Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-361-366 Оригинальная статья/Research article
УДК 622.7(062) 669(062) Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Рециклинг отходов алюминиевого производства

Захар А. Иванов [1] zaharivanov53345@gmail.com 0009-0009-0682-897X
Владислава И. Федорова [1] carrynovak@gmail.com 0009-0000-1759-5985
Ольга А. Есякова [1] olga-la83@mail.ru 0000-0003-3819-0543
Оксана В. Колесниченко [1] oksana.umnica@mail.ru 0009-0006-1216-7221

1 Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, просп, им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660037, Россия

Аннотация. Настоящая статья посвящена исследованию современных способов переработки твёрдых отходов алюминиевого производства, с особым акцентом на отработанную угольную футеровку электролизёров. Рассматриваются ключевые аспекты проблемы: химический состав и токсикологические характеристики футеровочных материалов, экологические риски, связанные с захоронением отходов, содержащих фториды и цианиды, а также анализируются существующие методы утилизации (механические, термические, химические) с выявлением их недостатков. Основное внимание уделяется гидрометаллургической технологии рециклинга, включающей последовательные стадии измельчения, щелочного выщелачивания с параллельной детоксикацией цианидов, флотации для сепарации углерода и осаждения фторидных солей. В результате переработки получают три целевых продукта: очищенный углерод (85–90 % графита) для производства анодов или топливных целей, очищенные алюмосиликаты для огнеупорной и строительной промышленности, а также фторидные соли, возвращаемые в металлургический цикл. Показано, что предлагаемая технология реализует принцип «ноль отходов» и экономически целесообразна для крупных предприятий.

Ключевые слова: алюминий, отходы, рециклинг, угольная футеровка, экологическая безопасность.

Recycling of aluminium waste

Zakhar A. Ivanov [1] zaharivanov53345@gmail.com 0009-0009-0682-897X
Vladislava I. Fedorova [1] carrynovak@gmail.com 0009-0000-1759-5985
Olga A. Esyakova [1] olga-la83@mail.ru 0000-0003-3819-0543
Oksana V. Kolesnichenko [1] oksana.umnica@mail.ru 0009-0006-1216-7221

1 Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Gas Prospekt, 1 Krasnoyarsky Rabochy, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russia

Abstract. This article is devoted to the study of modern methods of solid waste recycling in the aluminum production, with a special focus on the spent coal lining of the electrolyzers. The key aspects of the problem are considered: the chemical composition and toxicological characteristics of the lining materials, the environmental risks associated with the disposal of waste containing fluorides and cyanides, and the existing methods of disposal (mechanical, thermal, and chemical) are analyzed to identify their drawbacks. The main focus is on hydrometallurgical recycling technology, which includes sequential stages of grinding, alkaline leaching with parallel cyanide detoxification, flotation for carbon separation, and precipitation of fluoride salts. As a result of processing, three target products are obtained: purified carbon (85-90% graphite) for the production of anodes or fuel purposes, purified aluminosilicates for the refractory and construction industries, and fluoride salts that are returned to the metallurgical cycle. It has been shown that the proposed technology implements the zero-waste principle and is economically feasible for large enterprises.

Keywords: aluminum, waste, recycling, coal lining, environmental safety.

Введение

Производство алюминия остается одним из важнейших секторов современной промышленности, играя ключевую роль в развитии инфраструктуры, транспорта и многих других областей экономики. Вместе с тем, данная отрасль связана с интенсивным потреблением природных ресурсов и формированием значительных объемов твердых отходов, значительная доля которых приходится на отработанную угольную футеровку электролизеров. Проблема утилизации этих отходов становится все более острой в связи с увеличением масштабов добычи и производства алюминия, особенно в развивающихся странах, где наблюдается быстрый рост потребления металла [1–3].

Отработанная угольная футеровка содержит ценнейшие компоненты, такие как углерод, фториды алюминия и натрия, которые могли бы повторно использоваться в различных областях промышленности. Например, чистый углерод востребован в изготовлении высокопрочных композитов, абразивных инструментов и электродов, а фториды широко применяются в химии и металлургии [4].

Для цитирования
Иванов З.А., Федорова В.И., Есякова О.А., Колесниченко О.В. Рециклинг отходов алюминиевого производства // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 361–366. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-361-366

For citation
Ivanov Z.A., Fedorova V.I., Esyakova O.A., Kolesnichenko O.V. Recycling of aluminium waste. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 361–366. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-361-366

© 2026, Иванов З.А. и др. / Ivanov Z.A. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Между тем, традиционные способы хранения и захоронения этих отходов приводят к серьезным экологическим проблемам, включая загрязнение почв, водных объектов и атмосферного воздуха токсичными соединениями, такими как фториды и тяжелые металлы [5].

Учитывая глобальные тенденции перехода к экономике замкнутого цикла и ужесточающиеся требования по охране природы, возникает острая необходимость в разработке эффективных решений утилизации материалов, потерявших потребительские свойства [6]. Такие подходы позволят уменьшить объемы свалок, сократить потребление первичного сырья и обеспечить более рациональное использование природных ресурсов [7]. Кроме того, вовлечение отходов в производственные цепочки создаст новые рабочие места и повысит конкурентоспособность предприятий [8, 9].

Существует несколько подходов к переработке угольной футеровки алюминиевых электролизеров, однако большинство из них имеют существенные ограничения и недостаточные уровни экологической и экономической эффективности [10]. Рассмотрим некоторые распространенные методы и отметим их недостатки.

1. Механическое измельчение и сортировка [11].

Метод предполагает механическое разрушение отработанного материала с последующим отделением отдельных компонентов. Несмотря на простоту исполнения, этот подход сталкивается со следующими проблемами:

– низкая степень выделения чистых компонентов;

– высокие энергетические затраты при измельчении;

– образование большого объема пылегазовых выбросов, негативно влияющих на здоровье работников и состояние окружающей среды [12].

Данный метод не решает вопроса полного восстановления ценного материала и его повторного использования в промышленном масштабе.

2. Термическая обработка (пиролиз).

Метод основан на высокотемпературной обработке отходов, позволяющей разделить углеводородные составляющие и минеральные компоненты [13].

Недостатками пиролиза являются:

– расход значительного количества энергии для поддержания температуры выше 1000 °C;

– значительные потери ценной углеродистой фракции из-за неполного сгорания;

– повышенный риск образования токсичных газов, таких как CO и NOx, увеличивающих нагрузку на очистные системы;

– получаемая фракция недостаточно однородна для прямого применения в промышленности.

3. Химическое растворение (выщелачивание).

Использование кислотных или щелочных растворов для экстракции определенных компонентов (например, алюминия и его фторидов) теоретически выглядит многообещающе. Но на практике встречаются серьезные трудности:

– сложность подбора оптимальных концентраций реагентов и контроля процесса;

– воздействие агрессивных сред на оборудование, приводящее к быстрому износу установок;

– остаточное присутствие токсичных металлов и фтористых соединений в сточных водах, требующее многоступенчатой последующей очистки [14, 15].

Этот метод редко находит широкое распространение ввиду своей низкой практической реализуемости.

Материалы и методы

Одним из главных недостатков электролизеров с самообжигающимися анодами является образование значительных объемов газообразных и твердых отходов, содержащих вредные вещества, оказывающих негативное влияние на окружающую среду при их выделении и складировании на шламовых полях. Алюминиевые заводы зарубежных стран практически все оснащены электролизерами с предварительно обожженными анодами (ОА), позволяющие достичь более высоких техноло-гических показателей [16].

После окончания срока службы защитные покрытия становятся источником опасных соединений, таких как фториды и цианиды. Состав угольной футеровки зависит от условий эксплуатации и характеристики сырья, но основные компоненты остаются постоянными.

Химический состав отработанной угольной футеровки характеризуется следующими основными компонентами (масс.%), представленными в таблице 1.

Перечисленные компоненты определяют физико-химические свойства футеровочного материала и влияют на выбор способов его переработки.

Таблица 1.

Химический состав отработанной угольной футеровки

Table 1.

Chemical composition of spent coal linings

Элемент Element	Содержание,% Content,%
C	40–70
AlF_3	1–5
NaF	10–14
Na_3AlF_6	16–18
$Na_5Al_3F_{14}$	1,4
Al_2O_3	5–6
CaF_2	1
Al_4C_3	10
Прочие элементы, включая железо, магний, кремний и другие примеси Other	2–7

Эти показатели варьируются в зависимости от условий эксплуатации и типа используемой футеровочной композиции. Основная масса углерода представлена графитизированным материалом, обладающим высокой теплопроводностью и химической стабильностью, что делает его подходящим для работы в агрессивных средах электролиза.

Технология «Рециклинг» отходов футеровки – это гидрометаллургический процесс детоксикации при комнатной температуре и атмосферном давлении, который переводит отходы в неопасный материал, пригодный для вторичной переработки. Эта технология является самодостаточной и идеально адаптирована к потребностям алюминиевых заводов, которым требуется локальное решение на месте. В дополнение к детоксикации, этот метод позволяет получать два типа продукта высокой чистоты, которые могут рассматриваться в качестве вторичного материального ресурса для производства углеродсодержащих материалов и алюмосиликатов в различных отраслях промышленности [17, 18].

Основными этапами обработки отходов являются:

1) измельчение отходов футеровки до необходимого размера (в основном менее 4 мм, но возможны и другие фракции);

2) выщелачивание NaOH для удаления солей (в основном криолита) с параллельной детоксикацией (удаление цианидов с помощью активированной перекиси водорода). Химически активные газы, образующиеся при взаимодействии с водой, обезвреживаются.

3) флотация для удаления углерода. Применяется только при необходимости повторного использования алюмосиликатов;

4) осаждение солей фторида кальция. Извлеченный фильтрат NaF (после 2-й стадии) смешивают с известковым молочком для получения суспензии. С помощью фильтр-пресса она разделяется на два компонента: кристаллиты CaF_2 и жидкую фракцию NaOH.

В результате процесса получают следующие продукты:

– фракцию, богатую углеродом (85–90% графита), с небольшим содержанием оксида алюминия и силикатов, а также CaF_2, который применим в металлургии. Как вариант, эту фракцию можно повторно использовать для производства анодов при высокой химической чистоте (т. е. содержание натрия должно быть низкое). В качестве альтернативы углеродная фракция может быть использована в качестве шлакообразователя или топлива (для замены кокса) в сталелитейной промышленности.

– очищенный песчаный материал с содержанием углерода или без него (в зависимости от стадии флотации). Потенциально его можно использовать в производстве цемента, в качестве геотехнического наполнителя, бетонных смесей, огнеупоров и т. д.

– фтористые соли, которые могут быть использованы в производстве алюминия, в металлургии в качестве флюса и в производстве цемента.

Результаты

В качестве исследуемых образцов выступает угольная футеровка. Химический анализ был проведен с использованием энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного метода (ED-XRF) Xepos [19].

Энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный метод (Energy Dispersive X-ray Fluorescence, ED-XRF) является современным инструментом качественного и количественного элементного анализа различных материалов. Его суть заключается в возбуждении атомов исследуемого образца потоком высокоэнергетических фотонов (рентгеновского излучения), после чего фиксируется характерное вторичное излучение, называемое рентгеновской флуоресценцией.

При воздействии рентгеновского луча на поверхность образца электроны внутренней оболочки атома переходят на возбужденные орбитали, высвобождая энергию в виде квантов характеристического излучения. Длина волны испущенного излучения уникальна для каждого элемента таблицы Менделеева, что позволяет определить качественный состав образца. По интенсивности сигналов определяется концентрация каждого элемента в материале.

Фазовую идентификацию проводили с помощью метода порошковой рентгеновской дифракции (XRD). Метод порошковой рентгеновской дифракции (X-Ray Diffraction, XRD) является эффективным способом идентификации фазового состава твёрдых тел. Суть метода заключается в изучении взаимодействия рентгеновского излучения с веществом. Когда рентгеновский пучок попадает на кристаллическую структуру, он рассеивается в определённых направлениях согласно закону Брэгга, отражаясь от плоскостей атомов внутри кристалла. Регистрация этих дифракционных максимумов даёт информацию о структуре и составе вещества.

Основные шаги анализа методом XRD.

1.Подготовка образца в виде порошка с равномерным распределением зерен.

2.Проведение рентгеновского эксперимента на специальном оборудовании (Bruker D8 Advance).

3.Интерпретация результатов путём сопоставления экспериментального спектра с базами данных известных кристаллических структур.

Химический состав исследованных образцов представлен в таблице 2.

Обсуждение

Полученные данные подтвердили наличие ценных компонентов, таких как оксиды алюминия и натрия, которые могут быть повторно использованы в промышленных процессах.

Предлагаемый технологический процесс рециклинга эффективен и экономически целесообразен для крупных алюминиевых предприятий [20].

Таблица 2.

Химический состав исследуемого образца

Table 2.

Chemical composition of the test sample

Оксид	Содержание (%, масс.)
Na_2O	6.38
MgO	0.21
Al_2O_3	4.11
SiO_2	4.86
P_2O_5	0.05
K_2O	0.48
CaO	2.81
TiO_2	0.10
Fe_2O_3	0.63
Летучие	79.78

Заключение

Исследование показало, что предлагаемая технология рециклинга отходов алюминиевого производства является перспективным решением, позволяющим снизить объемы захоронения отходов, повысить ресурсосбережение и создать дополнительные экономические выгоды для отрасли.

Литература

1 Цилибина В.М. Современное состояние производства и потребления алюминия в мире // Труд. Профсоюзы. Общество. 2021. № 2 (72). С. 34–42.

2 Иванков С.И., Троицкий А.В. Проблемы переработки и утилизации многотоннажных отходов алюминиевой промышленности и пути их решения (обзор) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2020. № 3. С. 2–26. doi: 10.36535/0869–1002–2020–03–1

3 Матевосова К.Л., Грязнова В.А., Чазов Т.К. Экологические проблемы и устойчивое развитие алюминиевой промышленности // Отходы и ресурсы. 2019. Т. 6. № 2. С. 9. doi: 10.15862/11ECOR219

4 Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Сомов В.В. Определение оптимальных параметров выщелачивания фтора из угольной части отработанной футеровки демонтированных электролизеров производства алюминия // Записки Горного института. 2019. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnyh-parametrov-vyschelachivaniya-ftora-iz-ugolnoy-chasti-otrabotannoy-futerovki-demontirovannyh-elektrolizerov (дата обращения: 11.03.2026).

5 Сомов В.В. и др. Аналитические методы исследования образцов футеровки алюминиевого электролизера // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 5. С. 607–620. doi: 10.17516/1999–494X-2017–10–5–607–620

6 Dorokhina E. Yu., Kharchenko S.G. Circular Economy in Russia // Circular Economy: Recent Trends in Global Perspective. Singapore: Springer Verlag, 2021. P. 309–327. doi: 10.1007/978–981–16–0913–8_10

7 Иванков С.И., Троицкий А.В. Проблемы переработки и утилизации многотоннажных отходов алюминиевой промышленности и пути их решения (обзор) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2020. № 3. С. 2–26. doi: 10.36535/0869–1002–2020–03–1

8 Егорова А.П. Экономика замкнутого цикла как альтернатива линейной экономике: понятие, особенности и проблемы формирования в России // XXXVI Международные Плехановские чтения: сб. ст. участников конф. В 4-х т. М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2023. С. 273–278.

9 Петлин И.В., Лесникова М.С. Пути переработки и утилизации фторсодержащих отходов алюминиевой промышленности // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2017. Т. 60. № 4. С. 108–113. doi: 10.6060/tcct.2017604.5352

10 Gonzalo-Delgado L., et al. Recycling of hazardous waste from tertiary aluminium industry in a value-added material // Waste Management & Research. 2011. V. 29. № 2. P. 127–134. doi: 10.1177/0734242X10378330

11 Матус Л.И., Нефедьева Е.Э. Основные промышленные методы переработки отходов производства и потребления. Волгоград: ВолгГТУ, 2019. 96 с. ISBN 978–5–9948–3456–5.

12 Пат. 2804973 C1 Российская Федерация, МПК C25C 3/08, B07B 1/30. Способ подготовки рециклинга неформованного футеровочного материала из катодного устройства электролизера и устройство для его осуществления / Прошкин А.В., Пингин В.В., Сбитнев А.Г., Агафонов Д.Г.; заявитель ООО "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр". № 2023101893; заявл. 30.01.2023; опубл. 09.10.2023.

13 Бондаренко А.В., Моисеенко Н.В., Левкина В.В. Совместный пиролиз каменноугольной шихты и отходов биомассы для производства металлургического кокса // Южно-Сибирский научный вестник. 2024. № 6 (58). С. 141–148. doi: 10.25699/SSSB.2024.58.6.013

14 Сомов В.В., и др. Математическое моделирование процесса гидрометаллургической переработки демонтированной угольной футеровки алюминиевых электролизеров // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 4 (147). С. 829–843. doi: 10.21285/1814–3520–2019–4–829–843

15 Harmaji A., Jafari R., Simard G. Valorization of Residue from Aluminum Industries: A Review // Materials. 2024. V. 17. № 21. P. 5152. doi: 10.3390/ma17215152

16 Ржечицкий Э.П., Петровский А.А., Немчинова Н.В., Иванов А.А. Разработка технологии переработки теплоизоляционной части отработанной футеровки алюминиевых электролизеров // Вестник ИрГТУ. 2017. № 9 (128). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tehnologii-pererabotki-teploizolyatsionnoy-chasti-otrabotannoy-futerovki-alyuminievyh-elektrolizerov (дата обращения: 11.03.2026).

17 Брынзарь И.В. и др. Об опыте и проблемах внедрения технологии рециклинга // Экономика и инновации: сб. ст. участников межвузовской науч.-практ. конф. В 3-х т. М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2024. С. 256–261.

18 Mahinroosta M., Allahverdi A. Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review // Journal of Environmental Management. 2018. V. 223. P. 452–468. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.06.068

19 SPECTRO XEPOS / ED-XRF Spectrometers. AMETEK Inc., 2023. 8 p.

20 Wesdock J.C., Arnold I.M. Occupational and environmental health in the aluminum industry: key points for health practitioners // Journal of Occupational and Environmental Medicine. 2014. V. 56. № 5 (Suppl.). P. S5-S11. doi: 10.1097/JOM.0000000000000071

References

1 Tsilibina V.M. The Current State of Aluminum Production and Consumption in the World. Labor. Trade Unions. Society. 2021. no. 2(72). pp. 34–42. (in Russian).

2 Ivankov S.I., Troitsky A.V. Problems of processing and disposal of large-tonnage waste from the aluminum industry and ways to solve them (review). Scientific and Technical Aspects of Environmental Protection. 2020. no. 3. pp. 2–26. doi: 10.36535/0869–1002–2020–03–1 (in Russian).

3 Matevosova K.L., Gryaznova V.A., Chazov T.K. Environmental Problems and Sustainable Development of the Aluminum Industry. Waste and Resources. 2019. vol. 6. no. 2. article 9. doi: 10.15862/11ECOR219 (in Russian).

4 Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Somov V.V. Determination of the optimal parameters for leaching fluorine from the carbon component of the spent lining of dismantled aluminum production electrolyzers. Journal of the Mining Institute. 2019. no. 1. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnyh-parametrov-vyschelachivaniya-ftora-iz-ugolnoy-chasti-otrabotannoy-futerovki-demontirovannyh-elektrolizerov (accessed: 11.03.2026) (in Russian).

5 Somov V.V., Nemchinova N.V., Korepina N.A. Analytical methods for studying aluminum electrolyzer lining samples. Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology. 2017. vol. 10. no. 5. pp. 607–620. doi: 10.17516/1999–494X-2017–10–5–607–620 (in Russian).

6 Dorokhina E. Yu., Kharchenko S.G. Circular Economy in Russia. In: Circular Economy: Recent Trends in Global Perspective. Singapore: Springer Verlag, 2021. pp. 309–327. doi: 10.1007/978–981–16–0913–8_10.

7 Ivankov S.I., Troitsky A.V. Problems of processing and disposal of large-tonnage waste from the aluminum industry and ways to solve them (review). Scientific and Technical Aspects of Environmental Protection. 2020. no. 3. pp. 2–26. doi: 10.36535/0869–1002–2020–03–1 (in Russian). [Duplicate of item 2, removed from final list].

8 Egorova A.P. Closed-loop economy as an alternative to linear economy: concept, features and problems of formation in Russia. In: XXXVI International Plekhanov Readings: Collection of articles by conference participants. In 4 volumes, Moscow, April 25–27, 2023. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics, 2023. pp. 273–278. (in Russian).

9 Petlin I.V., Lesnikova M.S. Methods of processing and disposal of fluorine-containing waste from the aluminum industry. Proceedings of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2017. vol. 60. no. 4. pp. 108–113. doi: 10.6060/tcct.2017604.5352 (in Russian).

10 Gonzalo-Delgado L., et al. Recycling of hazardous waste from tertiary aluminium industry in a value-added material. Waste Management & Research. 2011. vol. 29. no. 2. pp. 127–134. doi: 10.1177/0734242X10378330.

11 Matus L.I., Nefedieva E.E. Basic industrial methods of processing production and consumption waste. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2019. 96 p. (in Russian).

12 Patent no. 2804973 C1, Russian Federation, IPC C25C 3/08, B07B 1/30. A method for preparing the recycling of unformatted lining material from the cathode device of an electrolyzer and a device for its implementation. Proshkin A.V., Pingin V.V., Sbitnev A.G., Agafonov D.G.; applicant Limited Liability Company United Company RUSAL Engineering and Technology Center. no. 2023101893; filed 30.01.2023; publ. 09.10.2023. (in Russian).

13 Bondarenko A.V., et al. Joint pyrolysis of coal charge and biomass waste for the production of metallurgical coke. South Siberian Scientific Bulletin. 2024. no. 6(58). pp. 141–148. doi: 10.25699/SSSB.2024.58.6.013 (in Russian).

14 Somov V.V., Nemchinova N.V., Bychinsky V.A. Mathematical modeling of the hydrometallurgical processing of dismantled coal lining of aluminum electrolyzers. Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2019. vol. 23. no. 4(147). pp. 829–843. doi: 10.21285/1814–3520–2019–4–829–843 (in Russian).

15 Harmaji A., Jafari R., Simard G. Valorization of Residue from Aluminum Industries: A Review. Materials. 2024. vol. 17. no. 21. article 5152. doi: 10.3390/ma17215152.

16 Rzhechitsky E.P., et al. Development of a technology for processing the thermal insulation part of spent linings of aluminum electrolyzers. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2017. no. 9 (128). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tehnologii-pererabotki-teploizolyatsionnoy-chasti-otrabotannoy-futerovki-alyuminievyh-elektrolizerov (accessed: 11.03.2026) (in Russian).

17 Brynzar I.V., Zvyagin K.A. On the experience and problems of implementing recycling technology. In: Economics and Innovation: Collection of articles by participants of the interuniversity scientific and practical conference. In 3 volumes, Moscow, November 19–22, 2024. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics, 2024. pp. 256–261. (in Russian).

18 Mahinroosta M., Allahverdi A. Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review. Journal of Environmental Management. 2018. vol. 223. pp. 452–468. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.06.068.

19 Analytical Performance in a Class by Itself. SPECTRO XEPOS / ED-XRF Spectrometers. AMETEK Inc., 2023. 8 p.

20 Wesdock J.C., Arnold I.M. Occupational and environmental health in the aluminum industry: key points for health practitioners. Journal of Occupational and Environmental Medicine. 2014. vol. 56. no. 5 (suppl.). pp. S5-S11. doi: 10.1097/JOM.0000000000000071.

Сведения об авторах

Захар А. Иванов магистрант, кафедра промышленной экологии, процессов и аппаратов химических производств, Сибирский государственный университет науки и технологий, просп, им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Россия, zaharivanov53345@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-0682-897X

Владислава И. Федорова магистрант, кафедра промышленной экологии, процессов и аппаратов химических производств, Сибирский государственный университет науки и технологий, просп, им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Россия,, carrynovak@gmail.com
https://orcid.org/0009-0000-1759-5985

Ольга А. Есякова к.б.н. доцент, зав. кафедры, кафедра промышленной экологии, процессов и аппаратов химических производств, Сибирский государственный университет науки и технологий, просп, им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Россия,, olga-la83@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3819-0543

Оксана В. Колесниченко к.х.н., доцент, кафедра промышленной экологии, процессов и аппаратов химических производств, Сибирский государственный университет науки и технологий, просп, им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Россия,, oksana.umnica@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-1216-7221

Information about authors

Zakhar A. Ivanov Master's degree student, Department of Industrial Ecology, Processes, and Apparatuses of Chemical Production, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Gas Prospekt, 1 Krasnoyarsky Rabochy, 31, 660037, Russia, zaharivanov53345@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-0682-897X

Vladislava I. Fedorova Master's degree student, Department of Industrial Ecology, Processes, and Apparatuses of Chemical Production, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Gas Prospekt, 1 Krasnoyarsky Rabochy, 31, 660037, Russia, carrynovak@gmail.com
https://orcid.org/0009-0000-1759-5985

Olga A. Esyakova Cand. Sci. (Bio), Associate Professor, Head of the Department, Department of Industrial Ecology, Processes, and Apparatuses of Chemical Production, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Gas Prospekt, 1 Krasnoyarsky Rabochy, 31, 660037, Russia, olga-la83@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3819-0543

Oksana V. Kolesnichenko Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of Industrial Ecology, Processes, and Apparatuses of Chemical Production, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Gas Prospekt, 1 Krasnoyarsky Rabochy, 31, 660037, Russia, oksana.umnica@mail.ru
https://orcid.org/0009-0006-1216-7221

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 21/03/2026	После редакции 18/04/2026	Принята в печать 20/04/2026
Received 21/03/2026	**Accepted in revised** 18/04/2026	Accepted 20/04/2026