

УДК 658.567.1

*Нагиев Роман Мехманович  
магистр, Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», Россия, г. Москва*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ: ИЗВЛЕЧЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ПОЛУЧЕНИЕ СЫРЬЯ ДЛЯ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА**

### **Аннотация**

В статье изложены результаты экспериментального исследования, посвященного комплексной переработке золошлаковых отходов Дорогобужской ТЭЦ. Рассмотрена двухступенчатая схема обращения с техногенным сырьем: на первой стадии из золы извлекали редкоземельные элементы сочетанием кислотного и бактериального выщелачивания, на второй стадии остаточный материал оценивали как минеральную основу для последующего получения сырья цементного назначения. Показано, что предварительная грануляция, выбор гидродинамического режима и введение серы как энергетического субстрата для микробного консорциума существенно влияют на полноту извлечения скандия, иттрия и лантана. Установлено, что после выщелачивания хвосты сохраняют алюмосиликатный характер и по составу могут быть использованы в технологической цепочке получения белитового шлама и клинкерной шихты. Полученные результаты подтверждают возможность поэтапной утилизации золы без возврата остатка в отвал.

## Annotation

The paper presents the results of an experimental study on the integrated processing of ash and slag waste from the Dorogobuzh thermal power plant. A two-stage route was considered. At the first stage, rare earth elements were recovered from ash by combining acid leaching and bacterial leaching. At the second stage, the residual solid was evaluated as a mineral basis for further production of cement-related raw material. It is shown that preliminary granulation, hydrodynamic regime and sulfur addition as an energy substrate for the microbial consortium significantly affect the recovery of scandium, yttrium and lanthanum. The study also demonstrates that the leaching tails retain their aluminosilicate nature and can be involved in the technological chain for belite sludge and clinker feed preparation. The results confirm the feasibility of stepwise ash utilization without returning the residue to the disposal area.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, редкоземельные элементы, химическое выщелачивание, биовыщелачивание, хвосты выщелачивания, цементный клинкер, белитовый шлам.

Keywords: ash and slag waste, rare earth elements, chemical leaching, bioleaching, leaching tails, cement clinker, belite sludge.

Накопленные на ТЭЦ золошлаковые отходы уже нельзя рассматривать только как объект складирования. Для энергетики это одновременно экологическая нагрузка, источник занятых земель и резерв вторичного минерального сырья. Практический интерес к таким отходам связан прежде всего с двумя обстоятельствами: в золе концентрируются редкие и редкоземельные элементы, а основная масса остатка представлена алюмосиликатной матрицей, пригодной для строительных технологий. Поэтому более рациональным выглядит не отдельное извлечение одного компонента, а последовательная переработка, при которой ценные элементы извлекаются первыми, а обезметаллизированный остаток вовлекается в производство материалов.

Актуальность такой постановки задачи в последние годы заметно возросла. Редкоземельные металлы рассматриваются уже не только как товарная группа для отдельных отраслей, а как критически важная материальная база технологического развития. Они необходимы для производства постоянных магнитов, силовой электроники, накопителей энергии, специальной оптики, каталитических систем, цифровой техники и ряда изделий оборонного и энергетического назначения. В российских стратегических документах редкие и редкоземельные металлы прямо увязываются с задачами технологической независимости и устойчивости минерально-сырьевой базы, а в международной аналитике подчеркивается, что риски концентрации поставок таких материалов становятся фактором промышленной и национальной безопасности. В этой связи извлечение РЗЭ из золошлаковых отходов представляет интерес не только как экологический способ сокращения накопленного техногенного массива, но и как один из реальных путей вовлечения внутреннего вторичного сырья в обеспечение стратегически значимых цепочек поставок.

Задача данной работы состояла в том, чтобы экспериментально проверить именно такую последовательную схему. Требовалось оценить, насколько эффективно редкоземельные элементы переходят в раствор при сочетании химического и биологического выщелачивания, и определить, сохраняют ли хвосты после извлечения целевых компонентов свойства, достаточные для их дальнейшего использования в технологии цементного клинкера. Тем самым исследование решало не только гидromеталлургическую, но и ресурсную задачу, связанную с максимальным использованием всего объема золы.

В качестве объекта была выбрана зола Дорогобужской ТЭЦ. Исходный материал характеризовался преобладанием оксидов кремния, алюминия и железа: содержание  $\text{SiO}_2$  составляло 41,80 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 25,43 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 15,98 %. Одновременно в золе были зафиксированы лантан, иттрий и скандий, что позволило рассматривать ее как техногенное сырье для опытного извлечения редкоземельных элементов. Такое сочетание компонентов принципиально важно: с одной стороны, оно обеспечивает возможность получения растворов, обогащенных РЗЭ, с другой -

формирует остаток, потенциально пригодный для клинкерообразования после корректировки состава.

Опытная схема включала четыре взаимосвязанных блока. Сначала золу подготавливали к перколяционной обработке: материал гранулировали, а часть образцов дополнительно подвергали сульфогрануляции с введением элементной серы. Далее выполняли химическое выщелачивание 5 %-ным раствором серной кислоты в колоннах, работающих в проточном или циркуляционном режиме. После этого остаток направляли на бактериальное довыщелачивание с использованием ацидофильного консорциума микроорганизмов. Завершающим этапом служила оценка хвостов как сырьевой основы для последующего получения белитового шлама и клинкерной смеси.

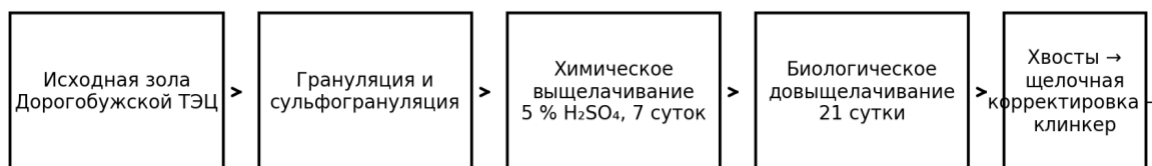


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной переработки золошлаковых отходов

Кислотную стадию проводили в нескольких гидродинамических режимах, чтобы определить, как изменяется полнота извлечения при различном контакте раствора с твердым слоем. В проточном варианте свежий реагент проходил через гранулы без возврата, тогда как в циркуляционном растворе после накопления заданного объема многократно возвращали в систему. Такое сопоставление позволило проследить не только общий уровень извлечения, но и влияние режима на устойчивость процесса и распределение металлов между раствором и твердым остатком.

Полученные данные показали, что уже на химической стадии редкоземельные элементы извлекаются неодинаково. Для проточного режима средняя степень перехода в раствор составила 31,4 % для скандия, 21,5 % для лантана и 32,8 % для иттрия. При циркуляции раствора показатели возрастали до 33,0; 43,4 и 40,7 % соответственно. Наиболее заметный прирост был зафиксирован по лантану, что указывает на более благоприятные условия растворения при длительном контакте реагента с алюмосиликатной матрицей. Таким образом, уже первый этап показал преимущество режимов, обеспечивающих повторное взаимодействие раствора с загрузкой.

Биологическое довыщелачивание выполняли двумя способами. В первом случае культуральная жидкость непрерывно циркулировала по замкнутому контуру. Во втором варианте использовали проточный режим с периодической заменой культуральной жидкости и введением новой генерации микроорганизмов. Сравнение этих режимов показало, что наибольший эффект достигается не за счет разовой интенсификации, а за счет устойчивой работы микробного сообщества в среде с доступным энергетическим субстратом и без накопления ингибирующих продуктов.

Максимальные результаты были получены при сочетании циркуляционного химического выщелачивания и циркуляционного биологического довыщелачивания в течение 30 суток. В этом варианте суммарное извлечение достигло 52 % для скандия, 64 % для лантана и 61 % для иттрия. При других сочетаниях режимов степень извлечения была ниже, что подтверждает необходимость согласованного подбора условий обеих стадий. Для практики это означает, что эффективность комбинированной схемы определяется не только составом золы, но и организацией процесса во времени.

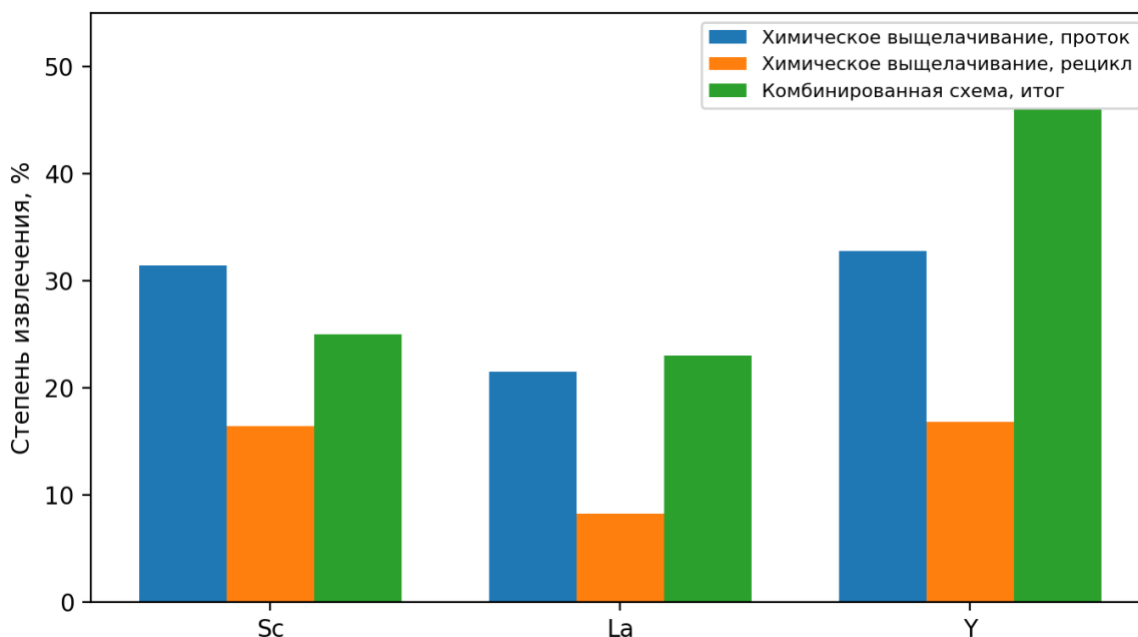


Рисунок 2 – Сравнение эффективности режимов выщелачивания редкоземельных элементов

Не менее важным результатом стало изменение состава твердого остатка. После извлечения редкоземельных элементов хвосты не потеряли алюмосиликатную природу, однако содержание ряда компонентов стало более благоприятным для дальнейшего технологического использования. Массовая доля  $Al_2O_3$  снижалась до 21,3-22,4 %,  $Fe_2O_3$  - до 10,2-10,6 %, тогда как  $SiO_2$  оставался в пределах 46,7-48,1 %. Иными словами, гидрометаллургическая стадия не разрушала минеральную основу отхода, а переводила его в новое состояние, более удобное для последующей корректировки состава.

Сопоставление исходной золы, хвостов выщелачивания и типового цементного клинкера показывает, что остаток после извлечения РЗЭ нельзя считать готовым сырьем без дополнительной обработки, но он хорошо вписывается в схему смешения с кальцийсодержащими компонентами. По соотношению кремнезема и глинозема хвосты ближе к алюмосиликатной части клинкерной шихты, тогда как дефицит  $CaO$  может быть компенсирован введением известняка или через стадию получения белитового шлама. Именно поэтому оценка остатка проводилась не как

самостоятельного продукта, а как промежуточного сырья для следующего передела.

В предлагаемом технологическом маршруте хвосты не направляются обратно на хранение. Их рассматривают как техногенную минеральную основу, которую можно вовлечь в переработку после щелочной корректировки и связывания кремнезема с кальцием. Такой подход позволяет связать гидрометаллургическую часть работы с задачами цементной технологии и избежать ситуации, когда после извлечения небольшой доли ценных компонентов основная масса материала вновь становится отходом.

Технологический смысл такого решения двоякий. Во-первых, за счет ввода кальцийсодержащих реагентов можно приблизить состав смеси к диапазону, необходимому для образования силикатных и алюминатных фаз клинкера. Во-вторых, предварительное удаление части железа и редкоземельных компонентов делает остаток более предсказуемым для строительного применения. В результате хвосты выступают не как случайный побочный продукт, а как управляемое сырье, параметры которого формируются на предыдущей стадии переработки.

С практической точки зрения проведенные опыты подтверждают реализуемость двухконтурной схемы обращения с золой. На первом контуре из техногенного сырья извлекают сравнительно малую, но ценную по стоимости часть - редкоземельные элементы. На втором контуре основная масса остатка используется для получения минерального продукта строительного назначения. За счет этого общий эффект процесса определяется не только извлечением РЗЭ, но и уменьшением объема захораниваемого материала, что особенно важно для давно эксплуатируемых золоотвалов.

Следовательно, комбинированное химико-биологическое выщелачивание в данном случае следует рассматривать не как конечную цель, а как первую стадию комплексной переработки золошлаковых отходов. Эксперимент показал, что после извлечения редкоземельных элементов материал сохраняет технологическую

ценность и может быть встроен в дальнейший цикл получения клинкерного сырья. Такой подход соответствует логике глубокой утилизации техногенных отходов, при которой каждая последующая операция опирается на результаты предыдущей.

Таблица 1 – Изменение химического состава золы в ходе эксперимента и сопоставление с цементным клинкером

Материал	SiO <sub>2</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	CaO, %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Примечание
Исходная зола Дорогобужской ТЭЦ	41,80	25,43	1,78	15,98	Материал до извлечения РЗЭ
Хвосты после выщелачивания, вариант 1	50,70	21,30	0,77	11,20	Лучшее снижение Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Хвосты после выщелачивания, вариант 2	50,10	21,60	1,00	8,00	Лучшее снижение Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Эталонный цементный клинкер	22,0	5,0	67,0	3,0	Целевой ориентир по составу

Таблица 2 – Итоговые показатели извлечения редкоземельных элементов при различных режимах обработки

Режим	Sc, %	La, %	Y, %
Химическое выщелачивание, проточный режим (среднее)	31,4	21,5	32,8
Химическое выщелачивание, циркуляционный режим (среднее)	16,4	8,24	16,8

Режим	Sc, %	La, %	Y, %
Последовательная схема: химическое + биологическое, итог	25,0	23,0	46,0

## Выводы

1. Комбинированная схема, объединяющая кислотное и бактериальное выщелачивание, обеспечивает извлечение редкоземельных элементов из золы Дорогобужской ТЭЦ и показывает преимущество циркуляционных режимов на обеих стадиях процесса.
2. После извлечения скандия, лантана и иттрия хвосты сохраняют алюмосиликатную основу, что делает возможным их дальнейшее использование в качестве техногенного компонента сырьевой смеси цементного назначения.
3. Корректировка состава хвостов кальцийсодержащими компонентами и использование подхода, аналогичного получению белитового шлама, позволяют рассматривать остаток не как вторичный отход, а как промежуточное сырье для клинкерной технологии.
4. Предложенная последовательность операций подтверждает перспективность комплексной переработки золошлаков, при которой совмещаются извлечение ценных компонентов, снижение объема отвального хранения и вовлечение остатка в промышленный оборот. С практической точки зрения это особенно важно в условиях роста спроса на критические материалы: техногенные золошлаковые накопления могут рассматриваться как дополнительная сырьевая база, повышающая ресурсную устойчивость и снижающая зависимость от первичных и импортозависимых источников.

## Литература

1. Распоряжение Правительства РФ от 15 июня 2022 г. № 1557-р «Об утверждении комплексного плана по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности».
2. Ксенофонтов Б. С., Козодаев А. С., Таранов Р. А. и др. Способ бактериального выщелачивания редкоземельных и благородных металлов из золошлаков: патент РФ № 2580258. 2016.
3. Кондратьева Т. Ф., Пивоварова Т. А., Цаплина И. А. и др. Разнообразие сообществ ацидофильных хемолитотрофных организмов в природных и техногенных экосистемах // Микробиология. 2012. Т. 81. № 1. С. 3–27.
4. Делицын Л. М., Кулумбеков Р. В., Попель О. С. и др. Белитовые шламы из золы угольных ТЭС // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 11. С. 20–26.
5. Самойлова Е. Э., Гатина Е. Д., Самойлова О. В. Выбор оптимальных направлений использования золошлаковых отходов // Строительные материалы. 2022. № 4. С. 4–8.
6. Пашков Г. Л. Золой природных углей – нетрадиционный сырьевой источник редких элементов // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 11.
7. Черкасова Т. Г., Черкасова Е. В., Тихомирова А. В. и др. Исследование матрицы и редких элементов в золошлаковых отходах тепловых электростанций на предмет возможности их извлечения // Metallurg. 2022. № 65. С. 1324–1330.
8. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 июля 2024 г. № 1838-р.
9. Национальный проект «Новые материалы и химия» // Правительство России. 2025.
10. Шильченко Т. Н. Редкоземельные металлы как инструмент геополитики: вызовы и возможности для России // Международные отношения. 2025.
11. International Energy Agency. Critical Minerals // IEA. 2025.

## Literature

1. Order of the Government of the Russian Federation dated June 15, 2022 No. 1557-r “On approval of the comprehensive plan to increase the utilization of ash and slag waste of hazard class V”.
2. Ksenofontov B.S., Kozodaev A.S., Taranov R.A. et al. Method for bacterial leaching of rare-earth and noble metals from ash and slag waste: Russian patent No. 2580258. 2016.
3. Kondratieva T.F., Pivovarova T.A., Tsaplina I.A. et al. Diversity of acidophilic chemolithotrophic communities in natural and technogenic ecosystems. *Microbiology*, 2012, vol. 81, no. 1, pp. 3–27.
4. Delitsyn L.M., Kulumbegov R.V., Popel O.S. et al. Belite sludges from coal-fired power plant ash. *Ecology and Industry of Russia*, 2022, vol. 26, no. 11, pp. 20–26.
5. Samoylova E.E., Gatina E.D., Samoylova O.V. Selection of optimal areas for the use of ash and slag waste. *Construction Materials*, 2022, no. 4, pp. 4–8.
6. Pashkov G.L. Ashes of natural coals as a non-traditional raw source of rare elements. *Soros Educational Journal*, 2001, vol. 7, no. 11.
7. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V. et al. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste from thermal power plants for their possible extraction. *Metallurgist*, 2022, no. 65, pp. 1324–1330.
8. Strategy for the Development of the Mineral Resource Base of the Russian Federation through 2050: approved by Order of the Government of the Russian Federation No. 1838-r dated July 11, 2024.
9. National Project “New Materials and Chemistry”. Government of Russia, 2025.
10. Shilchenko T.N. Rare earth metals as an instrument of geopolitics: challenges and opportunities for Russia. *International Relations*, 2025.
11. International Energy Agency. *Critical Minerals*. IEA, 2025.