

УДК 661.2; 666.9.015.423; 666.123.32; 546.221.1
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4488
Шифр специальности ВАК: 2.6.7

Возможность переработки фосфогипса с получением подщелачивающего реагента

Д.И. Монастырский, М.А. Куликова, Н.П. Шабельская[✉], В.А. Ульянова, М.А. Егорова

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Россия, г. Новочеркасск*

[✉]nina_shabelskaya@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Определяется необходимостью разработки технологии утилизации твердых и жидких производственных отходов с получением органо-неорганического удобрения. Рост промышленного производства сопровождается увеличением отходов. В современном обществе уделяется значительное внимание проблеме переработки техногенных отходов с получением востребованных продуктов. Фосфогипс является основным побочным продуктом производства удобрений и фосфорной кислоты, это многотоннажный отход, его складирование приводит к выводу из обращения обширных территорий. Жидкие отходы свинокомплексов также необходимо перерабатывать в органические удобрения. **Цель.** Изучение процесса термообработки фосфогипса в присутствии восстановителя для получения подщелачивающего реагента. Это позволит в дальнейшем организовать процесс переработки жидких и твердых сельскохозяйственных и промышленных отходов и производить отечественные органоминеральные удобрения. **Методы.** Термообработка фосфогипса в присутствии восстановителя с последующим приготвлением водной суспензии для получения агента, снижающего кислотность животноводческих стоков. Полученные в ходе исследования образцы термообработанного фосфогипса были охарактеризованы с помощью рентгенофазового анализа, электронной микроскопии. На их основе были получены суспензии с различным значением pH. **Результаты и выводы.** Проведено изучение процесса термообработки крупнотоннажного неорганического отхода химической промышленности – фосфогипса. Установлено, что суспензия термообработанного в присутствии восстановителя фосфогипса имеет повышенные значения водородного показателя, что может быть использовано для получения подщелачивающего реагента для обработки сельскохозяйственных отходов. Выявлены оптимальные технологические режимы получения реагента, имеющего максимальное значение pH суспензии: количество введенного восстановителя – 0,16 моль/моль CaSO₄, температура термообработки 1000 °С.

Ключевые слова: восстановление фосфогипса, древесный уголь, отходы производства фосфорной кислоты, переработка фосфогипса

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания, проект FENN-2024-0006 «Разработка технологии неорганических ультрафиолетовых красителей». Авторы выражают благодарность сотруднику центра коллективного пользования Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова кандидату технических наук Алексею Николаевичу Яценко за помощь в съемке и расшифровке данных РФА и выполнении микроскопических исследований.

Для цитирования: Возможность переработки фосфогипса с получением подщелачивающего реагента / Д.И. Монастырский, М.А. Куликова, Н.П. Шабельская, В.А. Ульянова, М.А. Егорова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 183–190. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4488

UDC 661.2; 666.9.015.423; 666.123.32; 546.221.1
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4488

Possibility of processing phosphogypsum to obtain an alkalizing reagent

D.I. Monastyrsky, M.A. Kulikova, N.P. Shabelskaya[✉], V.A. Ulyanova, M.A. Egorova

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

[✉]nina_shabelskaya@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to develop a technology for the disposal of solid and liquid industrial waste to obtain organic-inorganic fertilizer. The growth of industrial production is accompanied by an increase in waste. In modern society, considerable attention is paid to the problem of processing man-made waste to obtain demanded products. Phosphogypsum is the main by-product of the production of fertilizers and phosphoric acid, it is a multi-tonnage waste, its storage leads to the withdrawal of vast territories from circulation. Liquid waste from pig farms also needs to be processed into organic fertilizers. **Aim.** To study the process of heat treatment of phosphogypsum in the presence of a reducing agent to obtain an alkalizing reagent. This will make it possible to further organize processing liquid and solid agricultural and industrial waste and produce domestic organic fertilizers. **Methods.** Heat treatment of phosphogypsum in the presence of a reducing agent, followed by the preparation of an aqueous suspension to obtain an agent that reduces the acidity of livestock effluents. The samples of heat-treated phosphogypsum obtained during the study were characterized by X-ray phase analysis, electron microscopy. Suspensions with different pH values were obtained on their basis. **Results and conclusions.** The authors have studied heat treatment of large-tonnage inorganic waste of the chemical industry – phosphogypsum. It was found that the suspension of phosphogypsum heat-treated in the presence of a reducing agent has increased values of the hydrogen index, which can be used to obtain an alkalizing reagent for treating agricultural waste. The authors revealed the optimal technological modes of obtaining a reagent having the maximum pH value of the suspension: the amount of the introduced reducing agent is 0.16 mol/mol CaSO_4 , the heat treatment temperature is 1000 °C.

Keywords: phosphogypsum recovery, charcoal, phosphoric acid production waste, phosphogypsum processing

Acknowledgements. This research was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment of FENN-2024-0006 – “Development of inorganic ultraviolet dyes technology” project. The authors express their gratitude to Alexey N. Yatsenko, Cand. Sc., employee of the Center for Collective Use of the Platonov South-Russian State Polytechnic University (NPI), for assistance in shooting and decoding the X-ray data and performing microscopic studies.

For citation: Monastyrsky D.I., Kulikova M.A., Shabelskaya N.P., Ulyanova V.A., Egorova M.A. Possibility of processing phosphogypsum to obtain an alkalizing reagent. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 183–190. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4488

Введение

Рост промышленного производства в современном обществе сопровождается увеличением отходов [1, 2]. В современной научной литературе [3–6] уделяется значительное внимание проблеме переработки техногенных отходов с получением востребованных продуктов. Фосфогипс является основным побочным продуктом производства удобрений и фосфорной кислоты. В настоящее время по оценкам экспертов [7] в России уже накоплено около 140 млн т этого отхода, который ежегодно увеличивается еще на 10 %. Фосфогипс хранят на открытых площадках, что может приводить к возникновению экологических проблем. Это привело к стабильно высокому интересу исследователей к поиску путей использования фосфогипса в качестве альтернативного сырья для различных целей: производства строительных материалов – цемента [8, 9], газобетона [10], в процессах химической газификации [11, 12] и т. п. Однако фосфогипс может быть использован как исходное вещество для получения ценных продуктов. Ряд исследований посвящен этим вопросам. Например, в [13] предложено его применение в процессе циклической газификации угля, в работе [14] – как пигмента, в [15] изучена возможность очистки водных растворов от остатков лекарственных веществ с помощью композиций на основе фосфогипса.

В ряде исследований [16, 17] изучена возможность восстановления фосфогипса в сульфид кальция под

действием газообразного оксида углерода (II) [16], водорода [17]. В литературе не достаточно полно освещен вопрос условий термообработки фосфогипса с получением других продуктов. В этой связи основную цель работы можно сформулировать как изучение процесса термообработки фосфогипса в присутствии восстановителя для получения подщелачивающего реагента. Решение поставленных задач позволит в дальнейшем организовать процесс переработки жидких и твердых сельскохозяйственных и промышленных отходов и производить отечественные органоминеральные удобрения.

Объекты и методика исследования

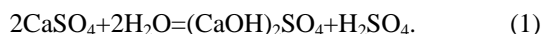
В [18, 19] была предложена методика восстановления фосфогипса в кальций-содержащий продукт на основе сульфида. В данном исследовании был применен фосфогипс для сельского хозяйства марки ТУ 113-08-418-94 (содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ не менее 98 %) в количестве 0,1 моль. Для создания восстановительной атмосферы использовали древесный березовый уголь (ГОСТ 7657-84). Образцы отвешивали в соответствии с заданной рецептурой, перемешивали в смесителе, помещали в реакционном сосуде в рабочее пространство печи. Термообработку проводили при температурах 900 и 1000 °C с выдержкой при конечной температуре в течение 1 ч. Скорость подъема температуры 13 °/мин. Охлаждение образцов медленное – с печью, до комнатной температуры.

Полученные образцы были охарактеризованы с помощью рентгенофазового анализа (использовали рентгеновский дифрактометр марки ARL X'TRA, Cu-K α излучение). СЭМ-изображения образцов были получены на сканирующем электронном микроскопе Quanta 200.

Термообработанные образцы фосфогипса были изучены в качестве потенциального подщелачивающего агента. С этой целью был приготовлен ряд суспензий в дистиллированной воде, в серии экспериментов концентрация составляла 5–20 мас. %. Суспензию интенсивно перемешивали в течение 10 минут при температуре 20 °С, далее следовало отстаивание в течение 10 минут при комнатной температуре, при помощи рН-метра марки рН-150М измеряли рН. Параллельно проводили пять измерений. Был проведен расчет погрешности измерений, и как результат использовали среднее значение (при доверительном интервале 95 %).

Результаты исследования и их обсуждение

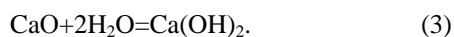
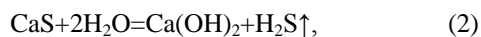
Согласно проведенным исследованиям, суспензия фосфогипса в воде с концентрацией 10 % имеет значение рН 7,14 вследствие протекания реакции гидролиза (1)



Как известно, сульфат кальция – соль, образованная сильной кислотой и основанием средней силы, его гидролиз проходит с образованием основной соли – $(\text{CaOH})_2\text{SO}_4$ – и серной кислоты. Растворимость сульфата кальция в воде при комнатной температуре составляет 0,015 моль/л. Рассчитанное (теоретическое) значение кислотности полученного раствора с концентрацией суспензии 0,015 моль/л составляет рН=7,2. Эти данные хорошо согласуются с полученными экспериментальными результатами.

В исследовании [16] отмечено, что термообработка фосфогипса при температуре 600–800 °С в присутствии большого количества восстановителя (в качестве восстановителя использован оксид углерода (II), соотношение CO/CaSO₄ более 6,81 моль/моль) приводит к получению в восстановленном продукте в основном сульфида кальция (CaS), при более высокой температуре (1000–1500 °С) и меньшем содержании восстановителя образуется оксид кальция (CaO).

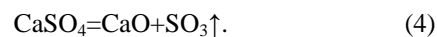
Гидролиз сульфида кальция (2) будет приводить к образованию суспензии со щелочной реакцией, как и взаимодействие оксида кальция с водой (3)



Очевидно, что в случае протекания реакции (2) среда суспензии будет более щелочной.

Для поиска условий проведения реакции при выполнении этого исследования исходили из предположения, что для получения подщелачивающего реагента из фосфогипса следует стремиться к получению образцов, содержащих оксид кальция в большем количестве.

Термическая диссоциация сульфата кальция по реакции (4) возможна при температуре выше 1200 °С [16].



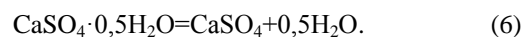
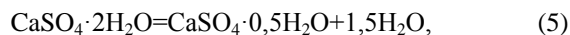
Проведение реакции в присутствии восстановителя [16] позволяет снизить температуру синтеза. В этой связи было проведено исследование возможности получения при пониженной (900–1000 °С) температуре восстановленных образцов фосфогипса с преобладанием в продукте оксида кальция. Количество восстановителя и температурная характеристика процесса указаны в таблице.

Таблица. Количество восстановителя и условия термообработки

Table. Amount of reducing agent and heat treatment conditions

| Номер образца Sample number | Количество восстановителя, моль/моль CaSO ₄ Amount of reducing agent, mol/mol CaSO ₄ | Температура термообработки Heat treatment temperature, °C | рН 10%-й суспензии pH of 10 % suspension |
|--------------------------------|---|--|---|
| 1 | 0,16 | 900 | 11,3 |
| 2 | 0,22 | | 11,3 |
| 3 | 0,26 | | 11,3 |
| 4 | 0,16 | 1000 | 12,3 |
| 5 | 0,22 | | 12,2 |
| 6 | 0,26 | | 11,6 |

В процессе термообработки основная составляющая фосфогипса – двухводный сульфат кальция CaSO₄·2H₂O – ступенчато (5), (6) дегидратируется с образованием безводного сульфата кальция CaSO₄.



На рис. 1 приведены результаты рентгенофазового анализа. Согласно полученным результатам, образец, термообработанный без восстановителя, представляет собой безводный сульфат кальция (PDF Number 010-74-2421, Calcium Sulfate), который образуется при дегидратации исходного сульфата кальция по реакциям (5), (6) (рис. 1, а).

Образец фосфогипса, подвергнутый термообработке в присутствии восстановителя, содержит сульфат кальция и оксид кальция (PDF Number 010-770-9574, Calcium Oxide). Присутствие восстановителя предположительно снижает температуру образования оксида кальция вследствие протекания реакции (7)



В [19] было установлено, что при избыточном количестве восстановителя протекает в основном реакция, описываемая уравнением (8), с образованием сульфида кальция.



СЭМ-изображения образцов приведены на рис. 2. Видно, что термообработка при температуре 1000 °С без восстановителя (рис. 2, а) приводит к формированию кристаллов пластинчатой формы. При термообработке в присутствии восстановителя (рис. 2, б) кристаллы теряют четкость, на их поверхности видны трещины, поры, которые могут быть связаны с частичной деструкцией материала.

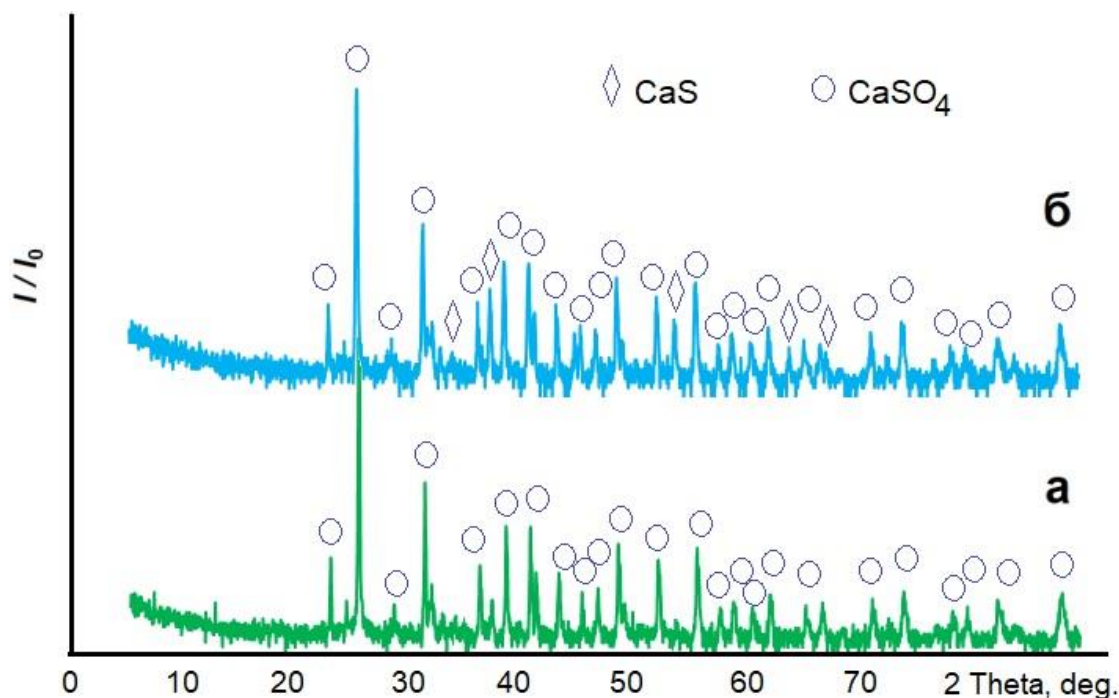


Рис. 1. Рентгенограмма образцов фосфогипса, термообработка при температуре 1000 °С: а) без восстановителя; б) в присутствии 0,16 моль восстановителя

Fig. 1. Radiograph of phosphogypsum samples, heat treatment at a temperature of 1000 °С: а) without reducing agent; б) with 0.16 mol of reducing agent

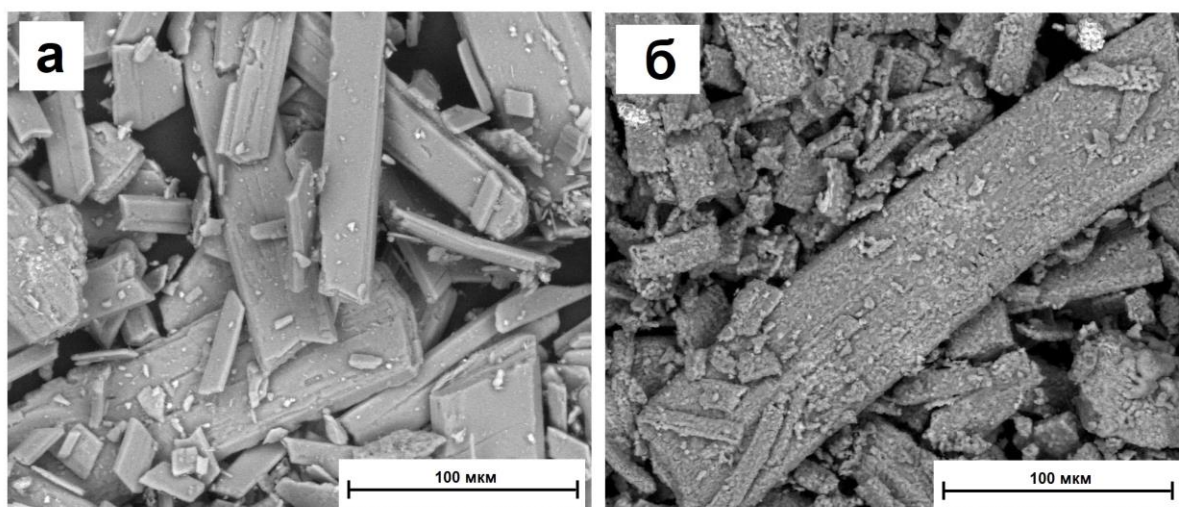


Рис. 2. СЭМ-изображения образцов фосфогипса, термообработанного при температуре 1000 °С без восстановителя (а) и в присутствии восстановителя (б)

Fig. 2. SEM images of phosphogypsum samples heat-treated at 1000 °С without a reducing agent (а) and with a reducing agent (б)

Термообработанные образцы фосфогипса были использованы для приготовления суспензий для обработки жидких отходов. Задачей исследования был выбор суспензии с наибольшим значением pH. В таблице и на рис. 3 приведены результаты эксперимента для 10%-й суспензии фосфогипса в воде.

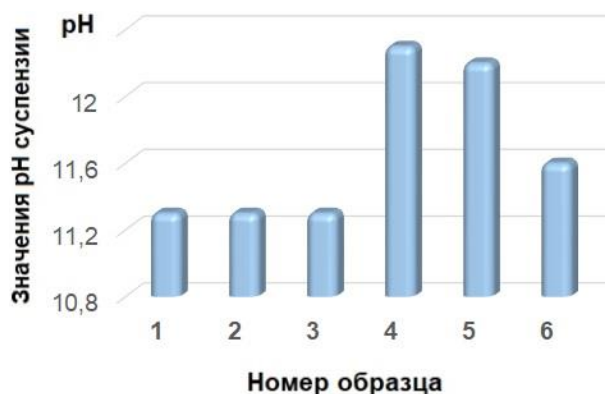


Рис. 3. Значения pH суспензии образцов фосфогипса, термообработанных в присутствии восстановителя. Нумерация образцов соответствует таблице

Fig. 3. pH values of the suspension of phosphogypsum samples heat-treated with a reducing agent. The numbering of the samples corresponds to the Table

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что суспензии всех образцов, термообработанных в присутствии восстановителя, имеют более высокое значение pH по сравнению с суспензией исходного фосфогипса той же концентрации. Интересным экспериментальным фактом является то, что значения кислотности (pH) суспензий всех образцов, подвергнутых термообработке при температуре 900 °С, оказались одинаковыми. Для образцов, термообработанных при температуре 1000 °С, значение pH суспензии уменьшается с увеличением количества введенного восстановителя. Полученный результат может быть связан с тем, что температура термообработки 900 °С приводит к образованию одинакового количества сульфида и оксида кальция по реакциям (7), (8). При температуре термообработки 1000 °С, по-видимому, при малом количестве введенного восстановителя преобладает реакция (7), с повышением количества восстановителя начинает параллельно протекать также реакция (8). Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследований других научных групп [16, 20].

На рис. 4 приведены значения pH растворов с различной концентрацией введенного фосфогипса.

При увеличении содержания восстановленного фосфогипса значения pH раствора увеличиваются до значения 10 мас. %, а далее практически не из-

меняются. Можно считать, что введение 10 % фосфогипса в суспензию будет оптимальным.



Рис. 4. Значения pH суспензии фосфогипса с различным содержанием реагента

Fig. 4. pH values of phosphogypsum suspension with different reagent content

Таким образом, для дальнейшего использования в качестве реагента наиболее перспективным представляется образец № 4. В исследовании [21] в качестве перспективного подщелачивающего агента использован раствор, имеющий значения pH 10–12. В этой связи можно заключить, что разработанный способ позволяет получать реагент с улучшенными характеристиками. Оптимальными технологическими режимами будут: количество введенного восстановителя – 0,16 моль/моль CaSO₄, температура термообработки 1000 °С.

Полученные результаты открывают широкие перспективы для разработки основ технологии переработки многотоннажных отходов химической промышленности – фосфогипса – для получения кальций-содержащего органоминерального удобрения. Попутно будет решаться проблема высвобождения площадей, занятых под отходы.

Заключение

Таким образом, проведено изучение процесса термообработки крупнотоннажного неорганического отхода химической промышленности – фосфогипса. Установлено, что суспензия термообработанного в присутствии восстановителя фосфогипса имеет повышенные значения водородного показателя, что может быть использовано для получения подщелачивающего реагента для обработки сельскохозяйственных отходов. Выявлены оптимальные технологические режимы получения реагента, имеющего максимальное значение pH суспензии: количество введенного восстановителя –

0,16 моль/моль CaSO₄, температура термообработки 1000 °С.

Результаты исследований могут быть использованы для получения отечественных органоминеральных

кальций-содержащих удобрений. При этом попутно будет решаться проблема переработки крупнотоннажных твердых отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Использование алюмосодержащих отходов производства металлического хрома для создания кислотоупорных плиток // *Стекло и керамика*. – 2022. – Т. 95. – № 8. – С. 52–59. DOI: 10.14489/glc.2022.08.pp.052-059.
2. Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е. Бруситсодержащие отходы производства огнеупорных материалов в процессах очистки сточных вод // *Стекло и керамика*. – 2022. – Т. 95. – № 7. – С. 58–63. DOI: 10.14489/glc.2022.07.pp.058-063.
3. Мурзин Н.В., Тальгамер Б.Л. Анализ структуры техногенных россыпей и оценка опыта их разработки // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 147–153. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/2/3829>.
4. Шаповалов В.В., Козырь Д.А. Ресурсосберегающая технология утилизации породных отвалов горнодобывающих производств // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 175–184. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3965>.
5. Новиков А.С., Мостовщиков А.В., Сударев Е.А. Сравнительный анализ физико-химических методов переработки алюминиевых отходов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3991>.
6. Переработка твердого остатка пиролиза автомобильных шин / Т.В. Бухаркина, С.В. Вержичинская, И.Г. Тарханова, А.В. Коновалов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 79–90. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/8/4017>.
7. Условия получения фосфогипса как отхода – побочного продукта производства азотно-фосфорных удобрений / А.В. Кочетков, Н.В. Щеголева, С.А. Коротковский, В.В. Талалай, Ю.Э. Васильев, И.Г. Шашков // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. – 2019. – № 2. DOI: 10.15862/01SATS219. URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS219.pdf> (дата обращения: 15.11.2023).
8. In-situ remediation of phosphogypsum in a cement-free pathway: Utilization of ground granulated blast furnace slag and NaOH pretreatment / Q. Chen, S. Sun, Y. Wang, Q. Zhang, L. Zhu, Y. Liu // *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 313. – № 137412.
9. Recycling phosphogypsum as a sole calcium oxide source in calcium sulfoaluminate cement and its environmental effects / S. Wu, X. Yao, C. Ren, Y. Yao, W. Wang // *Journal of Environmental Management*. – 2020. – Vol. 271. – № 110986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110986>.
10. Use of untreated phosphogypsum as a raw material for autoclaved aerated concrete preparation / Y. Luo, B. Ma, F. Liang, Z. Xue, B. Qian, J. Wang, L. Zhou, J. Zang, R. Liang, Y. Li, Y. Hu // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 641. – № 105607.
11. Study on the mechanism and reaction characteristics of metal-supported phosphogypsum as oxygen carrier in a chemical looping gasification application / J. Yang, Y. Ren, S. Chen, J. Lu // *Journal of Environmental Sciences*. – 2024. – Vol. 138. – P. 428–438.
12. Chemical looping combustion of sulfur paste to SO₂ by phosphogypsum oxygen carrier for sulfur acid production / J. Ma, J. Xu, C. Liu, Q. Yi, M. Zheng, L. Cheng, T. Song // *Fuel*. – 2022. – Vol. 323. – № 124386.
13. Full-loop CFD simulation of lignite Chemical Looping Gasification with phosphogypsum as oxygen carrier using a circulating fluidized bed / W. Du, L. Ma, Q. Pan, Q. Dai, M. Zhang, X. Yin, X. Xiong, W. Zhang // *Energy*. – 2023. – Vol. 2621. – № 125451.
14. Use of an industrial by-product phosphogypsum in the production of white textured paints / Z. Valančius, R. Vaickelionienė, G. Vaickelionis, P. Makčinskas // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 38020. – № 134888.
15. Enhanced removal of sulfonamide antibiotics from water by phosphogypsum modified biochar composite / Z. Jiang, M. Chen, X. Lee, Q. Feng, N. Cheng, X. Zhang, S. Wang, B. Wang // *Journal of Environmental Sciences (China)*. – 2023. – Vol. 130. – P. 174–186.
16. Reaction mechanism of thermal decomposition of Phosphogypsum / F. Laasri, A.C. Garcia, M. Latifi, J. Chaouki // *Waste Management*. – 2023. – Vol. 171. – P. 482–490.
17. Reduction of phosphogypsum to calcium sulfide (CaS) using metallic iron in a hydrochloric acid medium / M. Alla, A. Harrou, M.L. Elhafiany, D. Azerkane, M.E. Ouahabi, E.K. Gharibi // *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*. – 2022. – Vol. 197. – Iss. 10. – P. 1026–1035. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426507.2022.2052881>.
18. Синтез сульфида кальция из фосфогипса / Н.П. Шабельская, О.А. Меденников, А.Н. Яценко, В.А. Таранушич, Ю.А. Гайдукова, М.Н. Астахова, В.А. Ульянова // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2020. – № 4 (208). – С. 63–67.
19. Меденников О.А., Шабельская Н.П. Технология переработки фосфогипса в люминесцентный краситель на основе сульфида кальция // *Тонкие химические технологии*. – 2022. – Т. 17. – № 4. – С. 357–368.
20. Ангидритовые вяжущие из фосфогипса и доломита / А.А. Сагындыков, Б.А. Нурлыбаев, Н.Т. Карабаев, А.К. Медетов // *Механика и технологии. Научный журнал*. – 2022. – № 1 (75). – С. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.55956/DIOB2736>.
21. Способ подготовки сточных вод для сельскохозяйственного использования: пат. 2683759 Российская Федерация, МПК C02F 1/52, C05F 3/02, C05F 7/00, C02F 103/20, № 2018119414; заявл. 25.05.2018; опубл. 01.04.2019, Бюл. № 10.

Сведения об авторах

Даниил Иванович Монастырский, ассистент кафедры экологии и промышленной безопасности, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. monastirskiy_di@npi-tu.ru

Марина Анатольевна Куликова, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и промышленной безопасности, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. <https://orcid.org/0000-0003-4000-0040>; m.kulikova@npi-tu.ru

Нина Петровна Шабельская, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой экологии и промышленной безопасности, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. <https://orcid.org/0000-0001-8266-2128>; n.shabelskaya@npi-tu.ru

Вера Андреевна Ульянова, магистрант кафедры экологии и промышленной безопасности, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. npi-20@yandex.ru

Марина Александровна Егорова, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и промышленной безопасности, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. <https://orcid.org/0000-0003-2939-5141>; m.egorova@npi-tu.ru

Поступила в редакцию: 02.12.2023

Поступила после рецензирования: 09.04.2024

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. The use of aluminum-containing waste from the production of metallic chromium to create acid-resistant tiles. *Glass and ceramics*, 2022, vol. 95, no. 8, pp. 52–59. (In Russ.) DOI: 10.14489/glc.2022.08.pp.052-059.
2. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Brucite-containing waste products of refractory materials in wastewater treatment processes. *Glass and ceramics*, 2022, vol. 95, no. 7, pp. 58–63. (In Russ.) DOI: 10.14489/glc.2022.07.pp.058-063.
3. Murzin N.V., Talgamer B.L. Analysis of the structure of technogenic placers and evaluation of their development experience. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 147–153. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/2/3829>
4. Shapovalov V.V., Kozyr D.A. Resource-saving technology for utilization of waste dumps of mining industries. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 175–184. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3965>
5. Novikov A.S., Mostovshchikov A.V., Sudarev E.A. Comparative analysis of physico-chemical methods for processing aluminum waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 53–61. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3991>
6. Bukharkina T.V., Verzhichinskaya S.V., Tarkhanova I.G., Konovalov A.V. Recycling of solid residue of pyrolysis of car tires. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 8, pp. 79–90. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/8/4017>
7. Kochetkov A.V., Shchegoleva N.V., Korotkovsky S.A., Talalai V.V., Vasiliev Yu.E., Shashkov I.G. Conditions for obtaining phosphogypsum as a waste by-product of the production of nitrogen-phosphorus fertilizers. *Online magazine "Transport facilities"*, 2019, no. 2. (In Russ.) DOI: 10.15862/01SATS219. Available at: <https://t-s.today/PDF/01SATS219.pdf> (accessed 15 November 2023).
8. Chen Q., Sun S., Wang Y., Zhang Q., Zhu L., Liu Y. In-situ remediation of phosphogypsum in a cement-free pathway: Utilization of ground granulated blast furnace slag and NaOH pretreatment. *Chemosphere*, 2023, vol. 313, no. 137412.
9. Wu S., Yao X., Ren C., Yao Y., Wang W. Recycling phosphogypsum as a sole calcium oxide source in calcium sulfoaluminate cement and its environmental effects. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 271, no. 110986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110986>.
10. Luo Y., Ma B., Liang F., Xue Z., Qian B., Wang J., Zhou L., Zang J., Liang R., Li Y., Hu Y. Use of untreated phosphogypsum as a raw material for autoclaved aerated concrete preparation. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 641, no. 105607.
11. Yang J., Ren Y., Chen S., Lu J. Study on the mechanism and reaction characteristics of metal-supported phosphogypsum as oxygen carrier in a chemical looping gasification application. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, vol. 138, pp. 428–438.
12. Ma J., Xu J., Liu C., Yi Q., Zheng M., Cheng L., Song T. Chemical looping combustion of sulfur paste to SO₂ by phosphogypsum oxygen carrier for sulfur acid production. *Fuel*, 2022, vol. 323, no. 124386.
13. Du W., Ma L., Pan Q., Dai Q., Zhang M., Yin X., Xiong X., Zhang W. Full-loop CFD simulation of lignite Chemical Looping Gasification with phosphogypsum as oxygen carrier using a circulating fluidized bed. *Energy*, 2023, vol. 2621, no. 125451.
14. Valančius Z., Vaickelionienė R., Vaickelionis G., Makčinskas P. Use of an industrial by-product phosphogypsum in the production of white textured paints. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 38020, no. 134888.
15. Jiang Z., Chen M., Lee X., Feng Q., Cheng N., Zhang X., Wang S., Wang B. Enhanced removal of sulfonamide antibiotics from water by phosphogypsum modified biochar composite. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2023, vol. 130, pp. 174–186.

16. Laasri F., Garcia A.C., Latifi M., Chaouki J. Reaction mechanism of thermal decomposition of Phosphogypsum. *Waste Management*, 2023, vol. 171, pp. 482–490.
17. Alla M., Harrou A., Elhafiany M.L., Azerkane D., Ouahabi M.E., Gharibi E.K. Reduction of phosphogypsum to calcium sulfide (CaS) using metallic iron in a hydrochloric acid medium. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 2022, vol. 197, no. 10, pp. 1026–1035. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426507.2022.2052881>.
18. Shabelskaya N.P., Medennikov A.A., Yatsenko A.N., Taranushich V.A., Gaidukova Yu.A., Astakhova M.N., Ulyanova V.A. Synthesis of calcium sulfide from phosphogypse. *Izvestia of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*, 2020, no. 4 (208), pp. 63–67. (In Russ.)
19. Medennikov O.A., Shabelskaya N.P. Technology of processing phosphogypse into a luminescent dye based on calcium sulfide. *Fine chemical technologies*, 2022, vol. 17, no. 4, pp. 357–368. (In Russ.)
20. Sagyndykov A.A., Nurlybaev B.A., Karabaev N.T., Medetov A.K. Anhydrite binders made of phosphogypse and dolomite. *Mechanics and Technologies. Scientific Journal*, 2022, no. 1 (75), pp. 71–77. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.55956/DIOB2736>.
21. Kolesnikova T.A., Kulikova M.A., Gribut E.A., Surzhko O.A. *Method of waste water treatment for agricultural use*. Patent RF, no. 2683759, 2019. (In Russ.)

Information about authors

Daniil I. Monastyrsky, Assistant, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russian Federation. monastirskiy_di@npi-tu.ru

Marina A. Kulikova, Cand. Sc., Associate Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-4000-0040>; m.kulikova@npi-tu.ru

Nina P. Shabelskaya, Dr. Sc., Associate Professor, Head of the Ecology and Industrial Safety Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-8266-2128>; n.shabelskaya@npi-tu.ru

Vera A. Ulyanova, Master's Degree Student, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russian Federation. npi-20@yandex.ru

Marina A. Egorova, Cand. Sc., Associate Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0003-2939-5141>; m.egorova@npi-tu.ru

Received: 02.12.2023

Revised: 09.04.2024

Accepted: 09.09.2024