

## МЕТОДЫ ПОДГОТОВКИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГЕОПОЛИМЕРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

П. Г. Козлов<sup>1</sup>, А. В. Таскин<sup>1</sup>, Р. С. Федюк<sup>1, 2</sup>, Л. Н. Алексейко<sup>3</sup>, Д. Р. Федотов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, 690922, г. Владивосток, Россия,  
kozlov.pg@dvfu.ru, taskin@yandex.ru, fedyuk.rs@dvfu.ru, fedotov.dr@dvfu.ru

<sup>2</sup>Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России «Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт по строительству», ул. Бородинская, 14, 690033, г. Владивосток, Россия

<sup>3</sup>Гомельский государственный медицинский университет, ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Республика Беларусь, Alexeiko.ln@mail.ru

В данной публикации детально анализируются подходы к переработке золошлаковых отходов, которые обеспечивают получение высококачественного и экологически безопасного сырья. Внедрение передовых технологий вторичной переработки позволяет эффективно решать проблему утилизации золошлаковых отходов, открывая возможности для их широкого применения в строительстве и снижая нагрузку на окружающую среду.

**Ключевые слова:** выщелачивание, геополимеры, недожог, плотностное разделение, экология.

## METHODS OF ASH AND SLAG WASTE PREPARATION FOR USE IN GEOPOLYMER BUILDING MATERIALS<sup>1</sup>

P. G. Kozlov<sup>1</sup>, A. V. Taskin<sup>1</sup>, R. S. Fedyuk<sup>1, 2</sup>, L. N. Aleksejko<sup>3</sup>, D. R. Fedotov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern Federal University, p. Ajax, 10, Russkiy Island, 690922, Vladivostok, Russia,  
kozlov.pg@dvfu.ru, taskin@yandex.ru, fedyuk.rs@dvfu.ru, fedotov.dr@dvfu.ru

<sup>2</sup>Branch of FGBU CNIIP of the Ministry of Construction of the Russian Federation “Far Eastern Scientific Research, Design and Technological Institute for Construction”, str. Borodinskaya, 14, 690033, Vladivostok, Russia

<sup>3</sup>Gomel State Medical University, str. Lange, 5, 246000, Gomel, Republic of Belarus, Alexeiko.ln@mail.ru

This publication analyzes in detail the approaches to the processing of ash and slag waste, which ensure the production of high-quality and environmentally friendly raw materials. The introduction of advanced recycling technologies makes it possible to effectively solve the problem of waste disposal, opening up opportunities for their widespread use in construction and reducing the burden on the environment.

**Keywords:** leaching, geopolymers, underburning, density separation, ecology.

Золошлаковые отходы (ЗШО), образующиеся в результате сжигания угля на тепловых электростанциях (рис.), представляют собой перспективный источник вторичного сырья для производства строительных материалов, включая геополимеры. Однако перед их использованием необходимо провести тщательную подготовку и очистку, чтобы минимизировать содержание примесей и недожога, а также повысить реакционную способность компонентов [1; 6].



Рис. Золоотвал Артемовской ТЭЦ

Промывка и просеивание являются базовыми процессами, направленными на удаление недожога угля и других загрязняющих веществ из ЗШО. Эти методы позволяют значительно улучшить реакционную способность золошлаковых материалов, которые затем могут быть использованы для получения геополимеров с повышенной прочностью.

Например, промывка водой эффективно снижает содержание легко растворимых соединений, таких как хлориды и сульфаты, что особенно важно для предотвращения выщелачивания токсичных элементов в дальнейшем. Просеивание же позволяет разделить исходный материал на фракции различного размера, что способствует улучшению однородности состава геополимерных смесей. Исследования показывают, что оптимальная температура термической обработки при подготовке составляет около 950 °C, так как она обеспечивает повышение дисперсности и активности золы-уноса [1].

Важным шагом в развитии технологий переработки ЗШО стала трехступенчатая технология, разработанная учеными Дальневосточного федерального университета (ДВФУ). На первой стадии осуществляется разделение

отходов на фракции с последующим удалением недожога, что позволяет получить высококалорийное топливо и песчаные материалы. На второй стадии происходит извлечение ценных компонентов, таких как железо и алюминий, что повышает экономическую эффективность переработки. Наконец, третья стадия направлена на производство строительных материалов, включая геополимеры. По оценкам авторов, до 38 % ЗШО могут быть использованы в строительной индустрии, а 20 % – в металлургии. Предложенная технология демонстрирует комплексный подход к решению экологических проблем и максимизации рентабельности переработки [2].

Геополимеры, получаемые из алумосиликатов с помощью щелочной активации, отличаются высокой прочностью, стойкостью к агрессивным веществам и морозостойкостью. Включение ЗШО в состав геополимерных матриц снижает количество отходов, потребление цемента и выбросы углекислого газа в атмосферу [3; 7].

Отдельного внимания заслуживают методы плотностного разделения, которые позволяют отделять минеральные, стеклянные и металлические фракции. Такие методы основаны на различиях в физических свойствах компонентов ЗШО, например, плотности и магнитной восприимчивости. Материалы с плотностью менее 1 000 кг/м<sup>3</sup> обычно используются для производства строительных компонентов, тогда как фракции с плотностью выше 3000 кг/м<sup>3</sup> могут служить сырьем для извлечения металлов – железа и меди. Особенно актуально применение этих методов для Приморского края, где накоплены значительные объемы золошлаковых отходов. Предварительная подготовка, включающая промывку и сушку, играет ключевую роль в улучшении качества получаемых фракций и повышении эффективности извлечения ценных компонентов [4].

Необходимость предварительной обработки ЗШО для снижения выщелачивания потенциально токсичных элементов (РТЕ) подчеркивается рядом исследований. Согласно данным минералогического анализа, мелкие фракции (< 125 мкм) характеризуются высоким содержанием РТЕ, таких как медь, цинк, никель и сурьма, что требует интенсивной очистки. Для крупных фракций (> 1 мм) достаточно легкой водной обработки, поскольку уровень выщелачивания здесь минимальный. Например, концентрация меди в лейкатах мелких фракций может превышать допустимые значения в 6 раз, что делает их использование без дополнительной обработки невозможным. Таким образом, разделение ЗШО на три группы по размеру частиц – мелкие (< 125 мкм), средние (125 мкм – 1 мм) и крупные (> 1 мм) – является важным этапом подготовки [5].

Таким образом, методы подготовки и очистки золошлаковых отходов перед использованием в геополимерных материалах включают промывку, просеивание, плотностное разделение и предварительную обработку для снижения выщелачивания токсичных элементов. Эти процессы обеспечивают не только повышение качества исходного сырья, но и его соответствие экологическим стандартам. Внедрение современных технологий переработки, например, трехступенчатой системы ДВФУ, открывает новые возможности для полномасштабного использования ЗШО в строительной индустрии и снижения экологического воздействия. Однако для дальнейшего совершенствования данных методов необходимы дополнительные исследования, направленные на оптимизацию параметров обработки и изучение долгосрочных эффектов применения геополимерных материалов.

#### Библиографический список

1. Luhar I. A., Luhar S. Comprehensive Review on Fly Ash-Based Geopolymer // Journal of Composites Science. 2022. Vol. 6. No. 8. P. 219. DOI 10.3390/jcs6080219.
2. Оценка пригодности золошлаковых отходов для производства дорожно-строительных материалов / П. П. Панков, Н. Д. Шаванов, Д. В. Бесполитов [и др.] // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 5. С. 15–21.
3. System of industrial waste accounting and recycling in Primorsky Territory, Russia in the context of European experience / V. I. Petukhov, O. I. Litvinets, A. V. Taskin [et al.] // International Journal of Environmental and Science Education. 2016. Vol. 11. No. 18. P. 12604–12612.
4. Козлов П. Г. Вариант безопасной утилизации отходов теплоэнергетики // Инженерное дело на Дальнем Востоке России: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции, Владивосток, 21–27 января 2025 года. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2025. С. 347–351.
5. Структурообразование композиционных материалов для усиления земляного полотна / П. П. Панков, Н. Д. Шаванов, Н. А. Коновалова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 4 (784). С. 103–116.
6. Material and chemical composition of municipal solid waste incineration bottom ash fractions with different densities / F. Huber, J. Fellner, E. Korotenko [et al.] // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2021. Vol. 23. No. 1. P. 394–401. – DOI 10.1007/s10163-020-01109-z.
7. Detailed characterization of particle size fractions of municipal solid waste incineration bottom ash / E. Loginova, P. M. F. Van De Wouw, M. V. A. Florea [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 207. P. 866–874. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.10.022.

© Козлов П. Г., Таскин А. В., Федюк Р. С., Алексейко Л. Н., Федотов Д. Р., 2025