделом технологий комплексной переработки сырья СКТБ «Наука» ФИЦ КНЦ СО РАН В.Ф. Павлову (Красноярск).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Shukla P. R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J. B. R., Chen Y., Zhou X., Gomis M. I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., Waterfield T.* Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. IPCC, 2018: Summary for Policymakers. Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3—24. DOI: 10.1017/9781009157940.001.

2. *Alterary S. S., Marei N. H.* Fly ash properties, characterization, and applications. A review // Journal of King Saud University — Science. 2021, vol. 33, no. 6, article 101536. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101536.

3. *Nayak D. K., Abhilash P. P., Singh R., Kumar R., Kumar V.* Fly ash for sustainable construction. A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies // Cleaner Materials. 2022, vol. 6, article 100143. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100143.

4. *Ankur N., Singh N.* Performance of cement mortars and concretes containing coal bottom ash. A comprehensive review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021, vol. 149, article 111361. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111361.

5. *Dindi A., Quang D. V., Vega L. F., Nashef E., Abu-Zahra M. R. M.* Applications of fly ash for $CO_2$ capture, utilization, and storage // Journal of $CO_2$ Utilization. 2019, vol. 29, pp. 82—102. DOI: 10.1016/j.jcou.2018.11.011.

6. *Li N., Mo L., Unluer C.* Emerging $CO_2$ utilization technologies for construction materials. A review // Journal of $CO_2$ Utilization. 2022, vol. 65, article 102237. DOI: 10.1016/j.jcou.2022.102237.

7. *Yan F., Jiang J., Liu N., Gao Y., Meng Y., Li K., Chen X.* Green synthesis of mesoporous $\gamma$-$Al_2O_3$ from coal fly ash with simultaneous on-site utilization of $CO_2$ // Journal of Hazardous Materials. 2018, vol. 359, pp. 535—543. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.07.104.

8. *Dong X., Jin B., Cao S., Meng F., Chen T., Ding Q., Tong C.* Facile use of coal combustion fly ash (CCFA) as Ni-Re bimetallic catalyst support for high-performance $CO_2$ methanation // Waste Management. 2020, vol. 107, pp. 244—251. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.014.

9. *Liu W., Su S., Xu K., Chen Q., Xu J., Sun Z., Wang Y., Hu S., Wang X., Xue Y., Xiang J.* $CO_2$ sequestration by direct gas—solid carbonation of fly ash with steam addition // Journal of Cleaner Production. 2018, vol. 178, pp. 98—107. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.281.

10. *Bauer M., Gassen N., Stanjek H., Peiffer S.* Carbonation of lignite fly ash at ambient T and P in a semi-dry reaction system for $CO_2$ sequestration // Applied Geochemistry. 2011, vol. 26, no. 8, pp. 1502—1512. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2011.05.024.

11. *Ho H.-J., Iizuka A., Shibata E.* Utilization of low-calcium fly ash via direct aqueous carbonation with a low-energy input: Determination of carbonation reaction and evaluation of the potential for $CO_2$ sequestration and utilization // Journal of Environmental Management. 2021, vol. 288, article 112411. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112411.

12. *Hosseini T., Selomulya C., Haque N., Zhang L.* Indirect carbonation of victorian brown coal fly ash for $CO_2$ sequestration: Multiple-cycle leaching-carbonation and magnesium leaching kinetic modeling // Energy & Fuels. 2014, vol. 28, no. 10, pp. 6481—6493. DOI: 10.1021/ef5014314.

13. *Mustafa J., Mourad A. A.-H. I., Al-Marzouqi A. H., El-Naas M. H.* Simultaneous treatment of reject brine and capture of carbon dioxide. A comprehensive review // Desalination. 2020, vol. 483, article 114386. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114386.

14. *Коссович Е. Л., Андреева Ю. Е., Гаврилова Д. И., Эпштейн С. А., Добрякова Н. Н.* Проблемы утечки углекислого газа из геологических хранилищ // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12. — С. 46—54. DOI: 10. 25018/0236_1493_2022_12_0_46.

15. *Fan L., Mu Y., Feng J., Cheng F., Zhang M., Guo M.* In-situ Fe/Ti doped amine-grafted silica aerogel from fly ash for efficient $CO_2$ capture: Facile synthesis and super adsorption performance // Chemical Engineering Journal. 2023, vol. 452, article 138945. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138945.

16. *Li X., Wang Z., Mei Y., Feng R., Liu Z., Huang J., Dong L., Fang Y.* Alumina-extracted residue-derived silica foams with ultra-large pore volume for highly superior post-combustion $CO_2$ capture // Fuel. 2022, vol. 316, article 123231. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123231.

17. *Bartoňová L.* Unburned carbon from coal combustion ash: An overview // Fuel Processing Technology. 2015, vol. 134, pp. 136—158. DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.01.028.

18. *Han L., Wang X., Wu B., Zhu S., Wang J., Zhang Y.* In-situ synthesis of zeolite X in foam geopolymer as a $CO_2$ adsorbent // Journal of Cleaner Production. 2022, vol. 372, article 133591. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133591.

19. *Zhang Y., Gao Y., Pfeiffe H., Louis B., Sun L., O'Hare D., Wang Q.* Recent advances in lithium containing ceramic based sorbents for high-temperature $CO_2$ capture // Journal of Materials Chemistry A. 2019, vol. 7, no. 14, pp. 7962 – 8005. DOI: 10.1039/C8TA08932A.

20. *Ji L., Yu H., Zhang R., French D., Grigore M., Yu B., Wang X., Yu J., Zhao S.* Effects of fly ash properties on carbonation efficiency in $CO_2$ mineralisation // Fuel Processing Technology. 2019, vol. 188, pp. 79 – 88. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.01.015.

21. *Nawar A., Ali M., Waqas A., Javed A., Iqbal N., Khan R.* Effect of different activation processes on CaO/Fly Ash Mixture for $CO_2$ Capture // Energy & Fuels. 2019, vol. 34, no. 2, pp. 2035 – 2044. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b03520.

22. *Chen J., Shen Y., Chen Z., Fu C., Li M., Mao T.* Accelerated carbonation of ball-milling modified MSWI fly ash: Migration and stabilization of heavy metals // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023, vol. 11, no. 2, article 109396. DOI: 10.1016/j.jece.2023.109396.

23. *Павлов В. Ф., Шабанов В. Ф.* Использование явления самораспространяющейся кристаллизации для получения стеклокристаллических материалов // Стекло и керамика. – 2003. – Т. 76. – № 12. – С. 11 – 13.

24. *Stebeleva O. P., Kashkina L. V., Minakov A. V., Vshivkova O. A.* Impact of hydrodynamic cavitation on the properties of coal-water fuel: An experimental study // ACS Omega. 2022, vol. 7, pp. 37369 – 37378. DOI: 10.1021/acsomega.2c03979.

25. *Постников А. В.* Динамика коллапса полусферического кавитационного пузырька в контакте с твердой границей // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2020. – № 4. – С. 24 – 34. DOI: 10.31857/S056852812004009X.

26. *Stebeleva O. P., Minakov A. V.* Application of cavitation in oil processing: An overview of mechanisms and results of treatment // ACS Omega. 2021, vol. 6, pp. 31411 – 31420. DOI: 10.1021/acsomega.1c05858.

27. *El-Naas M. H., Mohammad A. F., Suleiman M. I., Al-Musharfy M., Al-Marzouqi A. H.* A new process for the capture of $CO_2$ and reduction of water salinity // Desalination. 2017, vol. 411, pp. 69 – 75. DOI: 10.1016/j.desal.2017.02.005.

28. *Петраковская Э. А., Исакова В. Г., Баюков О. А., Великанов Д. А.* Суперпарамагнетизм частиц магнетита в порошковом фуллерите C60 // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75. – С. 117 – 120.

29. *Garcia S., Kaminska S., Mercedes Maroto-Valer M.* Underground carbon dioxide storage in saline formations // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Waste and Resource Management. 2010, vol. 163, no. 2, pp. 77 – 88. DOI: 10.1680/warm.2010.163.2.77. ГИАБ

## REFERENCES

1. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Shukla P. R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J. B. R., Chen Y., Zhou X., Gomis M. I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., Waterfield T. *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* IPCC, 2018: Summary for Policymakers. Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3 – 24. DOI: 10.1017/9781009157940.001.

2. Alterary S. S., Marei N. H. Fly ash properties, characterization, and applications. A review. *Journal of King Saud University – Science.* 2021, vol. 33, no. 6, article 101536. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101536.

3. Nayak D. K., Abhilash P. P., Singh R., Kumar R., Kumar V. Fly ash for sustainable construction. A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials.* 2022, vol. 6, article 100143. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100143.

4. Ankur N., Singh N. Performance of cement mortars and concretes containing coal bottom ash. A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2021, vol. 149, article 111361. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111361.

5. Dindi A., Quang D. V., Vega L. F., Nashef E., Abu-Zahra M. R. M. Applications of fly ash for $CO_2$ capture, utilization, and storage. *Journal of $CO_2$ Utilization.* 2019, vol. 29, pp. 82 – 102. DOI: 10.1016/j.jcou.2018.11.011.

6. Li N., Mo L., Unluer C. Emerging $CO_2$ utilization technologies for construction materials. A review. *Journal of $CO_2$ Utilization.* 2022, vol. 65, article 102237. DOI: 10.1016/j.jcou.2022.102237.

7. Yan F., Jiang J., Liu N., Gao Y., Meng Y., Li K., Chen X. Green synthesis of mesoporous $\gamma$-$Al_2O_3$ from coal fly ash with simultaneous on-site utilization of $CO_2$. *Journal of Hazardous Materials.* 2018, vol. 359, pp. 535 – 543. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.07.104.

8. Dong X., Jin B., Cao S., Meng F., Chen T., Ding Q., Tong C. Facile use of coal combustion fly ash (CCFA) as Ni-Re bimetallic catalyst support for high-performance $CO_2$ methanation. *Waste Management*. 2020, vol. 107, pp. 244—251. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.014.

9. Liu W., Su S., Xu K., Chen Q., Xu J., Sun Z., Wang Y., Hu S., Wang X., Xue Y., Xiang J. $CO_2$ sequestration by direct gas—solid carbonation of fly ash with steam addition. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 178, pp. 98—107. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.281.

10. Bauer M., Gassen N., Stanjek H., Peiffer S. Carbonation of lignite fly ash at ambient T and P in a semi-dry reaction system for $CO_2$ sequestration. *Applied Geochemistry*. 2011, vol. 26, no. 8, pp. 1502—1512. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2011.05.024.

11. Ho H.-J., Iizuka A., Shibata E. Utilization of low-calcium fly ash via direct aqueous carbonation with a low-energy input: Determination of carbonation reaction and evaluation of the potential for $CO_2$ sequestration and utilization. *Journal of Environmental Management*. 2021, vol. 288, article 112411. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112411.

12. Hosseini T., Selomulya C., Haque N., Zhang L. Indirect carbonation of victorian brown coal fly ash for $CO_2$ sequestration: Multiple-cycle leaching-carbonation and magnesium leaching kinetic modeling. *Energy & Fuels*. 2014, vol. 28, no. 10, pp. 6481—6493. DOI: 10.1021/ef5014314.

13. Mustafa J., Mourad A. A.-H. I., Al-Marzouqi A. H., El-Naas M. H. Simultaneous treatment of reject brine and capture of carbon dioxide. A comprehensive review. *Desalination*. 2020, vol. 483, article 114386. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114386.

14. Kossovich E. L., Andreeva Y. E., Gavrilova D. I., Epshtein S. A., Dobryakova N. N. Problems of carbon dioxide leakage from geological storage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12, pp. 46—54. [In Russ]. DOI: 10. 25018/0236_1493_2022_12_0_46.

15. Fan L., Mu Y., Feng J., Cheng F., Zhang M., Guo M. In-situ Fe/Ti doped amine-grafted silica aerogel from fly ash for efficient $CO_2$ capture: Facile synthesis and super adsorption performance. *Chemical Engineering Journal*. 2023, vol. 452, article 138945. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138945.

16. Li X., Wang Z., Mei Y., Feng R., Liu Z., Huang J., Dong L., Fang Y. Alumina-extracted residue-derived silica foams with ultra-large pore volume for highly superior post-combustion $CO_2$ capture. *Fuel*. 2022, vol. 316, article 123231. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123231.

17. Bartoňová L. Unburned carbon from coal combustion ash: An overview. *Fuel Processing Technology*. 2015, vol. 134, pp. 136—158. DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.01.028.

18. Han L., Wang X., Wu B., Zhu S., Wang J., Zhang Y. In-situ synthesis of zeolite X in foam geopolymer as a $CO_2$ adsorbent. *Journal of Cleaner Production*. 2022, vol. 372, article 133591. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133591.

19. Zhang Y., Gao Y., Pfeiffe H., Louis B., Sun L., O'Hare D., Wang Q. Recent advances in lithium containing ceramic based sorbents for high-temperature $CO_2$ capture. *Journal of Materials Chemistry A*. 2019, vol. 7, no. 14, pp. 7962—8005. DOI: 10.1039/C8TA08932A.

20. Ji L., Yu H., Zhang R., French D., Grigore M., Yu B., Wang X., Yu J., Zhao S. Effects of fly ash properties on carbonation efficiency in $CO_2$ mineralisation. *Fuel Processing Technology*. 2019, vol. 188, pp. 79—88. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.01.015.

21. Nawar A., Ali M., Waqas A., Javed A., Iqbal N., Khan R. Effect of different activation processes on CaO/Fly Ash Mixture for $CO_2$ Capture. *Energy & Fuels*. 2019, vol. 34, no. 2, pp. 2035—2044. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b03520.

22. Chen J., Shen Y., Chen Z., Fu C., Li M., Mao T. Accelerated carbonation of ball-milling modified MSWI fly ash: Migration and stabilization of heavy metals. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023, vol. 11, no. 2, article 109396. DOI: 10.1016/j.jece.2023.109396.

23. Pavlov V. F., Shabanov V. F. Use of self-propagating crystallization phenomenon in the production of glass ceramic materials. *Steklo i Keramika*. 2003, vol. 76, no. 12, pp. 11—13. [In Russ].

24. Stebeleva O. P., Kashkina L. V., Minakov A. V., Vshivkova O. A. Impact of hydrodynamic cavitation on the properties of coal-water fuel: An experimental study. *ACS Omega*. 2022, vol. 7, pp. 37369—37378. DOI: 10.1021/acsomega.2c03979.

25. Postnikov A. V. Collapse dynamics of hemispherical cavitation bubble in contact with a solid boundary. *Izvestia RAN, Mekhanika Zhidkosti i Gaza*. 2020, no. 4, pp. 24—34. [In Russ]. DOI: 10.31857/S056852812004009X.

26. Stebeleva O. P., Minakov A. V. Application of cavitation in oil processing: An overview of mechanisms and results of treatment. *ACS Omega*. 2021, vol. 6, pp. 31411—31420. DOI: 10.1021/acsomega.1c05858.

27. El-Naas M. H., Mohammad A. F., Suleiman M. I., Al-Musharfy M., Al-Marzouqi A. H. A new process for the capture of $CO_2$ and reduction of water salinity. *Desalination*. 2017, vol. 411, pp. 69—75. DOI: 10.1016/j.desal.2017.02.005.

28. Petrakovskaya É. A., Isakova V. G., Bayukov O. A., Velikanov D. A. Superparamagnetism of magnetite particles in C60 fullerite powder. *Technical Physics*. 2005, vol. 75, pp. 117 – 120. [In Russ].

29. Garcia S., Kaminska S., Mercedes Maroto-Valer M. Underground carbon dioxide storage in saline formations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Waste and Resource Management*. 2010, vol. 163, no. 2, pp. 77 – 88. DOI: 10.1680/warm.2010.163.2.77.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Стебелева Олеся Павловна*[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: opstebeleva@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9559-1522,
*Кашкина Людмила Васильевна*[1] — канд. физ.-мат. наук,
доцент, e-mail: sfugeo@mail.ru,
*Баюков Олег Артемьевич* — д-р физ.-мат. наук,
ведущий научный сотрудник, ФИЦ КНЦ СО РАН,
e-mail: helg@iph.krasn.ru,
*Минаков Андрей Викторович*[1] — д-р физ.-мат. наук,
доцент, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
СО РАН, e-mail: tov-andrey@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1956-5506,
*Пикурова Елена Витальевна*[1] — канд. хим. наук,
научный сотрудник, Институт химии и химической технологии
СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН;
магистрант, e-mail: vitaelen@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-7558-6358,
[1] Сибирский федеральный университет.
**Для контактов**: Стебелева О.П., e-mail: opstebeleva@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*O.P. Stebeleva*[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: opstebeleva@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9559-1522,
*L.V. Kashkina*[1], Cand. Sci. (Phys. Mathem.),
Assistant Professor, e-mail: sfugeo@mail.ru,
*O.A. Bayukov*, Dr. Sci. (Phys. Mathem.),
Leading Researcher, Federal Research Center
«Krasnoyarsk Science Center of the Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences»,
660036, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: helg@iph.krasn.ru,
*A.V. Minakov*[1], Dr. Sci. (Phys. Mathem.),
Assistant Professor, Kutateladze Institute of Thermophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
630090, Novosibirsk, Russia, e-mail: tov-andrey@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1956-5506,
*E.V. Pikurova*[1], Cand. Sci. (Chem.), Researcher,
Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, 660036, Krasnoyarsk, Russia;
Master's Degree Student, e-mail: vitaelen@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-7558-6358,
[1] Siberian Federal University, 660074, Krasnoyarsk, Russia.
**Corresponding author**: O.P. Stebeleva, e-mail: opstebeleva@mail.ru.

Получена редакцией 17.05.2023; получена после рецензии 20.09.2023; принята к печати 10.01.2024.
Received by the editors 17.05.2023; received after the review 20.09.2023; accepted for printing 10.01.2024.