

Научная статья
УДК 662.613.1:621.928.8:622.765
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.022

ПОДГОТОВКА ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ СЖИГАНИЯ УГЛЯ К ВЫЩЕЛАЧИВАНИЮ ЦЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ирина Валерьевна Кунилова¹, Анастасия Андреевна Писарева², Илья Алексеевич Зеновьев³

^{1–3}*Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия*

²*Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Россия*

¹*kunilova_i@ipkonran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7775-085X>*

²*anastndrvn@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4699-485>*

³*zenovev_i@ipkonran.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1245-1202>*

Аннотация

Исследована возможность снижения содержания недожога и предварительного извлечения железа из золошлаковых отходов сжигания угля для повышения эффективности выщелачивания ценных элементов. Установлено, что использование флотореагента КЭТГОЛ позволяет за 1 стадию извлечь до 43,2 % недожога. Определено влияние времени флотации на переход ценных элементов в пенный продукт. Выявлена закономерность повышения извлечения железа до 90 % при росте крупности частиц. Изучен элементный состав алюмосиликатного остатка, который может быть направлен на выщелачивание ценных элементов.

Ключевые слова:

золошлаковые отходы, флотация, недожог, магнитная сепарация, железосодержащий продукт

Для цитирования:

Кунилова И. В., Писарева А. А., Зеновьев И. А. Подготовка золошлаковых отходов сжигания угля к выщелачиванию ценных элементов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 4. С. 118–121. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.022.

Original article

PREPARATION OF COAL COMBUSTION ASH AND SLAG WASTE FOR LEACHING OF VALUABLE ELEMENTS

Irina V. Kunilova¹, Anastasia A. Pisareva², Ilya A. Zenovev³

^{1–3}*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

¹*kunilova_i@ipkonran.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7775-085X>*

²*anastndrvn@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4699-485>*

³*zenovev_i@ipkonran.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1245-1202>*

Abstract

The possibility of reducing the content of underburnt and preliminary extraction of iron from coal ash and slag waste to improve the efficiency of valuable elements leaching has been studied. It has been established that the use of the flotation reagent KETGOL allows extracting from to 43.2 % of underburnt in one stage. The effect of flotation time on the transition of valuable elements to the foam product has been determined. A pattern of increasing iron extraction to 90 % with increasing particle size has been revealed. The elemental composition of the aluminosilicate residue, which can be used for leaching valuable elements, has been studied.

Keywords:

ash and slag waste, flotation, underburning, magnetic separation, iron-containing product

For citation:

Kunilova I. V., Pisareva A. A., Zenovev I. A. Preparation of coal combustion ash and slag waste for leaching of valuable elements // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 4. P. 118–121. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.022

Введение

Стремительный рост населения Земли требует значительного расширения сырьевой базы для удовлетворения растущих потребностей в материалах [1–3]. В этих условиях крайне важно найти альтернативные источники сырья, одними из которых могут стать золошлаковые отходы (ЗШО) — побочный продукт сжигания угля на теплоэлектростанциях. В состав ЗШО входит значительное количество ценных

элементов, включая алюминий, железо, а также редкие и рассеянные металлы такие, как кобальт, марганец, титан, цирконий и другие [4–5]. Разработка технологии извлечения элементов из ЗШО представляет собой перспективное направление, одновременно позволяющее снизить техногенную нагрузку на окружающую среду при размещении отходов теплоэнергетического комплекса [6].

Ограничением к широкому внедрению технологий по извлечению компонентов ЗШО является низкая эффективность процесса выщелачивания, что обусловлено в том числе присутствием недожога. Недожженный углерод имеет относительно высокую удельную поверхность и пористую структуру, что свидетельствует о его способности сорбировать ценные элементы [7].

Содержание недожога, в зависимости от вида ископаемого топлива и параметров его сжигания, может достигать до 20 % и более. Так, материалы с максимальным его содержанием образуются в результате слоевого сжигания угля. При слоевом сжигании уголь поступает на колосниковую решетку, в полотно которой при повороте рукоятки образуются отверстия, через которые сбрасывается шлак в виде спекшихся или расплавленных кусковых отложений. Тонкодисперсные примеси (летучая зола) улавливаются циклонами и электрофильтрами. Таким образом, золошлаковые отходы представляют собой механическую смесь шлака (крупность 0,3–30 мм) и золы (крупность 3,5–100 мкм). В свою очередь, более низкая температура слоевого сжигания угля (1100–1300 °С), в сравнении с факельным или циклонным методами (1300–1500 °С), способствует более высокому концентрированию ценных микроэлементов и вызывает интерес к разработке комплексной технологии переработки ЗШО слоевого сжигания угля.

На основании вышесказанного для подготовки золошлаковых отходов слоевого сжигания угля к выщелачиванию необходимо предварительное удаление недожога. Для выделения угольной фракции ЗШО применима флотация, поскольку, несмотря на высокую температуру в котле, поверхность недожога остается более гидрофобной по сравнению с минеральной составляющей угля. Помимо выделения недожога, представляется целесообразным извлечь железосодержащие компоненты с применением метода магнитной сепарации. Предварительное отделение железосодержащих частиц будет способствовать получению более чистых фильтратов выщелачивания. Кроме того, железосодержащий концентрат может быть использован в металлургии для производства ферросилиция, чугуна и стали.

Целью данной работы является определение оптимальных параметров подготовки золошлаковых отходов слоевого сжигания угля к выщелачиванию.

Результаты исследования

Перед проведением исследований по извлечению недожога и железа было изучено распределение содержаний компонентов в различных классах крупности ЗШО (рис. 1). Анализ результатов, представленных на рис. 1, указывает на увеличение содержания углерода с 3,2 до 37,1 % с ростом размера частиц, что характерно для рассматриваемого материала. Средние классы крупности золошлаковых отходов характеризуются высоким содержанием железа, что делает перспективным его извлечение для дальнейшего использования.

В процессе выделения недожога из ЗШО определяющим фактором для оптимизации комплексной переработки отходов является селективность применяемых реагентов к целевому компоненту — углероду. Для эффективного последующего выщелачивания ценных элементов зольность пенных продуктов должна быть сведена к минимуму. Это не только обеспечит максимальное обогащение камерных продуктов минеральными компонентами, но и позволит направить обеззоленный пенный продукт на повторное использование.

При флотации золошлакового материала из класса крупности $-0,2 + 0,071$ мм с применением реагента КЭТГОЛ (4 кг/т) и продолжительностью процесса 6 мин выделено 46,2 % недожога. Снижение расхода реагента с 4 до 1 кг/т привело к уменьшению извлечения недожога до 37,5 %. При расходах 1 и 4 кг/т зольность пенных продуктов составляет 68,5 и 78,0 % соответственно, при этом через каждые 2 мин количество ценных элементов, извлекающихся в концентрат одновременно с недожогом, растет (рис. 2).

Согласно представленным на рис. 2 результатам, максимальное извлечение зольных частиц приходится на интервал от 4 до 6 мин при наибольшем расходе КЭТГОЛа. В свою очередь, извлечение углерода за последние 2 мин возрастает не более, чем на 3 %. Это указывает на целесообразность

снижения времени флотации для сохранения возможного количества минеральных примесей в камерном продукте с целью их последующего выщелачивания. Содержание углерода в камерном продукте не превышает 2,6 %, что в 1,5 раза меньше исходного количества. После проведения перечистных операций и повышения качества пенный продукт может быть использован как добавка к основному топливу в топках котлов.

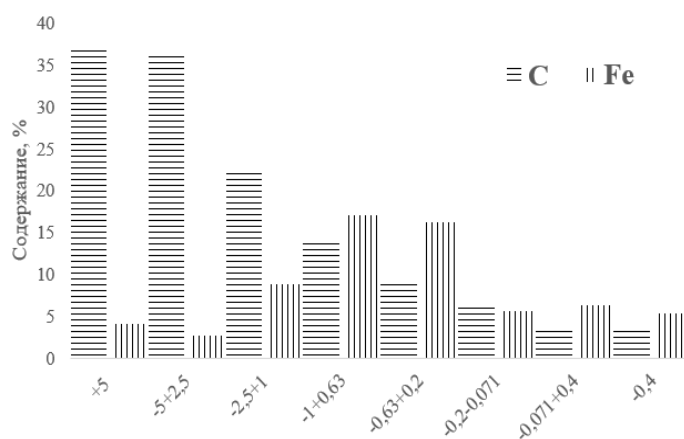


Рис. 1. Распределение содержаний недожога и железа в различных классах крупности ЗШО

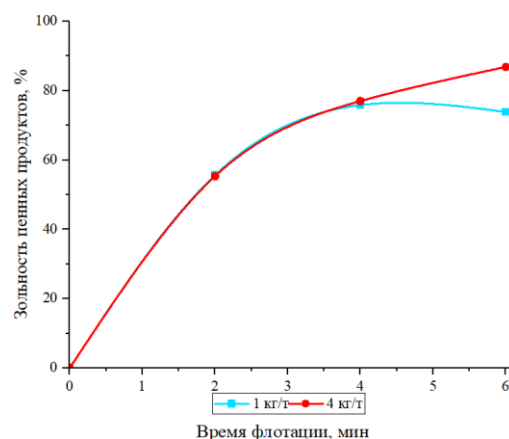


Рис. 2. Влияние времени флотации на извлечение сопутствующих ценных компонентов в концентрат

Следующим этапом исследования было изучение возможности извлечения железа с помощью мокрой магнитной сепарации в слабом поле. Экспериментально установлено, что увеличение крупности частиц ЗШО приводит к значительному повышению извлечения железа: с 40 до 90 %. Как было отмечено ранее, в первую очередь это обусловлено тем, что более крупные фракции содержат повышенное количество железа. Кроме того, крупные железосодержащие частицы обладают большей магнитной восприимчивостью и имеют меньшую удельную поверхность, что снижает влияние сил поверхностного натяжения и облегчает их отделение от немагнитной фракции.

Рентгенофазовым анализом показано, что железо в магнитном концентрате находится в основном в форме магнетита. Элементным анализом установлено содержание ценных металлов в алюмосиликатном остатке класса крупности $-1 + 0,63$ мм (табл.).

Таблица

Содержание ценных элементов в алюмосиликатном остатке

Элемент	Al	Fe	Ca	Ti	Co	Mn	Zr	V	Sr
Содержание, %	11,3	7,37	4,1	0,4	0,04	0,07	0,05	0,03	0,2

С учетом сложных фазовых превращений железосодержащих минералов в процессе сжигания угля, можно предположить, что некоторая часть железа (7,37 %) остается связанной в составе стекловидной фазы. Согласно данным таблицы и исходным содержаниям элементов в ЗШО более половины соединений кобальта и марганца перешло в магнитный концентрат, что повышает его качество из-за легирующих свойств рассматриваемых металлов. Содержания остальных элементов немного повысились, что указывает об успешном проведении предварительной обработки образцов перед кислотным выщелачиванием ценных металлов.

Выводы

По результатам работы подобраны оптимальные режимы проведения флотационного извлечения недожога и выделения магнитного продукта для подготовки образцов золошлаковых отходов к выщелачиванию. Использование флотореагента КЭТГОЛ в количестве 4 кг/т при длительности

флотации 4 мин позволяет извлечь 43,2 % недожженного углерода при зольности пенного продукта не более 66 %. Проведение мокрой магнитной сепарации крупных классов частиц позволяет выделить 90 % железа и при этом обогатить концентрат соединениями кобальта и марганца.

Таким образом, эффективное удаление примесей, препятствующих извлечению ценных металлов, является одним из факторов оптимизации технологии переработки золошлаковых отходов и значительного повышения ее экономической эффективности.

Список источников

1. Kuzin E. N., Mokrushin I. G., Kruchinina N. E. Assessment of the possibility of using leucoxene-quartz concentrate as raw material for production of aluminium and magnesium titanates // *Journal of Mining Institute*. 2023. V. 264. P. 886–894.
2. Кузин Е. Н., Кручинина Н. Е. Получение комплексных коагулянтов на основе крупнотоннажных отходов и продуктов промышленных производств // *Цветные металлы*. 2021. № 1. С. 13–18.
3. Кузин Е. Н., Кручинина Н. Е., Галактионов С. С., Краснощеков А. Н. Нейтрализация сернокислых растворов при комплексной переработке диопсидсодержащих отходов обогащения // *Обогащение руд*. 2019. № 4. С. 38–43.
4. Lomanjaya F., Liu J. C. Intensified extraction of rare earth elements from coal fly ash // *Chem Technol Biotechnol*. 2023. V. 98. P. 2266–2273.
5. Лавриненко А. А., Крылов И. О., Кунилова И. В. Электросепарация золошлаковых отходов Каширской ГРЭС // *Экология и промышленность России*. 2023. Т. 27, № 11. С. 28–33.
6. Лавриненко А. А., Кунилова И. В., Гольберг Г. Ю. Влияние низкотемпературного обжига золы сжигания углей с щелочными реагентами на эффективность извлечения ценных компонентов // *ГИАБ*. 2023. № 10. С. 104–121.
7. Tsubouchi, N., Ohtsuka, Y., Hashimoto, H., Yamada, T., & Hashimoto, H. Chemical characterization of unburned carbon in coal fly ashes by use of TPD/TPO and LRS methods // *Environmental science & technology*. 2015. V. 49, № 8. P. 5189–5194.

References

1. Kuzin E. N., Mokrushin I. G., Kruchinina N. E. Assessment of the possibility of using leucoxene-quartz concentrate as raw material for production of aluminium and magnesium titanates // *Journal of Mining Institute*. 2023. V. 264. P. 886–894.
2. Kuzin E. N., Kruchinina N. E. Obtaining complex coagulants based on large-scale waste and industrial products // *Tsvetnye Metally*. 2021. № 1. pp. 13–18.
3. Kuzin E. N., Kruchinina N. E., Galaktionov S. S., and Krasnoshchekov A. N. Neutralization of sulfuric acid solutions during complex processing of diopside-containing processing wastes // *Obogashchenie Rud*. 2019. No. 4. P. 38–43
4. Lomanjaya F., Liu J. C. Intensified extraction of rare earth elements from coal fly ash // *Chem Technol Biotechnol*. 2023. V. 98. P. 2266–2273.
5. Lavrinenko A. A., Krylov I. O., Kunilova I. V. Electric separation of ash and slag waste from Kashirskaya GRES // *Ecology and industry of Russia*. 2023. V. 27, № 11. P. 28–33.
6. Lavrinenko A. A., Kunilova I. V., Golberg G. Y. Influence of low-temperature calcination of coal ash with alkaline agents on efficiency of valuable component recovery // *MIAB*. 2023. № 10. P. 104–121.
7. Tsubouchi, N., Ohtsuka, Y., Hashimoto, H., Yamada, T., & Hashimoto, H. Chemical characterization of unburned carbon in coal fly ashes by use of TPD/TPO and LRS methods // *Environmental science & technology*. 2015. V. 49, № 8. P. 5189–5194.

Информация об авторах

И. В. Кунилова — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

А. А. Писарева — магистрант, инженер;

И. А. Зеновьев — студент, инженер.

Information about the authors

I. V. Kunilova — PhD (Technical Sciences), Senior Researcher;

A. A. Pisareva — Master's Student, engineer;

I. A. Zenovnev — Student, engineer.

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 27.08.2025.
The article was submitted 16.06.2025; approved after reviewing 25.08.2025; accepted for publication 27.08.2025.