

Статья поступила в редакцию: 09.08.2026

Статья принята к публикации: 19.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 669.3+546.57

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23334

Предварительная гидрометаллургическая переработка конвертерной пыли медеплавильного производства методом сернокислотного выщелачивания

Эшонкулов Учкун Худайназар угли

PhD

доц. Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

ORCID: 0009-0002-8415-7218

E-mail: ulugruziyev2@gmail.com

Хакбердиев Дилшод Кодир угли

ассистент

Каршинский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Карши

Preliminary hydrometallurgical processing of converter dust from copper smelting production by sulfuric acid leaching method

Eshonkulov Uchkun Khudajnazar ugli

PhD, Associate Professor

Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Khakberdiev Dilshod Kodir ugli

Assistant

Karshi State Technical University

Republic of Uzbekistan, Karshi

Аннотация

Конвертерная пыль медеплавильного производства представляет собой ценное техногенное сырьё, содержащее медь, свинец, цинк, висмут, железо и благородные металлы. Рациональная переработка данного материала позволяет одновременно извлекать ценные компоненты и снижать экологическую нагрузку, связанную с накоплением металлургических отходов. Целью настоящей работы является исследование процесса предварительной гидрометаллургической переработки конвертерной пыли методом селективного сернокислотного выщелачивания для извлечения меди и цинка с последующим

Библиографическое описание: Эшонкулов У.Х.У., Хакбердиев Д.К.У. Предварительная гидрометаллургическая переработка конвертерной пыли медеплавильного производства методом сернокислотного выщелачивания // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23334>

концентрированием висмута в твёрдом остатке. В качестве объекта исследования использовали конвертерную пыль медеплавильного производства АО «Алмалыкский ГМК». Гранулометрический состав исследовали методом лазерной дифракции, фазовый состав определяли методом рентгенофазового анализа (XRD), а морфологические особенности частиц изучали с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионного анализа (EDS). Установлено, что материал характеризуется высокой дисперсностью и сложным минералогическим составом. Экспериментально показано, что при концентрации серной кислоты 50 г/л, комнатной температуре и продолжительности процесса 60 мин достигается высокая степень извлечения меди при сохранении висмута в твёрдом остатке. После выщелачивания содержание висмута в кеке увеличивается примерно до 5,3 %, что свидетельствует об эффективном концентрировании данного металла на первой стадии переработки. Полученные результаты подтверждают перспективность применения селективного сернокислотного выщелачивания в технологии комплексной переработки конвертерной пыли и создают предпосылки для дальнейшего извлечения висмута гидрометаллургическими методами.

Abstract

Converter dust generated during copper smelting is a valuable secondary resource containing copper, lead, zinc, bismuth, iron, and precious metals. Efficient utilization of this technogenic material enables the recovery of valuable components while reducing the environmental impact associated with metallurgical waste accumulation. The aim of this study was to investigate the preliminary hydrometallurgical treatment of converter dust by selective sulfuric acid leaching to recover copper and zinc while concentrating bismuth in the solid residue. Converter dust collected from the copper smelter of Almalyk Mining and Metallurgical Complex was used as the research material. Particle size distribution was determined by laser diffraction, mineralogical composition was analyzed using X-ray diffraction (XRD), and particle morphology and elemental distribution were examined by scanning electron microscopy (SEM) coupled with energy-dispersive spectroscopy (EDS). The investigated material exhibited a highly dispersed structure and a complex mineralogical composition. Experimental results demonstrated that the optimum leaching conditions were achieved at a sulfuric acid concentration of 50 g/L, room temperature, and a leaching time of 60 min, providing a high copper extraction efficiency while retaining bismuth in the insoluble residue. After leaching, the bismuth content in the residue increased to approximately 5.3 wt.%, indicating effective enrichment during the preliminary processing stage. The obtained results confirm that selective sulfuric acid leaching is an efficient pretreatment step for the comprehensive hydrometallurgical processing of converter dust and provides favorable conditions for the subsequent recovery of bismuth from the enriched residue.

Ключевые слова: конвертерная пыль, сернокислотное выщелачивание, гидрометаллургия, медь, цинк, висмут, комплексная переработка.

Keywords: converter dust, sulfuric acid leaching, hydrometallurgy, copper extraction, zinc, bismuth enrichment, metallurgical waste.

Введение

Конвертерная пыль медеплавильного производства представляет собой ценное техногенное сырьё, содержащее значительные количества цветных и благородных металлов, таких как медь, свинец, цинк, висмут, железо и серебро. Переработка данного вида отходов позволяет не только извлекать ценные компоненты, но и решать важные экологические задачи, связанные с сокращением объёмов накопления металлургических отходов и снижением негативного воздействия на окружающую среду [1]. В связи с этим конвертерная пыль рассматривается как перспективный источник вторичных сырьевых ресурсов для получения цветных металлов.

Проблема переработки пылевидных продуктов медеплавильного производства остаётся актуальной на протяжении многих десятилетий. Снижение качества медных концентратов, увеличение содержания примесных элементов и вовлечение в переработку более сложного сырья приводят к росту количества образующейся конвертерной пыли и усложняют её дальнейшую переработку [8]. Количество и состав пыли зависят от типа плавильного агрегата, минералогического состава концентратов, степени кислородного обогащения дутья, состава флюсов и количества оборотных материалов. На медеплавильном заводе АО «Алмалыкский ГМК» при конвертировании медных штейнов образуется мелкодисперсная конвертерная пыль, содержащая значительные количества меди, свинца, цинка, висмута и благородных металлов. Согласно литературным данным, количество конвертерной пыли составляет в среднем 5–10 % массы перерабатываемой шихты, что обуславливает необходимость её комплексной переработки [12].

В настоящее время для переработки конвертерной пыли широко применяются гидрометаллургические методы, основанные на селективном выщелачивании легкорастворимых соединений меди и цинка. Такой подход позволяет эффективно извлекать основные цветные металлы в раствор и одновременно получать твёрдый остаток, обогащённый менее растворимыми компонентами [13]. Эффективность данной стадии во многом определяет технологическую и экономическую целесообразность дальнейшей комплексной переработки конвертерной пыли [7].

Целью настоящей работы является исследование процесса предварительной гидрометаллургической переработки конвертерной пыли медеплавильного производства методом селективного серноокислотного выщелачивания. Основное внимание уделено изучению условий извлечения меди и цинка в раствор с получением твёрдого остатка, обогащённого висмутом, который может служить перспективным сырьём для последующей переработки [4].

Методология исследования

В качестве объекта исследования использовали образцы конвертерной пыли, отобранные на медеплавильном производстве АО «Алмалыкский ГМК». Исходный материал применяли без дополнительной подготовки. Предварительная гидрометаллургическая обработка заключалась в селективном серноокислотном выщелачивании, направленном на извлечение меди и цинка в раствор с сохранением висмута в твёрдом остатке. Все опыты проводили при атмосферном давлении, а за исключением экспериментов по изучению

влияния температуры-при комнатной температуре, что обусловлено стремлением максимально приблизить условия исследований к промышленному процессу и снизить эксплуатационные затраты [14, 9, 10].

В качестве объекта исследования использовалась мелкодисперсная конвертерная пыль медеплавильного производства. Основная масса материала представлена частицами размером менее 0,074 мм [2]. Химический состав исходной конвертерной пыли приведён в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав мелкодисперсной конвертерной пыли

Компонент	Bi, %	Pb, %	Cu, %	Zn, %	Au, г/т	Ag, г/т	Fe, %	Собщ, %
Содержание	0,1-0,25	25,0-45,0	1,5-5,0	2,0-8,0	2,0-3,0	180,0-204,0	-	0,1-0,35

После завершения выщелачивания жидкую и твёрдую фазы разделяли фильтрованием. Полученный нерастворимый остаток без дополнительной термической обработки использовали в качестве исходного сырья для последующих исследований по извлечению висмута [5]. Отказ от стадии сушки позволил исключить возможное влияние температуры на фазовый состав материала. При расчёте плотности пульпы учитывали остаточную влажность твёрдой фазы. Во всех экспериментах применяли реактивы аналитической чистоты [16, 18, 11].

Экспериментальные исследования проводили в стеклянном реакторе объемом 2000 мл, оснащённом магнитной мешалкой с нагревом DLAB MS-H280-Pro (DLAB Scientific, Китай). Устройство использовали для перемешивания реакционной смеси и регулирования температуры процесса. Скорость перемешивания составляла 300 об/мин. Для предотвращения потерь раствора вследствие испарения реактор оснащали обратным водяным холодильником.

Процесс селективного серноокислотного выщелачивания проводили при различных концентрациях серной кислоты и продолжительности процесса [14]. Оптимальные условия выщелачивания были установлены при концентрации H_2SO_4 50 г/л, комнатной температуре и продолжительности 60 мин [17]. При данных условиях степень извлечения меди составляла 80–90 %, при этом висмут преимущественно сохранялся в твёрдом остатке, что обеспечивало его концентрирование до приблизительно 5,3 мас. %.

Химический состав исходной конвертерной пыли и продуктов переработки определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Rigaku NEX CG (Rigaku Corporation, Япония). Морфологические особенности частиц и элементный состав исследовали методом сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным рентгеновским анализом (SEM–EDS) с использованием сканирующего электронного микроскопа Thermo Fisher Scientific Apreo 2 S LoVac (Thermo Fisher Scientific, США).

Гранулометрический состав конвертерной пыли исследовали методом лазерной дифракции. Перед анализом образцы высушивали и диспергировали, после чего строили кривые распределения частиц по размерам и определяли характерные гранулометрические параметры d_{10} , d_{50} и d_{90} .

Минералогический состав образцов изучали методом рентгенофазового анализа (XRD). По результатам исследования установлено, что основными фазовыми составляющими конвертерной пыли являются магнетит (Fe_3O_4), гематит (Fe_2O_3), куприт (Cu_2O), тенорит (CuO) и кварц (SiO_2). Морфологические особенности частиц и распределение химических элементов дополнительно исследовали с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) в сочетании с энергодисперсионным рентгеноспектральным анализом (EDS).

Каждый эксперимент проводили в трёх независимых параллельных опытах ($n = 3$). Полученные экспериментальные данные обрабатывали статистически и представляли в виде среднего арифметического значения $\pm$ стандартного отклонения ($\text{Mean} \pm \text{SD}$). Относительную погрешность определяли на основании стандартного отклонения результатов параллельных измерений. Для оценки достоверности полученных результатов рассчитывали 95 %-ный доверительный интервал среднего значения с использованием распределения Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Проведённые исследования показали, что конвертерная пыль медеплавильного производства представляет собой перспективное техногенное сырьё для комплексной гидрометаллургической переработки. Гранулометрический анализ установил, что материал характеризуется высокой дисперсностью, при этом основная масса частиц имеет размеры менее 0,074 мм, а средний размер частиц (d_{50}) составляет около 15 мкм [6]. Высокая степень дисперсности способствует увеличению площади контакта твёрдой фазы с раствором и положительно влияет на скорость процессов выщелачивания

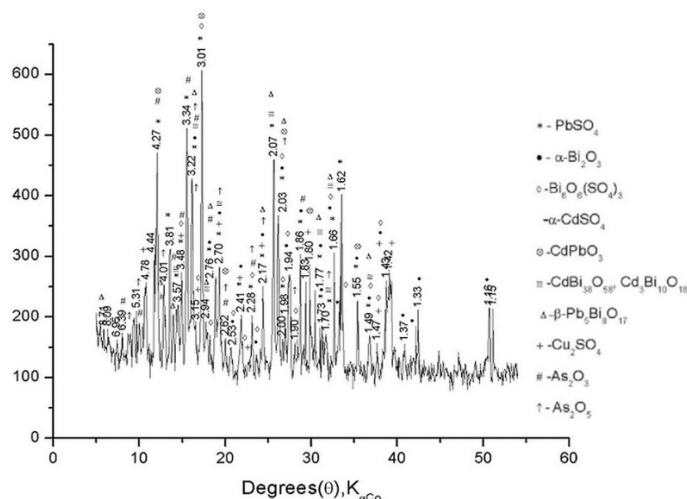
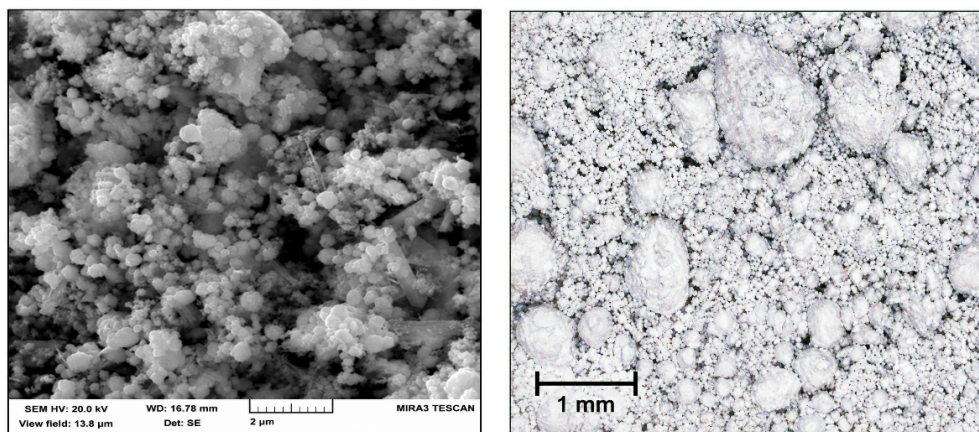


Рисунок 1. Рентгенофазовая дифрактограмма образца конвертерной пыли медеплавильного производства

Как видно из рисунка 1, в составе исследуемой конвертерной пыли идентифицированы преимущественно сульфатные и оксидные соединения свинца, висмута, кадмия, меди и мышьяка. Наличие фаз PbSO_4 , $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$, $\text{Bi}_2\text{O}(\text{SO}_4)_3$, CdSO_4 , CdPbO_3 , Cu_2SO_4 , As_2O_3 и As_2O_5

свидетельствует о сложном фазовом составе материала, сформировавшемся в процессе конвертерной плавки. Присутствие сульфатных соединений меди и оксидных фаз объясняет возможность их селективного поведения при сернокислотном выщелачивании



а

б

Рисунок 2. Морфология частиц исходной конвертерной пыли

(а) SEM-изображение; (б) изображение, полученное методом стереомикроскопии.

Как видно из рисунка 2, конвертерная пыль представляет собой мелкодисперсный материал, состоящий из агломерированных частиц различной формы и размеров. По данным стереомикроскопии наблюдаются агрегаты неправильной формы, тогда как SEM-исследование показывает наличие мелких сферических и неправильной формы частиц, образующих плотные агломераты. Такая морфология способствует увеличению удельной поверхности материала и повышает эффективность сернокислотного выщелачивания [17]

Для предварительной переработки конвертерной пыли был применён метод селективного сернокислотного выщелачивания, направленный на извлечение меди и цинка в раствор при сохранении висмута в твёрдом остатке. Экспериментальные исследования показали, что использование разбавленной серной кислоты обеспечивает эффективное растворение легкорастворимых соединений меди и цинка. Наиболее благоприятные результаты были получены при концентрации серной кислоты 50 г/л, комнатной температуре и продолжительности процесса 60 минут, при которых степень извлечения меди достигала 80–90 %. При этом значительная часть цинка также переходила в раствор, тогда как висмут практически полностью оставался в нерастворимом остатке (3-рисунок).

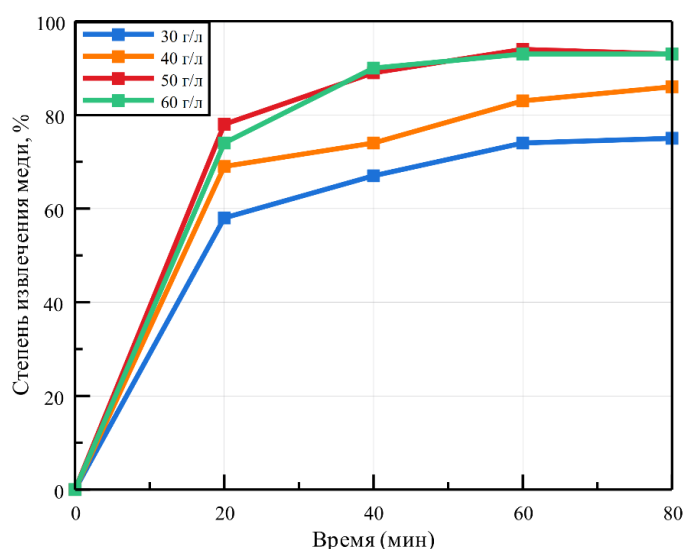


Рисунок 3. Зависимость степени извлечения меди из конвертерной пыли от концентрации H_2SO_4 и продолжительности сернокислотного выщелачивания

После сернокислотного выщелачивания в твёрдом остатке преимущественно сохраняются труднорастворимые соединения висмута и свинца. Основными фазами кека являются $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$, $\text{Bi}_6\text{O}_8(\text{SO}_4)_3$, $\beta\text{-Pb}_3\text{Bi}_8\text{O}_{17}$, PbSO_4 , CdPbO_3 , а также сложные оксидные соединения висмута и кадмия. Кроме того, в остатке присутствуют оксиды железа и соединения мышьяка. В результате удаления меди и цинка содержание висмута в кеке возрастает, что делает его перспективным сырьём для последующего гидрометаллургического извлечения висмута.

Анализ состава твёрдого остатка после выщелачивания показал, что содержание висмута увеличилось примерно до 5,3 %, что свидетельствует о его эффективном концентрировании на первой стадии переработки. Полученный остаток может рассматриваться как перспективное сырьё для дальнейшего извлечения висмута гидрометаллургическими методами. Одновременно предварительное удаление меди и цинка позволяет повысить эффективность последующих стадий переработки и снизить расход реагентов.

Таким образом, результаты выполненных исследований подтверждают, что предварительное сернокислотное выщелачивание является эффективной стадией комплексной переработки конвертерной пыли. Применение данного метода обеспечивает высокую степень извлечения меди и цинка при минимальных потерях висмута, что создаёт благоприятные условия для последующего комплексного использования техногенного сырья.

Заключение

Проведённые исследования показали, что конвертерная пыль медеплавильного производства АО «Алмалыкский ГМК» является перспективным техногенным сырьём для комплексной гидрометаллургической переработки. Гранулометрический, рентгенофазовый

и электронно-микроскопический анализы подтвердили высокую дисперсность материала и сложный фазовый состав, представленный преимущественно оксидными и сульфатными соединениями меди, свинца, висмута, кадмия и мышьяка. Установлено, что применение селективного сернокислотного выщелачивания обеспечивает эффективное извлечение меди и цинка в раствор при сохранении труднорастворимых соединений висмута в твёрдом остатке.

Экспериментально установлено, что наиболее эффективные условия процесса достигаются при концентрации серной кислоты 50 г/л и продолжительности выщелачивания 60 мин, при которых степень извлечения меди достигает 80–90 %. После удаления меди и цинка содержание висмута в кеке увеличивается примерно до 5,3 %, что свидетельствует об эффективном концентрировании данного металла на предварительной стадии переработки. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования селективного сернокислотного выщелачивания в качестве первой стадии комплексной технологии переработки конвертерной пыли и создают основу для последующего гидрометаллургического извлечения висмута из обогащённого твёрдого остатка.

Список литературы

1. Зотов М.А. Роль зеленых инноваций и зеленых передовых производственных технологий в сокращении образования отходов в металлургическом комплексе // Прогрессивная экономика. – 2025. – С. 263–283.
2. Саидахмедов А.А. и др. Исследование распределение дисперсных частиц ценных компонентов при переработке конвертерной пыли медеплавильных заводов // Sanoatda raqamli texnologiyalar/Цифровые технологии в промышленности. – 2024. – Т. 2. – С. 49–56.
3. Саидахмедов А.А., Худояров С.Р., Мирзанова З.А. Разработка технологии получения свинца из конвертерной пыли // ТЕСНика. – 2020. – С. 20–23.
4. Юсупходжаев, А.А. (2013). Научно-технические основы технологий переработки техногенных отходов. Конспект лекций для магистров специальности 5A520408. ТГТУ. – 2019.
5. ЮХИН Ю.М. и др. Получение висмута и его соединений высокой чистоты // Химия в интересах устойчивого развития. – 2024. – Т. 32. – С. 708–717.
6. Allahkarami E. et al. Assessment of kinetic models for oxidative leaching of copper and zinc from converter furnace dust: A sustainable approach to metal recovery // Separation and Purification Technology. – 2025.
7. Caplan M. et al. Hydrometallurgical leaching of copper flash furnace electrostatic precipitator dust for the separation of copper from bismuth and arsenic // Metals. – 2021. – Т. 11.
8. Cheema H.A. et al. Dissolution of molybdenite roasting flue dust in sulfuric acid: kinetics and mechanism for molybdenum and rhenium leaching // Chemical Papers. – 2022. – Т. 76. – P. 4049–4058.
9. Dosmukhamedov N., Zholdasbay E., Argyn A. Extraction of Pb, Cu, Zn and As from fine dust of copper smelting industry via leaching with sulfuric acid // Sustainability. – 2023. – Т. 15.

10. Gao W. et al. Comprehensive recovery of valuable metals from copper smelting open-circuit dust with a clean and economical hydrometallurgical process // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – Т. 424.
11. Kursunoglu S. A review on the recovery of critical metals from mine and mineral processing tailings: recent advances // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2050. – Т. 11. – P. 2023–2050.
12. Nakhaei F. et al. Characterization and leaching feasibility studies of copper flue dust for the recovery of main and trace metals // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2025. – Т. 11. – P. 2215–2235.
13. Sun J. et al. Kinetics analysis of copper extraction from copper smelting slag by sulfuric acid oxidation leaching // *Minerals Engineering*. – 2024. – Т. 216.
14. Wang X. et al. Valuable metals recovery and hazardous waste elimination from copper smelting dusts: A review // *Separation and Purification Technology*. – 2025.
15. Wu J.Y. et al. Selective leaching process for the recovery of copper and zinc oxide from copper-containing dust // *Environmental technology*. – 2015. – Т. 36. – P. 2952–2958.
16. Xiao W. et al. A method for extracting valuable metals from low nickel matte by non-oxidative leaching with H₂SO₄ // *Separation and Purification Technology*. – 2021. – Т. 270.
17. Zhang Y. et al. Separation of arsenic and extraction of zinc and copper from high-arsenic copper smelting dusts by alkali leaching followed by sulfuric acid leaching // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – Т. 9.
18. Zhang G. et al. Whole-Process Management of Arsenic in Copper Smelting Dust: A Review of Removal, Stabilization, and Resource Recovery Technologies // *JOM*. – 2026. – P. 1–26.

References

1. Zotov M.A. [The role of green innovations and green advanced manufacturing technologies in reducing waste generation in the metallurgical complex]. *Progressivnaya ekonomika*. – 2025. – № 11. – P. 263–283. – DOI: 10.54861/27131211_2025_11_263. (In Russ.)
2. Saidakhmedov A.A., et al. [Study of the distribution of dispersed particles of valuable components during processing of converter dust from copper smelting plants]. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*. 2, no. 2, P. 49–56. (In Russ.)
3. Saidakhmedov A.A., Khudoyarov S.R., Mirzanova Z.A. [Development of a technology for producing lead from converter dust]. *Tekhnika*. – 2020. – № 2. – P. 20–23. – DOI: 10.24411/2181-0753-2020-10004. (In Russ.)
4. Yusupkhodjaev A.A. [Scientific and technical foundations of technologies for processing technogenic wastes]. Lecture notes for master's students of specialty 5A520408. Tashkent, Tashkent State Technical University, 2019. (In Russ.)
5. Yukhin Yu.M., Koledova E.S., Daminov A.S., Timakova E.V., Kuznetsov V.A., Sheina O.D. [Obtaining bismuth and its high-purity compounds]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2024, vol. 32. – 2024. – № 5. – P. 708–717. – DOI: 10.15372/KhUR2024604. (In Russ.)

6. Allahkarami E., et al. Assessment of kinetic models for oxidative leaching of copper and zinc from converter furnace dust: A sustainable approach to metal recovery. *Separation and Purification Technology*, 2025, P. 134512.
7. Caplan M. et al. Hydrometallurgical leaching of copper flash furnace electrostatic precipitator dust for the separation of copper from bismuth and arsenic. *Metals*, 2021, vol. 11, P. 371–2021. – № 2. – DOI: 10.3390/met11020371.
8. Cheema H.A., Bhatti I.A., Srivastava R.R., Jahan N., Zia M.A. Dissolution of molybdenite roasting flue dust in sulfuric acid: kinetics and mechanism for molybdenum and rhenium leaching. *Chemical Papers*, 2022, vol. 76–2022. – № 7. – P. 4049–4058. – DOI: 10.1007/s11696-022-02145-9.
9. Dosmukhamedov N., Zholdasbay E., Argyn A. Extraction of Pb, Cu, Zn and As from fine dust of copper smelting industry via leaching with sulfuric acid. *Sustainability*, 2023, vol. 15, P. 15881–2023. – № 22. – DOI: 10.3390/su152215881.
10. Gao W., Xu B., Yang J., Yang Y., Li Q., Zhang B., Liu G., Ma Y., Jiang T. Comprehensive recovery of valuable metals from copper smelting open-circuit dust with a clean and economical hydrometallurgical process. *Chemical Engineering Journal*, 2021, vol. 424, P. 130411–2021. – DOI: 10.1016/j.cej.2021.130411.
11. Kursunoglu S. A review on the recovery of critical metals from mine and mineral processing tailings: recent advances // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2050. – № 3. – P. 2023–2050.
12. Nakhaei F., Locmelis M., Alagha L., Moats M., Eyzaguirre C., Smith C. Characterization and leaching feasibility studies of copper flue dust for the recovery of main and trace metals. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2025, vol. 11–2025. – № 3. – P. 2215–2235. – DOI: 10.1007/s40831-025-01158-4.
13. Sun J., Zhang T., Shen P., Liu D., Dong L. Kinetics analysis of copper extraction from copper smelting slag by sulfuric acid oxidation leaching. *Minerals Engineering*, 2024, vol. 216, P. 108886–2024. – DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108886.
14. Wang X., et al. Valuable metals recovery and hazardous waste elimination from copper smelting dusts: A review. *Separation and Purification Technology*, 2025, P. 135386.
15. Wu J.Y., Chang F.C., Wang H.P., Tsai M.J., Ko C.H., Chen C.C. Selective leaching process for the recovery of copper and zinc oxide from copper-containing dust. *Environmental Technology*, 2015, vol. 36–2015. – № 23. – P. 2952–2958. – DOI: 10.1080/09593330.2014.960479.
16. Xiao W., et al. A method for extracting valuable metals from low nickel matte by non-oxidative leaching with H_2SO_4 . *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 270, P. 118789.
17. Zhang Y., Feng X., Qian L., Luan J., Jin B. Separation of arsenic and extraction of zinc and copper from high-arsenic copper smelting dusts by alkali leaching followed by sulfuric acid leaching. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, P. 105997–2021. – № 5. – DOI: 10.1016/j.jece.2021.105997.
18. Zhang G., et al. Whole-process management of arsenic in copper smelting dust: a review of removal, stabilization, and resource recovery technologies. *JOM*, 2026, P. 1–26.