

Научная статья

УДК 691

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-1-28-36

**КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ
УГЛЕСЖИГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ****Таскин Андрей Васильевич^{1,*}, Федюк Роман Сергеевич^{1,2}
Федотов Демьян Романович¹**¹ Дальневосточный федеральный университет² Филиал ЦНИИП Минстроя России ДальНИИС

* для корреспонденции: taskin@yandex.ru

**Информация о статье**

Поступила:

25 декабря 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

22 января 2025 г.

Принята к публикации:

30 января 2025 г.

Опубликована:

12 марта 2025 г.

Ключевые слова:угольная зола, шлак
теплоэлектростанций,
вязящее, геополимер,
замещение цемента.**Аннотация.**

Приблизительно 7 млрд т промышленных отходов в Российской Федерации генерирует угледобывающая отрасль; кроме того, примерно 1,8 млрд т золошлаковых отходов (ЗШО) производят предприятия угольной энергетики. Данная статья на эту актуальную тему (утилизация многотоннажных производственных отходов с получением новой конкурентоспособной и импортзамещающей продукции) приводит результаты разработки комплексной технологии рециклинга отходов угледобычи и углерепереработки. В рамках промышленного технологического процесса была успешно протестирована методика извлечения недожженного углеродного материала, шлакового песка, железосодержащего концентрата и полых алюмосиликатных микросфер. На начальной стадии комплексной утилизации ЗШО удаляются элементы, затрудняющие дальнейшую глубокую переработку отходов: недожженный уголь, крупный шлаковый алюмосиликатный песок, оксиды железа и их производные, алюмосиликатные микросферы (если они присутствуют в конкретной золошлаковой смеси). Дальнейшая стадия комплексной обработки позволяет преобразовать еще более половины объема отходов в полезные продукты. Отдельный этап комплексной обработки включает группу технологий по созданию строительных материалов. Предложенная функциональная схема комплексной переработки ЗШО позволяет эффективно использовать золошлаковые отходы, извлекая из них полезные компоненты и производя различные материалы и изделия для различных отраслей промышленности (строительной, металлургической, дорожной и химической). Это способствует переходу энергетических предприятий на малоотходные технологии и снижению экологического воздействия на окружающую среду.

Для цитирования: Таскин А. В., Федюк Р. С., Федотов Д. Р. Комплексная переработка золошлаковых отходов углесжигающих электростанций и отходов углеобогащения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 1 (167). С. 28-36. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-1-28-36, EDN: SMDAGQ

Благодарность

Результаты исследования получены при финансовой поддержке программы Приоритет 2030 ДВФУ, договор ЕИ-796-24 от 12.08.2024 г.

Введение

В современном мире экологические проблемы становятся все более актуальными. Одной из таких проблем является образование золошлаковых отходов (ЗШО) на тепловых электростанциях. Эти отходы представляют собой смесь золы, шлака и других материалов, образующихся в процессе сжигания твердого топлива. Они могут содержать ценные компоненты, такие как металлы, оксиды и другие вещества, которые можно использовать в различных отраслях промышленности. Однако утилизация и переработка ЗШО часто вызывает трудности из-за их неоднородного состава и сложности извлечения полезных компонентов. Поэтому разработка эффективных методов переработки ЗШО является важной задачей для перехода энергетических предприятий на малоотходные технологии и снижения экологического воздействия на окружающую среду.

Угледобывающая отрасль производит около 7 млрд тонн отходов, что составляет 67% от общего объема промышленных отходов в России [1-2]. Еще одной важной отраслью, которая также генерирует значительное количество отходов, является угольная энергетика. Накопленный объем отходов составляет 1,8 млрд тонн, и каждый год он увеличивается примерно на 40 млн т [3]. Учитывая отрицательное воздействие этих отходов на окружающую среду, проблема их размещения и переработки остается актуальной и сегодня.

Современные разработки исследователей мирового уровня направлены на применение золошлаковых отходов как компонентов строительных материалов [4-8]. Asad Elmagarhe с коллегами достиг хороших результатов при применении различных видов золы в качестве составляющих материалов для дорожно-строительной отрасли [9]. Научная группа Федерального университета Сеара (Бразилия),

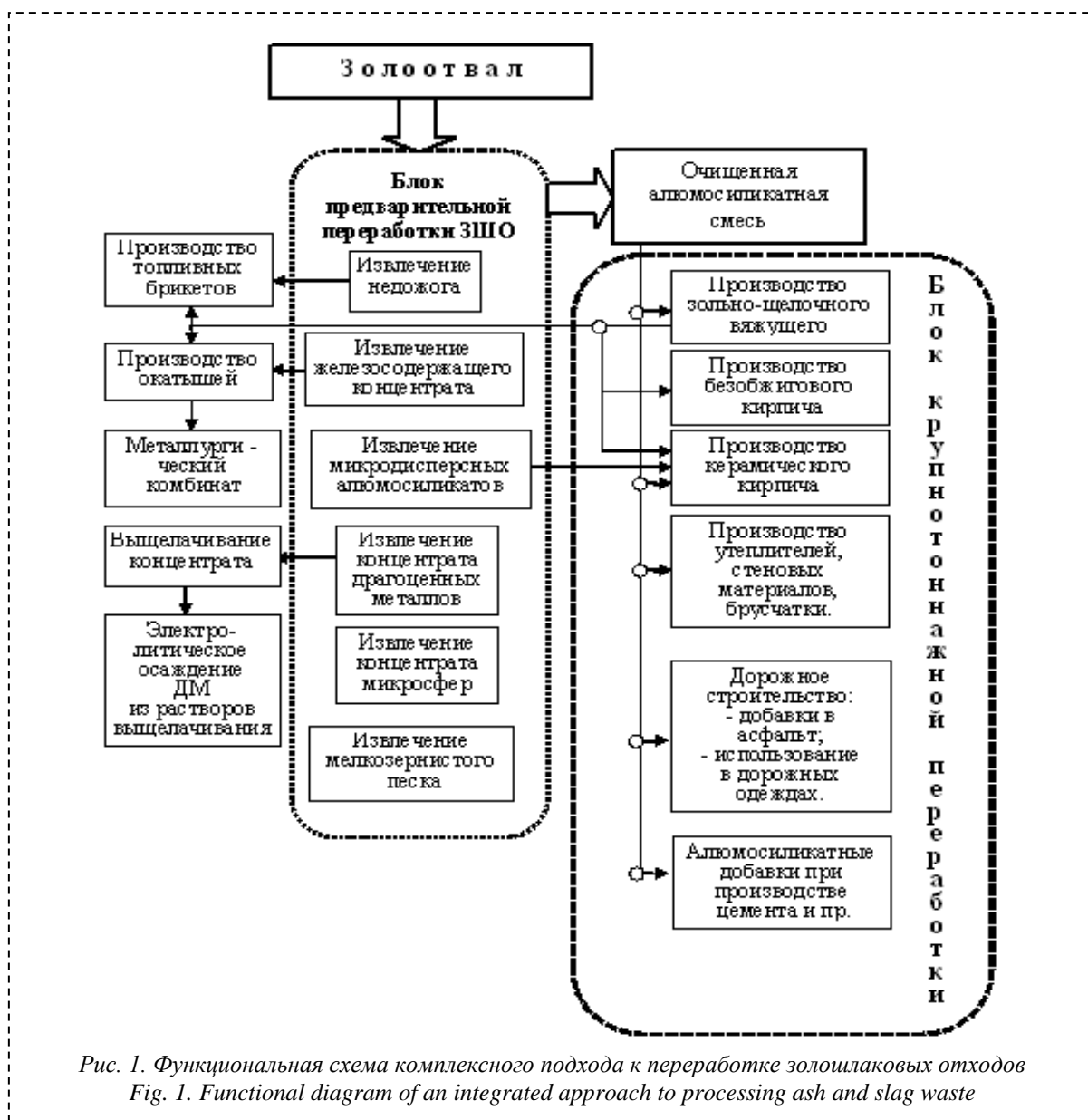


Рис. 1. Функциональная схема комплексного подхода к переработке золошлаковых отходов
Fig. 1. Functional diagram of an integrated approach to processing ash and slag waste

возглавляемая Webert В. С. Silva, Suelly Н. А. Vargas, доказала перспективность не только высокоактивных золы-уноса, но и низкоактивных гидроудаленных ЗШО в роли пуццолановых добавок [10]. Научная школа профессора Li-Juan Chai применяла метакаолин как структурирующий компонент цементных композиционных материалов [11]. Достаточно эффективным считается применение золы-уноса в строительной индустрии [12-18]. Несмотря на это, полученные ранее результаты и выводы не способны решить проблему многотоннажной переработки золошлаковых отходов (превращая их в техногенные ресурсы).

Не менее важной является задача вовлечения в повторное производство отходов горноугольной промышленности. Данные отходы (а при умелом и хозяйственном подходе – также ресурсы) находят применение только при отсыпке оснований дорожных одежд [19-20], но в этом случае потенциал рециклинга

составляет до 15% отходов из-за непостоянности химического и минерального состава, что значительно влияет на физико-механические свойства.

Материалы и методы

Золошлаковые отходы Приморской ГРЭС применялись как исходное техногенное сырье для рециклинга. Различные методики утилизации гидроудаленных ЗШО достаточно хорошо проработаны в Дальневосточном федеральном университете. Цель текущей статьи – довести лабораторные исследования до возможности производственного внедрения с получением конкурентоспособной и импортозамещающей продукции. Накопленный научный задел научного коллектива, возглавляемого к.х.н. Таскиным А. В., позволяет считать эту цель реальной. Комплексный рециклинг ЗШО является системно значимым, т.к. объединяет эффективные технологии извлечения ценных компонентов с возможностью применения в



Рис. 2. Продукты подготовительного этапа: а – недожог; б – шлаковый песок; в – топливные брикеты;

г – микросферы; д – магнетит; е, ж, з – продукты переработки магнетита: передельный чугуи; ферросилициевый сплав; шлаковое стекло (*результаты получены в сотрудничестве с Красноярским научным центром СО РАН)

Fig. 2. Products of the preparatory stage: а – underburning; б – slag sand; в – fuel briquettes; г – microspheres; д – magnetite; е, ж, з – magnetite products: pig iron; ferrosilicon alloy; slag glass (*collaboration with the Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences)

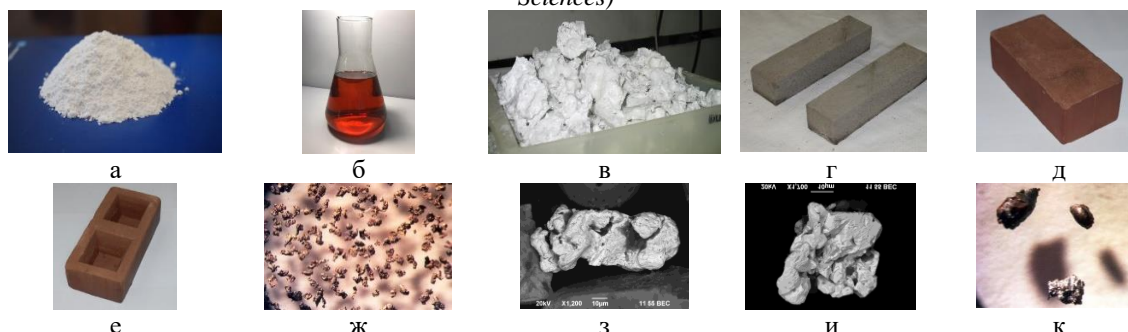


Рис. 3. Продукты второго этапа: а – диоксид кремния; б – жидкое алюмосиликатное вяжущее; в – оксид алюминия, г – геополмерный бетон на бесцементном вяжущем; д, е – высокопрочная строительная керамика с золонасыщением 100%; ж, з, и – золосодержащий концентрат и отдельные частицы; к – платиновые металлы

Fig. 3. Products of the second stage: а – silicon dioxide; б – liquid aluminosilicate binder; в – aluminum oxide, г – geopolymer concrete on a cementless binder; д, е – high-strength construction ceramics with 100% ash saturation; г, h, i – gold-containing concentrate and individual gold particles; к – particles of platinum group metals

различных отраслях народного хозяйства.

Результаты исследования

Разработанная технология организации комплексного рециклинга золошлаковых отходов включает следующие этапы:

1. Сбор и хранение золошлаковых отходов.
2. Предварительная подготовка отходов к переработке: фракционирование, удаление инородных компонентов.
3. Получение недожога угля гравитационным методом и флотацией.
4. Извлечение железосодержащего концентрата методом магнитной сепарации.
5. Получение диоксида кремния методом гидротермальной обработки в щелочной среде.
6. Извлечение концентрата редкоземельных методом кислотного выщелачивания.
7. Получение алюмосиликатного остатка простым гравитационным методом или центрифугированием.

Эта схема основана на использовании апробированных и авторских технологий, которые позволяют эффективно перерабатывать золошлаковые отходы и использовать полученные продукты в различных отраслях промышленности (Рис. 1).

На первом технологическом переделе до четверти отходов трансформируется в конкурентоспособную, рентабельную, импортозамещающую (а при должном подходе и экспортоориентированную) продукцию. Хотя эта продукция не имеет высокой добавочной стоимости, она может быть эффективно распродана на месте производства (за исключением магнетита и его производных).

Дальнейшая стадия комплексной обработки позволяет преобразовать еще более половины

объема отходов в полезные продукты (Рис. 3).

Более того, в процессе разработки методики извлечения редкоземельных и тяжелых металлов из ЗШО были получены продукты, которые хоть и являются побочными, но имеют высокую добавленную стоимость, несмотря на логистику. SiO_2 обладает высоким потенциалом сбыта внутри страны, т. к. до 2022 г. практически $\frac{4}{5}$ диоксида кремния завозилось из недружественных стран.

Третий этап комплексного вовлечения золошлаковых отходов в повторное производство включает группу технологий, связанных с производством строительных материалов (Рис. 4). Нами предложен керамический кирпич, который состоит только из геополлимерных вяжущих и в настоящее время не имеет конкурентов в Российской Федерации.

Технологические процессы на данном этапе гарантируют полную обработку алюмосиликатной смеси, оставшейся после предыдущих этапов. Очевидно, что количество и ассортимент строительных материалов зависят от размера местного рынка, однако это ограничение использования потребления строительных вяжущих (портландцемента, гипса, извести, жидкого стекла) значительно превышает количество образующихся золошлаковых отходов.

Обсуждение

В результате многолетних исследований была создана функциональная схема для комплексной переработки ЗШО, что способствует переходу энергетических компаний на малоотходные технологии. Она включает предварительную

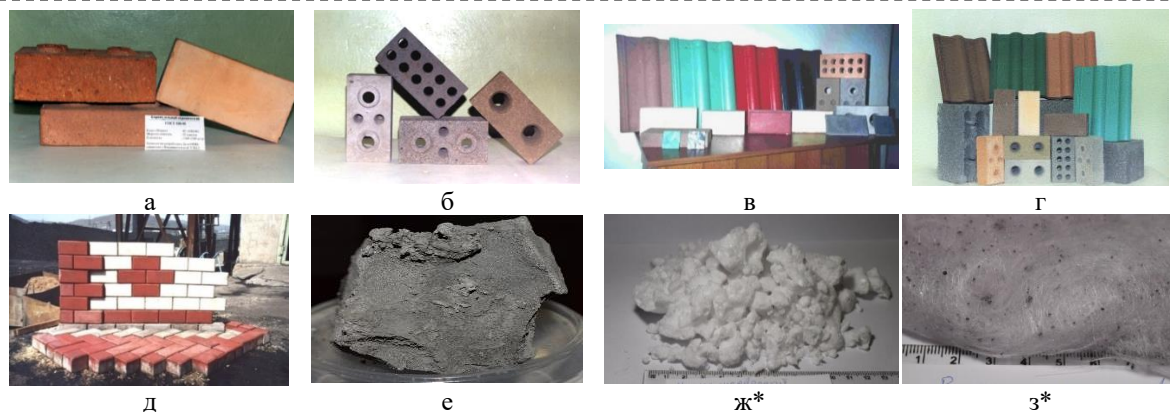


Рис. 4. Строительные материалы из ЗШО: а) кирпич керамический (лицевой и рядовой) с золонасыщением 95–98%; б) кирпич рядовой на бescементных вяжущих с золонасыщением 80%; в, г) черепица кровельная, стеновые и облицовочные материалы; д) брусчатка; е) очищенный от примесей алюмосиликат; ж) утеплитель из пеноалюмосиликата; з) минеральная вата.

(*результаты получены в сотрудничестве с Красноярским научным центром СО РАН)
Fig. 4. Construction materials from ASW: a) ceramic building brick (facing and common) with ash saturation of 95–98%; b) common brick on cement-free binders with ash saturation of 80%; c, d) roofing tiles, wall and facing materials; e) aluminosilicate purified from impurities; g) foam aluminosilicate insulation; h) mineral wool. (*results obtained in collaboration with the Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences)



добычу товарных продуктов, химические методы извлечения ценных компонентов и создание материалов и изделий для строительной, металлургической, дорожной и химической отраслей.

Благодаря инструментальным методам анализа и компьютерному моделированию [21] было выявлено, что продукты сжигания содержат и могут образовывать широкий спектр ценных компонентов в промышленных объемах, особенно это касается золошлаковых отходов теплоэлектростанций юга Дальнего Востока. Запасы золота и других драгоценных металлов составляют не менее 15 т, а редкоземельных элементов — около 1240 т. Количество алюмосиликатных микросфер может варьироваться от 0,5 до 4% от общего объема золошлаковых отходов. Золошлаковые отходы большинства ТЭС имеют среднее содержание горючих веществ (от 5 до 20%) и несгоревших угольных частиц (до 12%).

Путем комбинирования гравитационных, магнитных, флотационных методов и механохимической активации были созданы способы разделения ЗШО на минеральные фракции без драгоценных металлов и фракции предварительного концентрата драгоценных металлов. В результате объем предварительного концентрата, отправляемого на обогащение для извлечения драгоценных металлов, сократился на 80–90% по сравнению с изначальным объемом техногенных золошлаковых ресурсов.

Если использовать предложенную технологию комплексной переработки техногенных ресурсов из смеси золы и шлака, образующейся от сжигания угля на электростанциях, а также отходов обогащения

угля, то можно значительно увеличить возможности вторичного использования этих материалов (Рис. 5).

Выводы

Таким образом, предложенная функциональная схема комплексной переработки ЗШО позволяет эффективно использовать золошлаковые отходы, извлекая из них полезные компоненты и производя различные материалы и изделия для различных отраслей промышленности (строительной, металлургической, дорожной и химической). Это способствует переходу энергетических предприятий на малоотходные технологии и снижению экологического воздействия на окружающую среду.

Созданные технологии, проверенные на Приморской ГРЭС, легко адаптируются для других типов отходов, таких как продукты добычи и обогащения угля, а также отходы горно-обогатительных комбинатов. Наиболее перспективные направления включают извлечение ценных компонентов и создание геополимерных безавтоклавных вяжущих материалов из алюмосиликатного остатка. Эти материалы характеризуются высокой прочностью, долговечностью, устойчивостью к агрессивным воздействиям и меньшим воздействием на окружающую среду по сравнению с традиционным портландцементом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таразанов И. Г. Итоги работы Угольной промышленности России за январь-март 2019 года // Уголь. 2019. № 6. С. 67–77.
2. Семина И. С., Андроханов В. А., Куляпина Е. Д. Опыт использования отходов

углеобогащения для рекультивации нарушенных участков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 9. С. 159–175.

3. Alekseyko L. N., Taskin A. V. Complex recycling of ASW of energy enterprises // Proc. IX Int. Conf. Ecology and Development of Society. St. Petersburg, 2005. Pp. 12–21.

4. Лесовик В. С., Федюк Р. С. Композиты нового поколения для специальных сооружений // Строительные материалы. 2021. № 3. С. 9–17.

5. Pormmoon P., Khongpermgonson Sanit-in P., Jaturapitakkul C., Chee Ban C., Tangchirapat W. Strength, durability, and heat development characteristics of high-performance concrete containing ground coal bottom ash with low and high calcium // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 21. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03845.

6. Ma K., Li H., Xing X., Nie Q., Wu R., Feng Y., Zhao Q., Yu H., Wang Z. Study on the seismic bending behavior of coal gasification ash concrete beams under cyclic loading // Structures. 2024. Vol. 67. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106923.

7. Murtaza M., Zhang J., Yang C., Su C., Wu H. Durability of high strength self-compacting concrete with fly ash, coal gangue powder, cement kiln dust, and recycled concrete powder // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 449. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138345.

8. Min Y., Stewartson E., Suraneni P., Shearer C. R., Doug Hooton R., Burris L. E. Measuring concrete air-entraining admixture adsorption on coal ash using three-phase equilibrium and fluorescence-based methods // Cement. 2024. Vol. 18. DOI: 10.1016/j.cement.2024.100115.

9. Elmagarhe A., Lu Q., Alamri M., Alharthai M., Elnihum A. Laboratory performance evaluation of porous asphalt mixture containing recycled concrete aggregate and fly ash // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02849.

10. Silva W. B. C., Barroso S. H. A., Cabral A. E. B., Stefanutti R., Picado-Santos L. G. Assessment of concrete road paving blocks with coal bottom ash: Physical and mechanical characterization // Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 18. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02094.

11. Chai L.-J., Yue Z.-H., Guo L.-P., Chen B., Liu Q., Ma R. Performance optimization design of high ductility concrete rapid repair material incorporating coal gangue aggregate // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 446. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138044.

12. Kumar Krishnan A., Choy Wong Y., Zhang Z., Arulrajah A. A transition towards circular economy

with the utilisation of recycled fly ash and waste materials in clay, concrete and fly ash bricks: A review // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 98. DOI: 10.1016/j.job.2024.111210.

13. Sapath Roy S., Arasaratnam P., Wang J. Bacillus cereus GS-5 immobilized sintered fly ash lightweight aggregate for strength, durability, and autonomous crack healing in bacterial concrete // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 21. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e04060.

14. Luo S., Jin W., Wu W., Zhang K. Rheological and mechanical properties of polyformaldehyde fiber reinforced 3D-printed high-strength concrete with the addition of fly ash // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 98. DOI: 10.1016/j.job.2024.111387.

15. Wahab Adebayo I., Long G., Tang Z., Osman Ghone M., Zaland S., Jamaa Garba M., Yang K., Akhuzada K., Abdulfatai Oluwasina U. Effect of crumb rubber and polyethylene fiber on the strength and toughness of fly ash/slag-based geopolymer concrete // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 455. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139133.

16. McCarthy M. J., Hope T. A., Csetenyi L. J. Mechanical processing of wet stored fly ash for use as a cement component in concrete // Magazine of Concrete Research. 2024. Vol. 76(24). Pp. 1424–1438. DOI: 10.1680/jmacr.23.00303.

17. Song Q., Zou Y., Zhang P., Xu S., Yang Y., Bao J., Xue S., Liu J., Gao S., Lin L. Novel high-efficiency solid particle foam stabilizer: Effects of modified fly ash on foam properties and foam concrete // Cement and Concrete Composites. 2025. Vol. 155. 105818. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105818.

18. Hu D., Hu N., Ben S., Zhao H., Chen S., Xiang Y. Multiscale prediction model for autogenous shrinkage of early-age concrete incorporating high volume fly ash // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 98. 111281. DOI: 10.1016/j.job.2024.111281.

19. Севостьянов В. В., Фрянов В. Н., Родионов А. Е., Шишпорин В. А., Севостьянов А. В. Утилизация отходов добычи и переработки угля. Новокузнецк: СибГИУ, 2000. 55 с.

20. Панишев Н. В., Бигеев В. А., Галиулина Е. С. Перспективы утилизации хвостов углеобогащения и твердых отходов тепловых электростанций // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 2(17). С. 69–77.

21. Таскин А. В. Химико-технологические решения комплексной переработки золошлаковых отходов промышленности: диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Владивосток. 2018. 208 с.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Таскин Андрей Васильевич, заведующий лабораторией Технологий использования вторичных ресурсов, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (690922, Россия, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10), кандидат химических наук, e-mail: taskin@yandex.ru

Федюк Роман Сергеевич, профессор Военного учебного центра, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (690922, Россия, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10); главный научный сотрудник Филиал ФГБУ ЦНИИП Минстроя России ДальНИИС (690033, г. Владивосток, ул. Бородинская, д. 14) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>, e-mail: roman44@yandex.ru

Федотов Демьян Романович, ассистент Политехнического института ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (690922, Россия, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10), e-mail: fedotov_dr@dvfu.ru

Заявленный вклад авторов:

Таскин Андрей Васильевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, написание текста.

Федюк Роман Сергеевич – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, написание текста.

Федотов Демьян Романович – сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

COMPREHENSIVE PROCESSING OF COAL ASH FROM COAL-FIRED POWER PLANTS AND COAL ENRICHMENT WASTE

Andrey V. Taskin ^{1,*}, Roman S. Fediuk ^{1,2}
Demyan R. Fedotov ¹

¹ Far Eastern Federal University

² Branch of the Central Research Institute of Construction of the Ministry of Construction of Russia DalNIIS

* for correspondence: taskin@yandex.ru



Article info

Received:

25 December 2024

Accepted for publication:

22 January 2025

Accepted:

30 January 2025

Published:

12 March 2025

Keywords: coal ash, thermal power plant slag, binder, geopolymer, cement replacement

Abstract.

Approximately 7 billion tons of industrial waste in the Russian Federation are generated by the coal mining industry; in addition, approximately 1.8 billion tons of ash and slag waste (ASW) are produced by coal power plants. This article on this topical issue (utilization of large-tonnage industrial waste with the production of new competitive and import-substituting products) presents the results of the development of a comprehensive technology for recycling coal mining and coal processing waste. Within the framework of the industrial technological process, a method for extracting unburned carbon material, slag sand, iron-containing concentrate and hollow aluminosilicate microspheres was successfully tested. At the initial stage of comprehensive ASW utilization, elements that hinder further deep processing of waste are removed: unburned coal, coarse slag aluminosilicate sand, iron oxides and their derivatives, aluminosilicate microspheres (if they are present in a specific ash and slag mixture). The further stage of complex processing allows to transform more than half of the waste volume into useful products. A separate stage of complex processing includes a group of technologies for the creation of building materials. The proposed functional scheme of complex processing of ash and slag waste allows to effectively use ash and slag waste, extracting useful components from them and producing various materials and products for various industries (construction, metallurgy, road and chemical). This facilitates the transition of energy enterprises to low-waste technologies and a reduction in the environmental impact on the environment.

For citation: Taskin A.V., Fediuk R.S., Fedotov D.R. Complex processing of ash and slag waste from coal-fired power plants and coal enrichment waste. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 7(167):28-36. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-1-28-36, EDN: SMDAGQ

REFERENCES

1. Tarazanov I.G. Results of the Coal Industry of Russia for January–March 2019. *Coal*. 2019; 6:67–77.
2. Semina I.S., Androkhonov V.A., Kulyapina E.D. Experience in Using Coal Waste for Reclamation of Disturbed Sites. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2020; 9:159–175.
3. Alekseyko L.N., Taskin A.V. Complex recycling of ASW of energy enterprises. *Proc. IX Int. Conf. Ecology and Development of Society*. St. Petersburg. 2005. Pp. 12–21.
4. Lesovik V.S., Fedyuk R.S. New Generation Composites for Special Structures. *Construction Materials*. 2021; 3:9–17.
5. Pormmoon P., Khongpermgoson Sanit-in P., Jaturapitakkul C., Chee Ban C., Tangchirapat W. Strength, durability, and heat development characteristics of high-performance concrete containing ground coal bottom ash with low and high calcium. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03845.
6. Ma K., Li H., Xing X., Nie Q., Wu R., Feng Y., Zhao Q., Yu H., Wang Z. Study on the seismic bending behavior of coal gasification ash concrete beams under cyclic loading. *Structures*. 2024; 67. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106923.
7. Murtaza M., Zhang J., Yang C., Su C., Wu H. Durability of high strength self-compacting concrete with fly ash, coal gangue powder, cement kiln dust, and recycled concrete powder. *Construction and Building Materials*. 2024; 449. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138345
8. Min Y., Stewartson E., Suraneni P., Shearer C.R., Doug Hooton R., Burris L.E. Measuring concrete air-entraining admixture adsorption on coal ash using three-phase equilibrium and fluorescence-based methods. *Cement*. 2024; 18. DOI: 10.1016/j.cement.2024.100115.
9. Elmagarhe A., Lu Q., Alamri M., Alharthai M., Elnihum A. Laboratory performance evaluation of porous asphalt mixture containing recycled concrete aggregate and fly ash. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02849.
10. Silva W. B. C., Barroso S. H. A., Cabral A. E. B., Stefanutti R., Picado-Santos L. G. Assessment of concrete road paving blocks with coal bottom ash: Physical and mechanical characterization. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 18. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02094.
11. Chai. L.-J., Yue Z.-H., Guo L.-P., Chen B., Liu Q., Ma R. Performance optimization design of high ductility concrete rapid repair material incorporating coal gangue aggregate. *Construction and Building Materials*. 2024; 446. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138044.
12. Kumar Krishnan A., Choy Wong Y., Zhang Z., Arulrajah A. A transition towards circular economy with the utilization of recycled fly ash and waste materials in clay, concrete and fly ash bricks: A review. *Journal of Building Engineering*. 2024; 98. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111210.
13. Sapath Roy S., Arasaratnam P., Wang J. Bacillus cereus GS-5 immobilized sintered fly ash lightweight aggregate for strength, durability, and autonomous crack healing in bacterial concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e04060.
14. Luo S., Jin W., Wu W., Zhang K. Rheological and mechanical properties of polyformaldehyde fiber reinforced 3D-printed high-strength concrete with the addition of fly ash. *Journal of Building Engineering*. 2024; 98. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111387.
15. Wahab Adebayo I., Long G., Tang Z., Osman Ghone M., Zaland S., Jamaa Garba M., Yang K., Akhuzada K., Abdulfatai Oluwasina U. Effect of crumb rubber and polyethylene fiber on the strength and toughness of fly ash/slag-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 2024; 455. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139133.
16. McCarthy M.J., Hope T.A., Csetenyi L.J. Mechanical processing of wet stored fly ash for use as a cement component in concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2024; 76(24):1424–1438. DOI: 10.1680/jmacr.23.00303.
17. Song Q., Zou Y., Zhang P., Xu S., Yang Y., Bao J., Xue S., Liu J., Gao S., Lin L. Novel high-efficiency solid particle foam stabilizer: Effects of modified fly ash on foam properties and foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2025; 155:105818. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105818.
18. Hu D., Hu N., Ben S., Zhao H., Chen S., Xiang Y. Multiscale prediction model for autogenous shrinkage of early-age concrete incorporating high volume fly ash. *Journal of Building Engineering*. 2024; 98:111281. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111281.
19. Sevostyanov V.V., Fryanov V.N., Rodionov A.E., Shishorin V.A., Sevostyanov A.V. Utilization of coal mining and processing waste. Novokuznetsk: SibGIU; 2000. 55 p.
20. Panishev N.V., Bigeev V.A., Galiulina E.S. Prospects for the utilization of coal tailings and solid waste from thermal power plants. *Theory and technology of metallurgical production*. 2015; 2(17):69–77.
21. Taskin A.V. Chemical and technological solutions for the complex processing of ash and slag waste of industry: dissertation for the degree of candidate of medical sciences. Vladivostok. 2018. 208 p.

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Andrey V. Taskin, Head of the Laboratory of Secondary Resource Utilization Technologies, Far Eastern Federal University (10 Ajax, Vladivostok, Russky Island, 690922, Russia), Candidate of Chemical Sciences, e-mail: taskin@yandex.ru

Roman S. Fediuk, Professor of the Military Training Center, Far Eastern Federal University (10 Ajax, Vladivostok, Russky Island, 690922, Russia); Chief Researcher, Branch of the Federal State Budgetary Institution Central Research Institute of Architecture and Construction of the Ministry of Construction of Russia, Far Eastern Research Institute of Construction (14 Borodinskaya St., Vladivostok, 690033) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>, e-mail: roman44@yandex.ru

Demyan R. Fedotov, Assistant, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (10 Ajax, Vladivostok, Russky Island, 690922, Russia), e-mail: fedotov_dr@dvfu.ru

Contribution of the authors:

Andrey V. Taskin – formulation of the research task, scientific management, writing the text.

Roman S. Fediuk – review of relevant literature, conceptualization of the study, writing the text.

Demyan R. Fedotov – collection and analysis of data, review of relevant literature, conclusions, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

