

Научная статья

УДК 504.052:504.06:537.221

DOI 10.18101/2306-2363-2025-2-11-16

Электросепарация угольной золы — перспективный метод подготовки отходов угольной энергетики к вторичному использованию

© **Кобылкин Михаил Владимирович**

кандидат технических наук, доцент

mikhail.kobylkin@yandex.ru

© **Риккер Юлия Олеговна**

старший преподаватель

yrikker@mail.ru

© **Дарбинян Зоя Гарегиновна**

магистрант

kafedrates116@mail.ru

Забайкальский государственный университет,
Россия, 672039, г.Чита, ул. Александро-Заводская, 30

Аннотация. В статье освещается актуальная проблема утилизации золошлаковых отходов, накапливающихся в угольной энергетике, особенно в регионах с преобладанием высокозольных бурых углей, таких как Забайкальский край. Отмечается, что зола бурых углей от котельных обладает значительным ресурсным потенциалом, поскольку для котельных Забайкальского края характерен высокий процент недожога (до 50–60%). Проведен анализ существующих технологий переработки золошлаковых отходов, включая гравитационные, магнитные и флотационные методы, выявлены их ограничения в условиях региона. Особое внимание уделено трибоэлектростатической сепарации как методу, позволяющему достигать степени отделения недожога в 85–90% при энергопотреблении около 1 кВт·ч/т. Выполнен оценочный технико-экономический расчет внедрения трибоэлектростатической сепарации на котельной силикатного завода, показывающий срок окупаемости менее трех лет. Рассмотрены возможности локализации оборудования и экологический эффект технологии, соответствующий стратегическим целям РФ по утилизации золы.

Ключевые слова: зола, зола бурых углей, сепарация, трибоэлектростатика, золошлаковые отходы, импортозамещение.

Для цитирования

Кобылкин М. В., Риккер Ю. О., Дарбинян З. Г. Электросепарация угольной золы — перспективный метод подготовки отходов угольной энергетики к вторичному использованию // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2025. Вып. 2. С. 11–16.

Введение

Золошлаковые отходы (ЗШО), образующиеся при сжигании угля, ежегодно достигают в России 20–26 млн т, однако в хозяйственный оборот вовлекается по

разным оценкам, от 10 до 27 % этого объёма¹ [1]. За последние 15 лет площади золоотвалов превысили 20 тыс. га, что создает очаги вторичного пылегазового загрязнения и повышенный техногенный прессинг на прилегающие водоносные горизонты [1].

Проблема особенно остра для Забайкальского края, где доля угля в топливном балансе электростанций составляет 99,8 %². Эксплуатация местных бурых углей марок В2–В3 с естественной зольностью на сухую массу 10–32 % приводит к формированию крупных золоотвалов³. Для котельных при этом характерен высокий процент недожога, до 50–60 % углеродистого вещества. В результате регион сталкивается одновременно с дефицитом свободных площадей для хранения ЗШО и ростом удельных выбросов CO₂.

При этом зола бурых углей обладает скрытым ресурсным потенциалом: минеральная фракция содержит до 25 % Al₂O₃ и повышенные концентрации редкоземельных элементов, тогда как углеродистая часть характеризуется теплотой сгорания 10–15 МДж/кг и может быть возвращена в топливный цикл. Эффективная переработка ЗШО тем самым превращается из экологической обязанности в экономически привлекательный источник вторичного сырья.

Государственная политика усиливает запрос на вовлечение золы в хозяйственный оборот. Согласно Энергетической стратегии необходимо увеличение доли утилизированных продуктов сжигания твердого топлива (золошлаков) с 27 % в 2023 г. до 40% в 2030 г., до 50 % в 2036 г. и до 90 % в 2050 г.⁴

Возможные пути сепарации ЗШО

Эффективное извлечение недожога и ценных минералов из золы начинается с выбора подходящей схемы разделения. В мировой и российской практике наибольшее распространение получили четыре принципиально разные группы процессов — гравитационно-вихревые, магнитные, флотационные и электростатические, — которые существенно различаются по требованию к ресурсоёмкости и по степени очистки золы от углеродистых частиц.

Гравитационные и аэродинамические классификаторы опираются на контраст плотности и размерный эффект; но при преобладании тонкодисперсной (<50 мкм) фракции, типичной для бурых углей Забайкалья, такая селекция нерезуль-

¹ Российская Федерация. Правительство. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года: утверждена распоряжением Правительства РФ от 12 апр. 2025 г. № 908-р. Москва: Минэнерго РФ, 2025. URL: <https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/d6a/Energostrategiya-RF-do-2050-goda.pdf> (дата обращения: 13.07.2025). Текст: электронный.

² Министерство ЖКХ, энергетики, цифровизации и связи Забайкальского края. Схема и программа развития электроэнергетики Забайкальского края на 2021–2025 гг. Чита: МинЖКХ Забайкальского края, 2021. URL: <https://media.75.ru/minenergo/documents/65681/zabaykal-skogo-kraja-2021-2025-g.pdf> (дата обращения: 13.07.2025). Текст: электронный.

³ Там же.

⁴ Российская Федерация. Правительство. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года: утверждена распоряжением Правительства РФ от 12 апр. 2025 г. № 908-р. Москва: Минэнерго РФ, 2025. URL: <https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/d6a/Energostrategiya-RF-do-2050-goda.pdf> (дата обращения: 13.07.2025). Текст: электронный.

тативна: величина потерь углерода остаётся на уровне 55–65% даже после двух стадий сепарации. Магнитная обработка избирательно удаляет ферромагнитные включения, улучшая радиационную обстановку, однако практически не влияет на показатель Loss-on-Ignition (LOI) и потому рассматривается лишь как вспомогательный приём [6].

Флотация, несмотря на широкое распространение в Китае и Германии, в условиях Забайкалья сталкивается одновременно с дефицитом воды, высокими реагентными затратами и проблемой утилизации шламов. Опыты на золе Харанорской ГРЭС показали, что снижение LOI ниже 8% требует расхода реагентов-собирателей 2,5–3 кг·т⁻¹ при удельном водопотреблении >5 м³·т⁻¹, что экономически неконкурентно.

На этом фоне трибоэлектростатическая сепарация (ТС) демонстрирует принципиальные преимущества: процесс полностью сухой, энергопотребление не превышает 1 кВт·ч на тонну, а степень отделения недожога достигает 85–90 % за единственную стадию [6]. Электризация происходит при турбулентном контакте частиц, приводя к положительному заряду углеродистых агломератов и отрицательному заряду алюмосиликатной матрицы; последующее отклонение во внешнем поле 3–5 кВ·см⁻¹ обеспечивает высокую селективность [2, 3].

Индустриальную зрелость ТС иллюстрирует американский прототип ST Equipment & Technology (STET): к 2025 г. развернуто 18 промышленных линий мощностью до 36 т·ч⁻¹, где исходная зола с LOI 12–25 % стабильно доводится до ≤4 % без реагентов [4, 5, 6]. Конструкция основана на диэлектрической конвейерной ленте, обеспечивающей непрерывную трибозарядку и одновременную сепарацию, что минимизирует габариты и делает модуль пригодным для ретрофита ТЭЦ.

В России пока отсутствуют серийные электростатические сепараторы аналогичного класса; поставки STET затруднены экспортными ограничениями, а отечественные разработки находятся на уровне MVP-прототипов. Тем не менее анализ показывает, что до 80% компонентов — высоковольтные источники, виброподачи, диэлектрические ленты из фторопласта — могут быть импортозамещены без критического падения ресурса. Ключевой патентный узел (плоская ременная щель) допускает вариант обхода через изменение геометрии камеры и расположения электродов, что снижает юридические риски и открывает путь к реверс-инжинирингу.

Оценка потенциала внедрения трибоэлектростатической сепарации на примере котельной силикатного завода

Котельная силикатного завода, относящаяся к децентрализованным источникам теплоснабжения Забайкальского края, характеризуется крайне высоким недожогом: обследование объекта показало пиковое содержание несгоревшего углерода в ЗШО до 62 % мас. Для рассматриваемой площадки накоплено около 10 000 т ЗШО, а лабораторные пробы подтверждают среднюю потерю при прокаливании (LOI) ≈ 50 %. Эти параметры указывают на значительный энергетический и сырьевой потенциал, который может быть реализован с помощью ТС.

Для локальной задачи достаточно модульного сепаратора производительностью $1 \text{ т} \cdot \text{ч}^{-1}$: при фонде работы $6\,000 \text{ ч} \cdot \text{год}^{-1}$ годовой объём переработки составит $6\,000 \text{ т}$, что позволит полностью рекультивировать накопленный золоотвал менее чем за два года.

Расчёт опирается на технико-экономические параметры опытного прототипа с энергопотреблением $\sim 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot \text{т}^{-1}$ и эксплуатационными издержками $70\text{--}90 \text{ руб} \cdot \text{т}^{-1}$.

При условии разделения $10\,000 \text{ т}$ золы с выходом минеральной фракции ($\approx 50\%$), пригодной как пуццолановая добавка, $5\,000 \text{ т}$ с ценой $600 \text{ р} \cdot \text{т}^{-1}$ и углеродистого концентрата ($\approx 35\%$) с теплотой сгорания $15 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ — $3\,500 \text{ т}$ с ценой $1\,200 \text{ р} \cdot \text{т}^{-1}$, годовая выручка достигает $\sim 7,2 \text{ млн р.}$ при операционных затратах $\leq 0,8 \text{ млн р.}$ Для компактного ленточного сепаратора с КАПЕКС $\approx 20 \text{ млн р.}$ срок окупаемости составит 2–3 года.

15 % остатка уходит в технологически неизбежный отсев, не удовлетворяющий требованиям товарного продукта, который либо возвращается в процесс, либо требует отдельного решения по доочистке/утилизации.

Утилизация $10\,000 \text{ т}$ ЗШО устраняет локальный источник пылевого загрязнения и высвобождает несколько гектаров промышленной территории. Дополнительный экологический эффект связан с возвратом $\sim 1\,500 \text{ т}$ эквивалента углерода в топливный цикл, что снижает валовый расход свежего угля и парниковые выбросы. Проект напрямую способствует достижению целевого показателя Правительства РФ об утилизации $\geq 50\%$ золы к 2035 г.

Заключение

Проведённый анализ подтвердил, что для энергетической инфраструктуры Забайкальского края, основанной почти полностью на сжигании высокозольных бурых углей, трибоэлектростатическая сепарация золы является технологически и экономически оптимальным решением. В условиях необходимости достижения нормативного уровня утилизации ЗШО $\geq 50\%$ к 2035 г. именно сухая электростатика обеспечивает максимальное извлечение недожога ($85\text{--}90\%$) при минимальных эксплуатационных затратах. Экономический расчёт на примере котельной силикатного завода показал срок окупаемости ≤ 3 лет при переработке 10 тыс. т накопленных ЗШО. Комплектующие высокого напряжения и ключевые конструктивные элементы могут быть импортонезависимо локализованы, что устраняет критический технологический риск. Таким образом, переход к опытно-промышленной эксплуатации трибоэлектростатических линий на малых и средних котельных региона представляется обоснованным шагом для выполнения экологических требований, повышения топливной эффективности и вовлечения золы в хозяйственный оборот.

Литература

1. Экологическая оценка состояния отвалов золошлаковых отходов для их последующего дифференцированного освоения на примере Харанорской ГРЭС / П. М. Маниковский, Н. В. Овчаренко, Т. О. Гущина, Г. П. Сидорова // Горный информационно-

М. В. Кобылкин, Ю. О. Риккер, З. Г. Дарбинян. Электросепарация угольной золы — перспективный метод подготовки отходов угольной энергетики ...

аналитический бюллетень. 2024. № 8. С. 19–37. DOI: 10.25018/0236-1493-2024-8-0-19. Текст: непосредственный.

2. Baltrus J. P., Diehl J. R., Soong Y., Sands W. Triboelectrostatic Separation of Fly Ash and Charge Reversal. *Fuel*. 2002; 81(6): 757–762. DOI: 10.1016/S0016-2361(01)00196-X.

3. Duan X., Zhang J., Cao T., Jiang B., Xing Y. Facile Route for Effective Separation and Full-Scale Recycling of Fly Ash and Unburned Carbon. *ACS Omega*. 2024; 9(4): 4792–4803. DOI: 10.1021/acsomega.3c08272.

4. 20 years of Triboelectrostatic Beneficiation of Fly Ash. *ST Equipment & Technology*. 2015. Available at: <https://steqtech.com/literature/20-years-of-triboelectrostatic-beneficiation-of-fly-ash-vietbuild-2015/> (accessed 13.07.2025).

5. Baker L., Gupta A., Gasiorowski S., Hrach F. Triboelectrostatic Beneficiation of Land-filled and Pondered Fly Ash. *Ash at Work*. 2015; 2: 28–34. Available at: <https://acaa-usa.org/wp-content/uploads/ash-at-work/ASH02-2015.pdf> (accessed 13.07.2025).

6. Hrach F., Flynn K., Ghazi K., Sullivan S. Triboelectrostatic Fly Ash Beneficiation: an Update on Separation Technology. *World of Coal Ash 2022 Conference Proceedings*. 2022, pp. 478–492. Available at: https://worldofcoalash.org/wp-content/uploads/2022/07/0478_0692_000349.pdf (accessed 13.07.2025).

Статья поступила в редакцию 30.08.2025; одобрена после рецензирования 15.09.2025; принята к публикации 15.09.2025.

Electrical Separation of Coal Ash — A Promising Method of Preparing Coal Energy Waste for Recycling

Mikhail V. Kobylkin

Cand. Sci. (Engineering), A/Prof. of Power Engineering Department
mikhail.kobylkin@yandex.ru

Yuliya O. Rikker

Senior Lecturer of Power Engineering Department
yrikker@mail.ru

Zoya G. Darbinyan

Master's Student
kafedrates116@mail.ru

Transbaikal State University,
30 Aleksandro-Zavodskaya St., Chita 672039, Russia

Abstract. The article deals with the pressing issue of disposal of ash and slag waste accumulated in coal-fired power industry, particularly in regions with prevalence of high-ash brown coal, such as Zabaikalsky Krai. It is emphasizes that ash of brown coal from boiler houses has significant resource potential, since boiler houses of Zabaikalsky Krai are characterized by a high percentage of unburned carbon — up to 50–60%. We have analyzed the existing technologies for processing ash and slag waste, including gravitational, magnetic and flotation methods, identified their constraints under regional

conditions. Particular attention is paid to triboelectrostatic separation as a method capable of achieving a degree of unburned carbon removal of 85–90% with an energy consumption of about 1 kWh per ton. The article presents approximate technical and economic assessment of implementing triboelectrostatic separation at the Silicate Plant's boiler facility, showing a payback period of less than three years. We have considered the capabilities of localizing the equipment and the environmental effect of the technology, which align with the strategic goals of the Russian Federation for ash utilization.

Keywords: ash, brown coal ash, separation, triboelectrostatics, ash and slag waste, import substitution.

For citation

Kobylkin M. V., Rikker Yu. O., Darbinyan Z. G. Electrical Separation of Coal Ash — A Promising Method of Preparing Coal Energy Waste for Recycling. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics.* 2025; 2: 11–16 (In Russ.).

The article was submitted 30.08.2025; approved after reviewing 15.09.2025; accepted for publication 15.09.2025.